UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCUS VINÍCIUS VITORATTI DE ARAUJO

Dispositivo Eletromagnético Dissipador de Vibrações para Máquinas Rotativas

São Carlos
2013

MARCUS VINÍCIUS VITORATTI DE ARAUJO

Dispositivo Eletromagnético Dissipador de Vibrações para Máquinas
Rotativas

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Dinâmica de Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nicoletti

Este exemplar foi revisado, sob responsabilidade única do autor, em relação ao original, o qual se encontra disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP.

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A658d Araujo, Marcus Vinícius Vitoratti de
Dispositivo Eletromagnético Dissipador de Vibrações
para Máquinas Rotativas / Marcus Vinícius Vitoratti de
Araujo; orientador Rodrigo Nicoletti. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Dinâmica de Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. eletromagnetismo. 2. vibrações mecânicas. 3.
colheita de energia. 4. dinâmica de rotores. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCUS VINICIUS VITORATTI DE ARAUJO**.

Título da dissertação: "Dispositivo eletromagnético dissipador de vibrações para máquinas rotativas".

Data da defesa: 01/11/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Rodrigo Nicoletti (orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **Paulo Sérgio Varoto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Vicente Lopes Junior**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Ilha Solteira)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Protocolo de Julgamento
Data: 01/11/2013
Assinatura: _____
Assinatura: _____

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Rodrigo Nicoletti, pela oportunidade e orientação.

Ao Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade, à secretária Cristina M. M. P. Fonseca e aos técnicos do Laboratório de Dinâmica, que auxiliaram e possibilitaram a execução deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

À Secretaria de Pós Graduação, pela atenção e colaboração.

À Agência USP de Inovação, pelo suporte prestado na redação e depósito da patente.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Resumo

ARAÚJO, M. V. V. de. (2013). Dispositivo eletromagnético dissipador de vibrações para máquinas rotativas. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Este trabalho propõe uma solução inovadora para o amortecimento de vibrações laterais indesejadas em máquinas rotativas através da conversão de energia cinética em energia elétrica por meio de um dispositivo eletromagnético passivo de colheita de energia, com o mínimo de geração de torque reativo. Para atingir estes objetivos, foram descritas e avaliadas as três principais técnicas de coleta de energia vibratória (piezelétrica, eletrostática e eletromagnética) juntamente com análises qualitativas das equações de eletromagnetismo e pelo Método dos Elementos Finitos. Um protótipo que consiste em um conjunto de ímãs permanentes anexos ao rotor e um conjunto de bobinas no estator demonstrou experimentalmente uma diminuição da amplitude de vibração em até 6,8%, na região de velocidades críticas, com geração não significativa de torque. Estes resultados foram obtidos experimentalmente mantendo-se os enrolamentos independentes entre si.

Palavras chave: Eletromagnetismo, Vibrações Mecânicas, Colheita de Energia, Dinâmica de Rotores.

Abstract

ARAÚJO, M. V. V. de. (2013). Electromagnetic vibration damper device for rotating machines. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

In this work, it is proposed a novel damping solution for undesired lateral vibrations in rotating machines by converting kinetic energy into electrical energy through a passive electromagnetic energy harvesting device, with minimal generation of reactive torque. In order to achieve these goals, it is described and evaluated the three main vibration energy harvesting techniques (piezoelectric, electrostatic and electromagnetic) along with qualitative analysis of electromagnetic equations and finite element analysis (FEA). Furthermore, a prototype consisting of a set of permanent magnets attached to the rotor and a set of coils attached to the stator showed a decrease in the amplitude of vibration up to 6,8% in the range of critical velocities, with non-significant torque generation. Such results were obtained experimentally with independent-circuit coils.

Keywords: Electromagnetism, Mechanical Vibrations, Energy Harvesting, Rotor Dynamics.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

1	Introdução	p. 23
1.1	Objetivos	p. 26
1.2	Conteúdo do Trabalho	p. 27
2	Colheita de Energia Vibratória	p. 29
2.1	Técnicas de Colheita de Energia Vibratória	p. 29
2.2	Técnicas de Aprimoramento	p. 35
3	Fundamentação Teórica	p. 37
4	Configuração do Sistema de Conversão de Energia	p. 43
4.1	Análise Qualitativa e Estudo das Configurações pelo Método dos Elementos Finitos	p. 47
4.2	Análise da Configuração Final pelo Método dos Elementos Finitos . . .	p. 59
5	Bancada de Testes	p. 65
6	Resultados Experimentais	p. 71
6.1	Procedimento Experimental	p. 71
6.2	Testes do Dispositivo sem Carga	p. 72

6.3 Testes do Dispositivo com Carga . . . . . p. 74

7 Conclusão . . . . . p. 81

7.1 Perspectivas futuras . . . . . p. 82

Referências Bibliográficas . . . . . p. 85

Lista de Figuras

1.1	Eixo que suporta um rotor (RAO, 2008).	p. 24
1.2	Comparação entre baterias e colheitas de energia (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).	p. 25
1.3	Previsão de mercado de coletores de energia (IDTECHEX, 2011).	p. 26
2.1	Topologias de conversores eletrostáticos (BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006).	p. 30
2.2	Viga em balanço com material piezelétrico bimorfo (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).	p. 31
3.1	Exemplo de sistema a ser analisado.	p. 40
3.2	Malha de elementos finitos tridimensional.	p. 40
3.3	Refinamento de malha de elementos finitos.	p. 41
4.1	Campo magnético em ímã com polarização radial girando com velocidade de 1200 rpm e excentricidade de 0.5 mm.	p. 44
4.2	Campo magnético em ímã com polarização axial girando com velocidade de 1200 rpm e excentricidade de 0.5 mm.	p. 45
4.3	Modelo do enrolamento utilizado nas simulações numéricas.	p. 47
4.4	Configuração A1 do dispositivo (solução numérica tridimensional).	p. 48
4.5	Resultado das simulações para o modelo A1.	p. 49
4.6	Configuração A2 do dispositivo (solução numérica tridimensional).	p. 50
4.7	Resultado das simulações para o modelo A2.	p. 50
4.8	Configuração A3 do dispositivo (solução numérica tridimensional).	p. 51
4.9	Resultado das simulações para o modelo A3.	p. 52
4.10	Configuração A4 do dispositivo (solução numérica tridimensional).	p. 53
4.11	Resultado das simulações para o modelo A4.	p. 54

4.12	Resultado das simulações para o modelo B1.	p. 55
4.13	Resultado das simulações para o modelo B2.	p. 56
4.14	Resultado das simulações para o modelo B3 (escala modificada).	p. 57
4.15	Resultado das simulações para o modelo B4.	p. 58
4.16	Força radial resultante no enrolamento para diferentes quantidades de ímãs e número de espiras, com raio de enrolamento constante.	p. 62
4.17	Força radial resultante no enrolamento para diferentes quantidades de ímãs e raio do enrolamento, com número de espiras constante.	p. 63
5.1	Visão geral da bancada de testes.	p. 65
5.2	Detalhe da montagem dos sensores de proximidade indutivos.	p. 66
5.3	Divisões do protótipo.	p. 67
5.4	Suportes primário e secundário.	p. 67
5.5	Conjunto do ímã e visão explodida.	p. 68
5.6	Conjunto de bobinas.	p. 69
5.7	Dispositivo montado sem os enrolamentos.	p. 69
5.8	Dispositivo montado com os enrolamentos.	p. 70
6.1	Órbitas do eixo para diferentes frequências de rotação do eixo.	p. 73
6.2	Máxima amplitude de vibração nas direções vertical e horizontal.	p. 73
6.3	Associações elétricas adotadas nos testes experimentais.	p. 74
6.4	Exemplo ilustrativo da média dos máximos.	p. 75
6.5	Comparação entre as amplitudes de vibração do eixo obtidas com a as- sociação elétrica independente e o sistema em vazio.	p. 76
6.6	Comparação entre as amplitudes de vibração do eixo obtidas com a as- sociação elétrica em paralelo e o sistema em vazio.	p. 77
6.7	Comparação entre as amplitudes de vibração do eixo obtidas com a as- sociação elétrica em série e o sistema em vazio.	p. 78
6.8	Comparação entre os torques de acionamento do eixo obtidos experimen- talmente com as diferentes associações elétricas e o sistema em vazio.	p. 78

6.9	Comparação entre as tensões elétricas induzidas nos enrolamentos obtidas experimentalmente com as diferentes associações elétricas e o sistema em vazio.	p. 79

Lista de Tabelas

1.1	Acelerações e picos de frequências típicas no modo de vibração fundamental.	p. 23
2.1	Resumo comparativo entre as três principais técnicas de conversão. . .	p. 33
2.2	Comparação da densidade de potência normalizada entre diferentes dispositivos da literatura.	p. 34
3.1	Demais parâmetros da equação 3.7.	p. 39
4.1	Diferentes configurações do sistema de conversão de energia a ser aplicado no sistema rotativo.	p. 46
4.2	Resumo qualitativo dos resultados obtidos com as diferentes configurações do sistema de conversão.	p. 59
4.3	Valores adotados para os parâmetros de projeto do dispositivo.	p. 60

Lista de Símbolos

B Campo magnético

F Integral elíptica incompleta de primeira forma

$\vec{F}$ Força

i Corrente elétrica induzida

K Integral elíptica completa de primeira forma

$\vec{m}$ Momento dipolo magnético

N Número de espiras

S Área da seção transversal do enrolamento

t Tempo

ϵ Tensão induzida

$\hat{\eta}$ Versor normal à área da seção transversal do enrolamento

ϕ Fluxo magnético

Π Integral elíptica completa de terceira forma

ϱ Resistência do fio por unidade de comprimento

$\vec{\tau}$ Torque

1 *Introdução*

A Dinâmica, um dos ramos da mecânica clássica, possui uma grande divisão denominada Vibrações, a qual, segundo Inman (2001), estuda o movimento repetitivo dos objetos em relação a um referencial estacionário ou posição nominal, geralmente de equilíbrio. Evidente em todo lugar, a vibração mecânica é fruto de estudo da engenharia há muitos anos e pode ser tanto prejudicial quanto desejada. Dentre exemplos práticos, podem-se citar as vibrações de um motor automotivo, das cordas de um violão ou de uma máquina de lavar roupas.

Para caracterizar a vibração mecânica, é comum analisar dois parâmetros essenciais: aceleração e frequência. A tabela 1.1 reúne alguns exemplos dessas informações para diferentes aplicações (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003; SAHA et al., 2008). As frequências de vibrações mecânicas (estruturais) normalmente encontradas são consideradas baixas, inferiores a 200 Hz (SARI; BALKAN; KULAH, 2010).

Tabela 1.1: Acelerações e picos de frequências típicas no modo de vibração fundamental.

Fonte	Aceleração (m/s^2)	Frequência (Hz)
Drive de CD/DVD	0,6	75
Forno de micro-ondas	2,5	121
Painel de carro	3,0	13
Secadora	3,5	121
Liquidificador	6,4	121
Mochila (durante caminhada)	9,8	2
Motor de carro	12,0	200

Vibrações também podem ocorrer em sistemas rotativos, devido à flexão do eixo (figura 1.1), causada por desbalanceamentos ou forças externas atuantes no rotor e instabilidades nos mancais. Esta flexão leva o eixo a apresentar vibrações transversais que atingem sua maior amplitude quando a frequência natural do eixo coincide com a frequência de

rotação (velocidade crítica), o que pode ser prejudicial em máquinas rotativas.

Figura 1.1: Eixo que suporta um rotor (RAO, 2008).

Para o controle destas vibrações, existem técnicas ativas e passivas. Os controles ativos são aqueles que exigem realimentação (*feedback*) por sensoriamento e atuadores, cuja implementação deve ser planejada ainda na fase de concepção do produto, resultando em um projeto mais bem elaborado porém dispendioso (CAMPOS; NICOLETTI, 2013). Dentre os controles ativos voltados para atenuação de vibrações em máquinas rotativas, podem ser citados os mancais magnéticos ativos, provenientes de conceitos que datam da década de 50 (BEAMS; KINSEY; SNODDY, 1954) e mancais com lubrificação ativa (NICOLETTI; SANTOS, 2005).

Os métodos passivos de controle, por sua vez, não exigem circuito fechado, isto é, não exigem sensoriamento e podem representar uma solução mais econômica. Dentre eles, existem os absorvedores dinâmicos, porém a frequência de excitação deve ser constante e conhecida (CAMPOS; NICOLETTI, 2013), balanceadores Leblanc (LEBLANC, 1916), usualmente aplicados para reduzir vibrações laterais em máquinas de lavar devido ao processo de centrifugação, e balanceadores hidráulicos (SATO, 1990).

Outro meio passivo de controle de vibração, de acordo com o princípio de conservação de energia, é através da conversão de energia cinética vibratória em outros tipos de energia. O processo passivo de captura de energia e posterior conversão em energia elétrica denomina-se colheita de energia (*energy harvesting*, em Inglês), assunto que tem recebido foco nos últimos anos.

Apesar de a energia vibratória não fornecer uma grande densidade energética, a sua

conversão em energia elétrica torna possível a utilização para o suprimento de sensores (STEPHEN, 2005) ou como fontes de alimentação para microprocessadores (AMIRTHARAJAH; CHANDRAKASAN, 1998), ou para transmissores sem fio (GLYNNE-JONES; WHITE, 2001; BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006; BEEBY et al., 2007). Sistemas de conversão energética podem também ser usados em substituição das baterias convencionais, o que possui diversas consequências, como a diminuição do impacto ambiental devido ao descarte das baterias (BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006), vida útil potencialmente infinita (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003; AMIRTHARAJAH; CHANDRAKASAN, 1998) e viabilização da instalação de equipamentos em locais de difícil acesso e manutenção.

A pesquisa de Roundy, Wright e Rabaey (2003) apresenta uma comparação entre baterias e duas técnicas de colheita de energia, solar e por vibração, ao longo do tempo. Na figura 1.2, as caixas mais escuras representam as faixas de potência obtidas pela luz solar (de *indoor* à luz solar direta) e vibração mecânica. Através da figura 1.2, entende-se que, caso um dispositivo tenha vida útil estimada em poucos anos, as baterias podem representar a solução mais viável. Caso contrário, é mais interessante pensar em uma alternativa sem baterias, como coletores de energia ambiental.

Figura 1.2: Comparação entre baterias e colheitas de energia (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).

De modo geral, um dispositivo coletor de energia possui quatro componentes principais (ZERVOS, 2012):

1. Elemento de colheita de energia;
2. Componente de armazenamento de energia;
3. Eletrônica de interface;

4. Eletrônica tolerante.

O elemento de colheita de energia é aquele que realiza a conversão, como células fotovoltaicas, elemento eletrodinâmico ou piezelétrico. O componente de armazenamento de energia refere-se às baterias e aos (super)capacitores. A eletrônica de interface é responsável pela regulação da tensão, corrente e outros parâmetros essenciais para o funcionamento da eletrônica tolerante, que podem ser transmissores sem fio e microprocessadores de baixa potência.

Uma pesquisa realizada pela IDTechEx (2011) estima que o valor de mercado de coletores de energia está por volta de 700 milhões de dólares, distribuídos como mostrado na figura 1.3, com previsão de chegar a mais de quatro bilhões de dólares em 2021, devido ao avanço de automações residenciais e industriais, etiquetas inteligentes, setores automotivo e militar, entre outros.

Figura 1.3: Previsão de mercado de coletores de energia (IDTECHEx, 2011).

Um exemplo prático de uso industrial é o monitoramento sem fio das condições de linhas de transmissão e equipamentos, permitindo manutenção preditiva ao invés de corretiva, reduzindo, assim, custos devidos ao tempo de parada e cabeamento. Pode-se pensar, também, em economia de cabeamento em aviões, reduzindo o peso e, conseqüentemente, o consumo de combustível.

1.1 Objetivos

O assunto de coletores de energia tem ganhado atenção recentemente, mas ainda há dificuldades em se encontrar na literatura aplicações voltadas para o amortecimento de vibrações em sistemas rotativos. Assim, considerando que há possibilidade destes conversores de energia atingirem uma diminuição do nível de vibração mecânica, e como forma de contribuir para o meio científico, o objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo de colheita de energia que também atenua as vibrações laterais presentes em sistemas rotativos.

1.2 Conteúdo do Trabalho

Esta dissertação está organizada em sete capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução, no qual se apresentam os objetivos deste trabalho, contextualizando o leitor do problema a ser abordado e possível solução através de coletores de energia;
- Capítulo 2 – Colheita de Energia Vibratória, a qual insere o leitor no campo da solução apresentada no capítulo anterior, colheita de energia, mostrando o estado da arte das diversas técnicas, com destaque para o conversor eletromagnético;
- Capítulo 3 – Fundamentação Teórica, apresentando uma teoria mais profunda sobre a metodologia utilizada, a partir das equações e suas conclusões qualitativas;
- Capítulo 4 – Configuração do Sistema de Conversão de Energia, o qual mostra os objetivos e requisitos deste trabalho de forma mais detalhada e a análise feita para se chegar na solução final teórica, utilizando-se as teorias e metodologias descritas nos capítulos anteriores;
- Capítulo 5 – Bancada de Testes, apresentando ao leitor a bancada de ensaios para os ensaios experimentais e sua adaptação;
- Capítulo 6 – Resultados Experimentais, desde os resultados preliminares até a obtenção e análise dos resultados finais;
- Capítulo 7 – Conclusão, o qual traz uma conclusão de todo o trabalho, trazendo consigo as perspectivas futuras.

2 *Colheita de Energia Vibratória*

Energia é um conceito fundamental, assim como força e massa. No entanto, apesar de ser um conceito estabelecido, é difícil de ser definido. Alguns pesquisadores definem a energia como a capacidade de realização de trabalho (HIBBELER, 2010) ou a habilidade de produzir um efeito (SONNTAG; BORGNAKKE; WYLEN, 2003).

Embora não seja totalmente rigoroso, pode-se classificar a energia em três tipos fundamentais: energia radiante, potencial e cinética. A energia radiante é aquela associada às ondas eletromagnéticas, como a energia contida nos raios solares. Energia potencial é aquela associada ao armazenamento de energia devido à posição do objeto no sistema, como a energia potencial elástica. A energia cinética, por sua vez, é todo o tipo de energia associada ao movimento e subdivide-se em grupos não exclusivos, como inercial e não inercial, translacional, rotacional e térmica. Os mecanismos de geração de energia elétrica mais conhecidos são baseados na conversão deste tipo de energia: hidráulico, eólico e nuclear. No entanto, recentemente, outros mecanismos de geração estão se destacando, como aqueles que aproveitam a energia radiante dos raios solares e, em especial e foco deste trabalho, a energia proveniente da vibração.

2.1 *Técnicas de Colheita de Energia Vibratória*

Como citado no capítulo 1, existem técnicas de colheita de energia que podem ser úteis na atenuação de vibrações mecânicas. São três as principais técnicas (ZHU; BEEBY, 2011):

- Eletrostática;
- Piezelétrica;
- Eletromagnética.

Estudos mais recentes mostram a inclusão de mais de uma técnica em um mesmo dispositivo, sendo este tipo de composição denominado “híbrido”, como encontrado em Karami, Varoto e Inman (2011), cujo dispositivo se utiliza tanto da técnica piezelétrica quanto da eletromagnética.

O conversor eletrostático é, na essência, um capacitor variável. Um capacitor é um dispositivo que armazena energia em um campo elétrico, sendo tipicamente composto por dois eletrodos, separados por um material isolante, denominado dielétrico. Quando aplicada uma diferença de potencial elétrico, cargas elétricas de sinais opostos se acumulam próximas aos eletrodos. Quando aplicada uma força e consequentemente um deslocamento entre os eletrodos, pode haver geração de energia elétrica. O conversor eletrostático pode apresentar três topologias básicas, conforme mostrado na figura 2.1.

Figura 2.1: Topologias de conversores eletrostáticos (BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006).

Cada uma destas topologias possui vantagens e desvantagens. A forma (a) *in-plane overlap* não necessita de travas mecânicas, porém possui menor estabilidade e, em comparação com as outras, possui a menor capacitância máxima (a qual se relaciona proporcionalmente à quantidade de conversão de energia). A forma (b) *in-plane gap closing* possui a maior capacitância máxima, porém necessita de travas mecânicas. Na forma (c) *out-of-plane gap closing*, as placas necessitam de uma distância de separação muito grande para que seja viável. Caso contrário, elas se uniriam, devido às interações entre si (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).

A principal vantagem dos conversores eletrostáticos é a fácil integração com sistemas microelectromecânicos (MEMs). Uma desvantagem se encontra na necessidade de fonte de tensão separada, para que se possa iniciar o processo de conversão, principalmente nos sistemas que não possuem circuito de carregamento de bateria e que não podem fornecer

esta carga inicial.

A segunda técnica de colheita de energia cinética vibratória se baseia no efeito piez elétrico, descoberto por Jacques e Pierre Curie, em 1880, que é uma propriedade, geralmente anisotrópica, que alguns materiais têm de gerar energia elétrica quando estimulados mecanicamente e vice versa. Através deste efeito, por exemplo, pode-se aproveitar a energia do peso e movimento de carros sobre rodovias, no qual apenas 600 metros de materiais piezoelétricos na rodovia seriam capazes de fornecer energia elétrica para mais de 200 habitações (HELLER, 2011). Há também muitos exemplos focados no aproveitamento da energia proveniente do corpo humano, como a conversão da energia das forças exercidas na sola de sapato (SHENCK; PARADISO, 2001). No quesito vibração, muitas pesquisas realizam montagens dos materiais piez elétricos em vigas em balanço, consideradas geometrias interessantes pela sua baixa frequência de ressonância (BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006), ideal para a maior parte das aplicações, como visto no capítulo 1.

Figura 2.2: Viga em balanço com material piez elétrico bimorfo (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).

As principais vantagens dos conversores piez elétricos estão em sua simplicidade em termos de abordagem, geometria e fabricação. A eficiência de conversão depende das propriedades do material, que produz tensão relativamente alta a uma corrente baixa (BEEBY; TUDOR; WHITE, 2006). Como desvantagens, têm-se a estreita largura de banda de frequência, fragilidade das vigas em balanço e a redução da eficiência de conversão após certo tempo (XING et al., 2011).

A terceira técnica de conversão de energia cinética vibratória, a eletromagnética, se baseia na lei da indução eletromagnética, descoberta por Michael Faraday, em 1831. A indução eletromagnética é um fenômeno essencial na maior parte das máquinas elétricas,

como transformadores, motores e geradores, sendo responsável por produzir uma força eletromotriz (tensão induzida) devido à variação temporal do fluxo magnético que passa através de um condutor elétrico, normalmente um enrolamento.

O conceito básico é que há tensão elétrica induzida quando há linhas de fluxo magnético “cortadas” pelo condutor, ao longo do tempo. Cinco fatores influenciam no sentido e magnitude desta tensão elétrica: a área do condutor, o número de enrolamentos, o ângulo entre o condutor e as linhas de fluxo magnético, a velocidade de corte e a intensidade do campo magnético.

A técnica de conversão eletromagnética é matematicamente bem estabelecida e será mais bem explicada no capítulo 3 deste trabalho. De modo geral, para conversão da energia vibratória, os sistemas são modelados como sendo massa-mola-amortecedor, de segunda ordem, com excitação na base (BEEBY et al., 2007).

Este modelo específico possui uma boa representação da realidade. No entanto, é importante considerar e compreender os fatores que o afetam diretamente, especialmente na constante de amortecimento. O'Donnell, Saha e Beeby (2007) detalharam três principais fatores: efeitos de escala no campo magnético e no enrolamento, parâmetros do enrolamento e perdas diversas (de material, de superfície, termoelástica, entre outras). Apesar da modelagem matemática de sistemas eletromagnéticos ser bastante difundida na literatura, outros pesquisadores complementam-na com análises numéricas, por elementos finitos.

O conversor eletromagnético tem como principais vantagens as diversificadas configurações de material e forma e materiais de fácil acesso, como ímãs e fios de cobre esmaltado. Segundo Beeby, Tudor e White (2006), este conversor possui a característica de fornecer altas correntes a uma tensão baixa (abaixo de 1V). Para escala reduzida, no entanto, há dificuldades práticas, como problema de alinhamento e montagem.

Dentre as três técnicas de conversão de energia cinética em energia elétrica analisadas, é necessário escolher a que proporciona maior adequação ao problema proposto: conversão energética em sistema rotativo para a atenuação das vibrações laterais do rotor. Para isso, um resumo comparativo, apresentado na tabela 2.1, reúne as vantagens e desvantagens das técnicas, criado com base nas pesquisas de Elvin e Elvin (2011), Beeby, Tudor e White (2006) e Roundy, Wright e Rabaey (2003).

Tabela 2.1: Resumo comparativo entre as três principais técnicas de conversão.

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Piezelétrica	Sem fonte de tensão necessária	Eficiência limitada mecanicamente
	Saída acima de 1V	
	Abordagem mais simples	Materiais podem ser duros e quebradiços
Eletrostática	Fácil integração com MEMs	Necessita de fonte de tensão separada
	Saída acima de 1V	
Eletromagnética	Sem fonte de tensão necessária	Saída abaixo de 1V
	Menor custo	Dificuldade de integração com MEMs
	Técnica bem estabelecida	
	Flexibilidade de configurações	Abordagem mais complexa
	Componentes comerciais	
	Sem contato mecânico	

Apesar de cada técnica possuir suas particularidades, é possível estabelecer uma comparação entre os diferentes estudos encontrados na literatura através de um parâmetro denominado densidade de potência normalizada (NPD), o qual relaciona a potência de saída com a aceleração e volume (BEEBY et al., 2007):

$$NPD = \frac{\text{Potência}}{\text{Aceleração}^2 \times \text{Volume}} \quad (2.1)$$

A tabela comparativa 2.2 foi montada a partir das comparações e resultados de Beeby et al. (2007), Beeby, Tudor e White (2006) e Saha et al. (2008). Verifica-se que os três tipos de conversores (EM – Eletromagnético, PZ – Piezelétrico e ES – Eletrostático) aparecem de forma distribuída na tabela, o que significa igual exequibilidade. É interessante observar que a utilização de conversores de tamanho reduzido e que uma alta amplitude de aceleração ou frequência não significa, necessariamente, em maior potência produzida.

Tabela 2.2: Comparação da densidade de potência normalizada entre diferentes dispositivos da literatura.

Tipo	Autor principal	Ano	Frequência (Hz)	Aceleração (ms^{-2})	Massa (g)	Volume (cm^3)	Potência (μW)	NPD ($kg\ s\ m^{-3}$)
EM	Beeby	2007	52	0,589	0,66	0,15	46	883,97
EM	Perpetuum	—	100	0,4	50	30	4000	833,33
PZ	Roundy	2003	120	2,5	9,15	1	375	60,00
EM	Glynn-Jones	2004	322	2,7	—	0,84	180	29,39
EM	Glynn-Jones	2004	99	6,85	2,96	4,08	4990	26,07
ES	Roundy	2003	120	2,25	—	1	110	21,73
PZ	Hong	2005	190	71,3	0,01	$1,2 \times 10^{-3}$	65	10,65
ES	Despesse	2005	50	8,8	104	1,8	1052	7,55
EM	Saha	2008	8	0,38	0,027	12,7	13,8	7,53
PZ	Marzencki	2005	900	9,81	$1,1 \times 10^{-3}$	9×10^{-4}	0,6	6,93
PZ	Jeon	2005	13900	106,8	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-5}$	1	3,25
PZ	White	2001	80	2,3	0,8	0,125	2,1	3,18
ES	Arakawa	2004	10	3,9	—	0,8	6	0,49
EM	Ching	2002	110	95,5	0,192	1	830	0,09
ES	Despesse	2005	50	9,2	2	32,4	70	0,03
ES	Mitcheson	2003	30	50	0,1	0,75	3,7	0,002
EM	Shearwood	2001	4400	382	$2,3 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-3}$	0,3	$3,8 \times 10^{-4}$

O conversor que melhor se adequa às exigências do projeto é, portanto, o eletromagnético, principalmente por não necessitar de contato já que o objeto vibratório (rotor) também rotaciona e pela flexibilidade no desenvolvimento das diversas configurações de montagem e alteração de parâmetros.

2.2 Técnicas de Aprimoramento

Para se melhorar o mecanismo de conversão, é necessário, primeiramente, ter uma ampla compreensão de seu funcionamento e dos fatores que podem influenciar na conversão. Deve-se sempre analisar criticamente a geometria do problema, como, por exemplo no caso do conversor eletromagnético, a espessura do fio do enrolamento, o número de voltas e camadas e compreender suas consequências: quanto maior o comprimento e diâmetro do fio, maior é a resistência elétrica, parâmetro que afeta diretamente a conversão de energia.

A pesquisa de O'Donnell, Saha e Beeby (2007) estudou outros parâmetros, como as perdas inclusas na constante de amortecimento, geralmente associadas à geometria e que podem ser perdas exclusivas do material, termoelástica (condução irreversível), *clamping* (radiação de energia acústica), de superfície (relevante quando em nanoescala) ou de esmagamento.

Após analisadas estas proposições, visto que ainda é fundamental o aumento de eficiência para a aplicação desejada, pode-se tirar proveito de outras três técnicas, que se encontram bem sintetizadas em Zhu, Tudor e Beeby (2010) e Kulah e Najafi (2004):

- sintonização mecânica;
- aumento da largura de banda;
- *frequency upconversion*.

A sintonização mecânica é o ajuste da geometria do conversor de modo que sua frequência de ressonância coincida com a frequência do meio em que se encontra. Particularmente, considerado o modelo da viga em balanço com uma massa na extremidade, é possível alterar a frequência de ressonância do conversor por meio de quatro parâmetros: dimensões, centro de gravidade da massa, elasticidade e tensão na viga. Esta técnica possui alta eficiência, porém é limitada a uma estreita faixa de frequências.

Para aumentar esta faixa, pode-se aplicar uma técnica de aumento da largura de banda a partir da superposição de geradores, com frequências de ressonância distintas ou

pela utilização de cargas indutivas, como demonstrado por Renno, Daqaq e Inman (2009). Apesar de complexa, esta técnica é vantajosa.

Por último, existe uma técnica denominada *frequency upconversion* (FupC), de conversão de frequência mais baixa para uma frequência mais alta. Como exemplo desta técnica, pode-se ter um ímã, localizado em um diafragma com baixa frequência de ressonância (menor que 100 Hz), um enrolamento e uma ponta magnética localizados em uma viga em balanço com uma maior frequência de ressonância (acima de 1 kHz). Assim que o diafragma vibra, o ímã se aproxima da ponta magnética. A distância entre o diafragma e a viga é ajustada de modo que o ímã se “agarre” à ponta magnética (movimento denominado *catch*) e a carregue até que se desprenda (*release*). Isto faz com que a viga vibre em sua frequência natural, em alta frequência. Esta alta frequência, aliada aos fatores de influência, possibilita uma maior conversão de energia.

Os estudos dos efeitos da não linearidade (RENNO; DAQAQ; INMAN, 2009) e o uso destas técnicas também auxiliam a compreender o sistema como um todo e melhoram a eficiência da conversão energética.

3 *Fundamentação Teórica*

A técnica de colheita de energia eletromagnética, escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, e suas equações, quando abordadas de forma qualitativa, possuem conceitos simples de serem compreendidos.

A começar pelo momento dipolo magnético, uma grandeza vetorial utilizada na determinação de força e torque entre dois campos magnéticos, como, por exemplo, entre o campo magnético gerado pela passagem de corrente elétrica em um solenoide e o campo magnético de um ímã permanente. Representado pelos vetores $\vec{m}$ ou $\vec{\mu}$, pode ser escrito, para o caso de um solenoide, como (NUSSENZVEIG, 2007):

$$\vec{m} = NiS\hat{\eta} \quad (3.1)$$

onde N representa o número de voltas do enrolamento, i a corrente elétrica, S a área de seção transversal do enrolamento e $\hat{\eta}$ o versor normal a esta área. É importante notar que o momento dipolo magnético é função da corrente elétrica do condutor. Isto significa que, na falta de corrente elétrica (como nos casos de circuito aberto ou falta de tensão induzida), o valor de $\vec{m}$ é zero.

O torque, escrito em função do momento dipolo magnético e de um campo magnético $\vec{B}$ é, segundo Cohen, Lide e Trigg (2003) e Nussenzveig (2007):

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (3.2)$$

Por ser um produto vetorial, é importante notar que o torque será sempre nulo quando os vetores momento dipolo magnético e campo magnético forem paralelos. Pensando em uma interação entre um solenoide e um campo magnético externo, como o campo proveniente de um ímã permanente, o torque será sempre nulo quando um vetor normal à área de seção transversal do primeiro for paralelo à direção de polarização do segundo.

O cálculo da força, escrito em função do momento dipolo magnético e de um campo

magnético $\vec{B}$ é, segundo Cohen, Lide e Trigg (2003):

$$\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{m} \cdot \vec{B}) \quad (3.3)$$

Também de forma qualitativa, analogamente ao pensamento anterior, é possível perceber que não haverá força quando os vetores momento dipolo magnético e campo magnético forem perpendiculares.

Outro cálculo relevante para as análises deste trabalho é o cálculo da tensão elétrica que é induzida no enrolamento. Esta equação pode ser dada por:

$$\epsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.4)$$

onde ϕ é conhecido como fluxo magnético, dado em função do campo magnético $\vec{B}$, da área da seção transversal S e o versor normal à esta área $\hat{\eta}$:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot \hat{\eta} dS \quad (3.5)$$

As equações 3.4 e 3.5 também trazem algumas informações importantes, a começar pelo sinal negativo na equação 3.4 dado pela Lei de Lenz (NUSSENZVEIG, 2007), que afirma que o sentido da corrente elétrica induzida é aquele que tende a se opor à variação do fluxo. De forma mais geral, há uma harmonia entre esta lei e o princípio de conservação de energia, citado no capítulo 2, a qual permite intuir a atenuação ou eliminação da vibração através da conversão de energia vibratória em outro tipo de energia (no caso, energia elétrica).

Retomando o pensamento qualitativo, as equações deste capítulo, de forma conjunta, mostram que se não há indução de corrente elétrica, não há geração de força ou torque.

É importante citar que só há passagem de corrente elétrica e, consequentemente, geração de força ou torque em um circuito fechado. A ausência de corrente elétrica leva à ausência de seu campo magnético, essencial para a interação com outro campo para a geração de força ou torque. Outra observação é que, para manter o balanço de energia, no caso de não haver geração de corrente elétrica, a energia cinética deve permanecer inalterada. Isto significa que não há “compensação”, para que não se viole o princípio de conservação de energia, por meio de força e torque contrários.

Pelas equações 3.4 e 3.5, também se justificam os fatores de influência citados no

capítulo 2. O produto escalar da segunda equação cria uma relação entre a amplitude de tensão elétrica induzida e o ângulo entre a área da seção transversal do enrolamento e o sentido do vetor de campo magnético do ímã. A derivada no tempo, da primeira equação, mostra que é necessária uma variação do fluxo magnético no tempo para haver indução.

Por outro lado, o cálculo de um campo magnético de um ímã permanente não é trivial. A equação do componente axial do campo magnético de um ímã permanente cilíndrico, por exemplo, pode ser encontrada em Ravaud, Lemarquand e Lemarquand (2011):

$$B_z(r, z) = \frac{J}{2\pi} C_b \quad (3.6)$$

$$C_b = \sum_{i=1}^2 (-1)^i \epsilon_{4,i} (cr - br_1) (\Pi[\epsilon_{1,i}, \epsilon_{3,i}, \epsilon_{2,i}] + \Pi[\epsilon_{1,i}, \epsilon_{2,i}]) + (br_1 - a_i r) (F[\epsilon_{3,i}, \epsilon_{2,i}] + K[\epsilon_{2,i}]) \quad (3.7)$$

onde F , K e Π são, respectivamente, integrais elípticas de primeira forma (incompleta e completa) e de terceira forma e J é a polarização do ímã permanente. Os demais parâmetros da equação 3.7 se encontram na tabela 3.1, onde r e z são as posições no espaço, em coordenadas cilíndricas de origem no centro da base inferior do ímã permanente, r_1 é o raio do ímã e H o comprimento do ímã.

Tabela 3.1: Demais parâmetros da equação 3.7.

$\mathbf{Z}_0$	0	$\epsilon_{1,i}$	$\frac{a_i - c}{a_i + b}$
$\mathbf{Z}_1$	H	$\epsilon_{2,i}$	$\frac{a_i - b}{a_i + b}$
$\mathbf{a}_i$	$r^2 + r_1^2 + (z - Z_i)$	$\epsilon_{3,i}$	$\arcsin\left[\frac{a_i + b}{a_i - b}\right]$
$\mathbf{b}$	$2r_1 r$	$\epsilon_{4,i}$	$\frac{2r_1(z - Z_i)}{b(a_i - c)\sqrt{-a_i - b}}$
$\mathbf{c}$	$r^2 + r_1^2$		

Para um ímã anelar, as equações são ainda mais complexas. Assim, utilizou-se um aplicativo de elementos finitos para calcular o campo magnético de um ímã anelar (Ansoft Maxwell 3D v14.0), o qual se utiliza das equações de Maxwell para a resolução de problemas transientes, em até três dimensões:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (3.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma(\vec{E}) \quad (3.10)$$

A ideia por trás deste aplicativo é a divisão de um problema muito complexo, composto por equações diferenciais e não linearidades, em diversos problemas menores que podem ser resolvidos entre si. Esta divisão se refere a uma criação e refinamento de elementos menores, geralmente triangulares ou tetraédricos, como ilustrados nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3.

Figura 3.1: Exemplo de sistema a ser analisado.

Figura 3.2: Malha de elementos finitos tridimensional.

Figura 3.3: Refinamento de malha de elementos finitos.

Quanto maior o refinamento de malha, maior o grau de precisão obtido. No entanto, quando maior é o número de elementos, maior é o custo computacional e maior é o tempo de processamento.

As simulações numéricas deste trabalho, apresentadas nos capítulos seguintes, foram efetuadas em um computador com processador Intel Core^{TM} i7 2670QM, 6GB de memória RAM e disco rígido de 750GB a 5400 rpm, utilizando sistema operacional Windows® 7 64 bits. Nestas condições, algumas simulações chegaram a levar 40 horas, com o computador sendo usado a 100% de sua capacidade para esta finalidade. Os detalhes das simulações estão descritos no capítulo 4.

4 *Configuração do Sistema de Conversão de Energia*

O objetivo deste trabalho é a eliminação ou atenuação das vibrações de sistemas rotativos. Assim, o dispositivo de conversão de energia não pode utilizar a energia proveniente do torque do sistema, mas deve atuar exclusivamente sobre a energia vibratória lateral do rotor, ou seja, deve unicamente gerar força reativa radial contrária apenas ao movimento de vibração (em outras palavras, a geração de torque reativo deve ser nula ou, na pior das hipóteses, minimizada).

De maneira geral, pode-se classificar um rotor com movimento puro de rotação como um sistema balanceado (ou centralizado). No caso do sistema rotativo apresentar vibração pode-se considerar o movimento como uma composição de rotação e translação e desta forma classificá-lo como um sistema desbalanceado (ou descentralizado). Assim, como os movimentos de um rotor em vibração podem ser tratados como uma composição de movimentos, exige-se uma configuração do sistema de conversão de energia que, em estado balanceado, não produza resultados e, desbalanceado, produza energia e força contrária ao movimento.

Este dispositivo pode ser criado de forma simples pela utilização de ímãs permanentes e bobinas de fio de cobre. Para facilitar a montagem, decidiu-se por manter o ímã fixo ao eixo, fazendo parte do rotor e o enrolamento anexo ao estator, tal como em geradores convencionais (porém com funcionamento distinto).

Existem duas configurações possíveis para ímãs cilíndricos ou anelares, relacionadas às direções principais de polarização de seu campo magnético: radial e axial. A figura 4.1 exibe alguns vetores do campo magnético $\vec{B}$, representados por flechas, de um ímã cilíndrico com polarização radial em rotação desbalanceada a 1200 rpm. Ao se fixar um ponto arbitrário no espaço fora do ímã, verifica-se que o campo neste ponto ao longo do tempo varia tanto sua direção quanto sua magnitude.

Figura 4.1: Campo magnético em ímã com polarização radial girando com velocidade de 1200 rpm e excentricidade de 0.5 mm.

A figura 4.2, exibe os mesmos vetores, porém para ímã cilíndrico com polarização axial. Por estarem perpendiculares à folha, os vetores são vistos como pontos. Do mesmo modo, ao se fixar um ponto arbitrário, verifica-se que, diferentemente do resultado visto na figura 4.1, ao longo do tempo, apenas a magnitude do campo neste ponto é alterada. Estas informações são usadas nas análises realizadas para cada possibilidade de configuração do dispositivo de conversão energética em estudo.

Figura 4.2: Campo magnético em ímã com polarização axial girando com velocidade de 1200 rpm e excentricidade de 0.5 mm.

São quatro as configurações de enrolamento possíveis para o caso em estudo: circundante ao eixo e paralelos aos três eixos principais. A tabela 4.1 ilustra e identifica estas as possibilidades.

Tabela 4.1: Diferentes configurações do sistema de conversão de energia a ser aplicado no sistema rotativo.

			Polarização	
			A (axial)	B (radial)
Posição do enrolamento	1		A1	B1
	2		A2	B2
	3		A3	B3
	4		A4	B4

De forma a se analisar comparativamente as diferentes possibilidades de configuração do dispositivo, uma análise qualitativa das equações apresentadas no capítulo 3 será feita, corroborada com simulações numéricas em modelo de elementos finitos. A primeira sequência de simulações, voltada para a definição da melhor configuração que atenda os requisitos descritos no início deste capítulo, devido à complexidade geométrica, foi executada em três dimensões, considerando os objetos: um ímã anelar de neodímio-ferro-boro (simplificado como ímã cilíndrico de diâmetro 40 mm e comprimento 5 mm, com campo magnético de 0,6 T em sua superfície) e um enrolamento de cobre esmaltado, de 1200 espiras com fios de diâmetro 0,202 mm (AWG 32), montado a uma distância nominal do ímã de 2 mm. Também foram necessários objetos específicos do aplicativo de elementos finitos, denominadas região de trabalho e região de movimento, que, respectivamente, têm como objetivos o cálculo do campo magnético no espaço e a configuração do movimento de rotação. Neste caso, a região de trabalho é prismática de base quadrangular e abrange todo o conjunto, sendo 100% maior para cada lado. A região de movimento é uma

região cilíndrica segmentada em 48 faces e que possui um diâmetro 4 mm maior do que o diâmetro externo do ímã e comprimento 4 mm maior em comparação ao comprimento do eixo.

Nas análises, o enrolamento foi modelado como uma carga indutiva e resistiva, em circuito fechado (figura 4.3), cujo parâmetro de resistência elétrica $\bar{R}$ é calculada como:

$$\bar{R} = 2\pi\varrho Nr_0 + \pi\varrho\delta NN_c \quad (4.1)$$

onde r_0 é o raio médio do enrolamento, ϱ é a resistência do fio por unidade de comprimento ($0,538 \Omega/\text{m}$), δ é o diâmetro do fio ($0,202 \text{ mm}$), N_c é o número de camadas (10 camadas) e N é o número de espiras (1250). A indutância é calculada automaticamente pelo aplicativo de elementos finitos.

Figura 4.3: Modelo do enrolamento utilizado nas simulações numéricas.

Em relação ao movimento, a velocidade angular escolhida para as simulações foi 1200 rpm ou 20 Hz, próxima à da velocidade crítica real do eixo da bancada de ensaios (em torno de 17 Hz, valor confirmado posteriormente no capítulo 6). A esta velocidade, uma volta é completada em 50 ms. A amplitude escolhida de vibração (ou desbalanceamento) foi de 1 mm pico-a-pico, ou seja, analisou-se o sistema com excentricidade nula e com excentricidade de 0,5 mm. Verificou-se, posteriormente, que a amplitude de vibração alcançada na bancada de testes é de 1,1 mm.

4.1 Análise Qualitativa e Estudo das Configurações pelo Método dos Elementos Finitos

A primeira configuração, A1 (tabela 4.1), é o sistema que se possui um ímã com polarização axial (como indicado pela seta azul) e uma bobina circundante, conforme figura 4.4.

Figura 4.4: Configuração A1 do dispositivo (solução numérica tridimensional).

Os vetores $\vec{B}$ e $\hat{\eta}$, que correspondem, respectivamente, ao campo magnético B do ímã e à normal à área do enrolamento, são paralelos. Pela equação 3.2, verifica-se que não haverá torque reativo. No entanto, devido à simetria do enrolamento, o campo magnético visto por ele será sempre o mesmo. Logo, não haverá variação do fluxo magnético no tempo, não importando a amplitude de vibração. Pela equação 3.4, também não haverá tensão elétrica induzida. Assim, pelo princípio de conservação de energia, também não haverá forças em nenhum dos casos de rotação (balanceado ou desbalanceado). As simulações confirmam esta análise (figura 4.5).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.5: Resultado das simulações para o modelo A1.

A configuração A2 (tabela 4.1) é tal que o ímã possui polarização axial e a bobina também é circundante, porém toroidal, conforme mostrado na figura 4.6. Os vetores $\vec{B}$ e $\hat{\eta}$ são sempre ortogonais. Assim, as equações 3.5 e 3.4, juntamente com o princípio de conservação de energia, mostram que não haverá tensão elétrica induzida, força ou torque, em nenhum dos casos de rotação (balanceado ou desbalanceado). Esta análise também é confirmada pelas simulações (figura 4.7).

Figura 4.6: Configuração A2 do dispositivo (solução numérica tridimensional).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.7: Resultado das simulações para o modelo A2.

A configuração A3 (tabela 4.1) possui um ímã polarizado axialmente e uma bobina perpendicular ao eixo, conforme mostrado na figura 4.8. Assim como na configuração A2, os vetores $\vec{B}$ e $\hat{\eta}$ são sempre ortogonais, logo não haverá tensão elétrica induzida, força ou torque, em nenhum dos casos de rotação (balanceado ou desbalanceado). Esta análise também é confirmada pelas simulações numéricas (figura 4.9).

Figura 4.8: Configuração A3 do dispositivo (solução numérica tridimensional).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.9: Resultado das simulações para o modelo A3.

A configuração A4 (tabela 4.1) é composta por um ímã com polarização axial e uma bobina paralela ao eixo, conforme mostrado na figura 4.10. Segundo a equação 3.2, como os vetores $\vec{B}$ e $\hat{\eta}$ são sempre paralelos, não haverá torque. Quando o sistema está em rotação sem apresentar vibração, verifica-se que o campo magnético do ímã não se altera em qualquer ponto o enrolamento. Isso mostra que não há variação de $\vec{B}$ ao longo do tempo. Assim, não há tensão elétrica induzida (equação 3.4). Pelo princípio de conservação de energia, também não haverá força.

Figura 4.10: Configuração A4 do dispositivo (solução numérica tridimensional).

No entanto, para o caso de rotação desbalanceada (apresentando vibração lateral), há variação do campo magnético ao longo do tempo, como mostrado na figura 4.2. Logo, quando há esta variação do campo magnético no enrolamento, há tensão elétrica induzida. Pelo princípio da conservação de energia, como não há torque (devido aos vetores $\vec{B}$ e $\hat{\eta}$ serem paralelos), deverá haver força. A Lei de Lenz afirma que esta força deve ser contrária ao movimento, diminuindo a vibração lateral e atingindo o objetivo deste trabalho. Esta análise é confirmada pelas simulações numéricas (figura 4.11).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.11: Resultado das simulações para o modelo A4.

Semelhante ao modelo A1, o modelo B1 (tabela 4.1) se diferencia apenas por possuir polarização do ímã no sentido radial. Assim, como no caso do modelo A1, não há variação temporal do fluxo magnético no enrolamento. Consequentemente não há tensão elétrica induzida, torque ou força, o que é confirmado pelas simulações (figura 4.12).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.12: Resultado das simulações para o modelo B1.

A mesma análise pode ser aplicada para a configuração B2 (tabela 4.1), cujas equações também indicam tensão elétrica, torque e forças nulas, confirmado pelas simulações (figura 4.13).

Figura 4.13: Resultado das simulações para o modelo B2.

A configuração B3 (tabela 4.1) representa o mesmo conceito de um gerador elétrico convencional. Com a mesma análise feita anteriormente pelas equações 3.2 e 3.4, tem-se que os vetores $\vec{B}$ do ímã permanente e $\vec{m}$ do solenoide ora estão perpendiculares entre si, ora paralelos. Com isso, é gerado um torque reativo, também oscilante. Nesta configuração, há uma grande variação do fluxo magnético no tempo, devido à inversão de sentido do campo magnético do ímã permanente. Isto é refletido na tensão elétrica induzida, que atinge os maiores valores, sendo recomendado para o uso como geradores de energia elétrica. Pelo estudo do campo da figura 4.1, são previstos valores ligeiramente superiores (forças e torques) do caso desbalanceado em relação ao caso sem vibração. Os resultados numéricos corroboram estas conclusões (figura 4.14).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.14: Resultado das simulações para o modelo B3 (escala modificada).

A configuração B4 (tabela 4.1) é semelhante à configuração A3, pois os vetores $\vec{B}$ e $\hat{\eta}$ são sempre ortogonais. Assim, não haverá tensão elétrica induzida e consequentemente não haverá força ou torque, algo confirmado pelas simulações numéricas (figura 4.15).

(a) Tensão elétrica induzida

(b) Torque

(c) Forças em X, Y e Z (0 mm excentr.)

(d) Forças em X, Y e Z (0,5 mm excentr.)

Figura 4.15: Resultado das simulações para o modelo B4.

Os resultados obtidos, quanto à tensão elétrica induzida, torque e força das diversas configurações foram resumidos na tabela 4.2. Como pode ser visto na tabela 4.2, o único modelo que satisfaz os requerimentos descritos no início do capítulo (tensão elétrica induzida somente quando desbalanceado, torque nulo em qualquer condição) é o modelo A4.

Tabela 4.2: Resumo qualitativo dos resultados obtidos com as diferentes configurações do sistema de conversão.

Parâmetro	Modelo							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Tensão elétrica induzida (Balanceado)	—	—	—	—	—	—	Sim	—
Tensão elétrica induzida (Desbalanceado)	—	—	—	Sim	—	—	Sim	—
Torque (Balanceado)	—	—	—	—	—	—	Sim	—
Torque (Desbalanceado)	—	—	—	—	—	—	Sim	—
Força (Balanceado)	—	—	—	—	—	—	Sim	—
Força (Desbalanceado)	—	—	—	Sim	—	—	Sim	—

Em motores, geradores e transformadores, é comum utilizar um núcleo de material ferromagnético no enrolamento, com a principal finalidade de se concentrar o fluxo magnético e, assim, obter maior aproveitamento energético. Porém, por mais que a tensão elétrica induzida aumente consideravelmente – atingindo em simulação (não apresentada aqui) um valor dez vezes maior – o uso de ferrite como núcleo do enrolamento não é adequado para a presente aplicação, pois haveria uma força de atração com o ímã, superando a força contrária ao movimento do ímã/eixo, o que causaria um efeito negativo aumentando a amplitude de vibração no rotor.

4.2 Análise da Configuração Final pelo Método dos Elementos Finitos

Como visto nos resultados compilados na tabela 4.2, o modelo A4 é único que apresenta a resposta desejada. O próximo passo foi encontrar a melhor configuração, ainda por elementos finitos, na qual não só fossem obtidas as maiores forças radiais contrárias à vibração, mas também existisse a possibilidade de fácil construção.

Para realizar esta análise aliada ao objetivo de entender o comportamento do sistema, foram simulados diversos valores para três variáveis do problema: raio interno do enrolamento, número de voltas do enrolamento e número de ímãs. A tabela 4.3 resume as faixas de valores adotados para os parâmetros.

Tabela 4.3: Valores adotados para os parâmetros de projeto do dispositivo.

Descrição	Mínimo	Máximo	Incremento
Raio interno do enrolamento (mm)	5	10	1
Número de voltas do enrolamento	250	2500	250
Número de ímãs	1	6	1

Como já citado anteriormente, um problema da simulação tridimensional é o tempo necessário para executá-la, especialmente as simulações propostas na tabela 4.3, que totalizam 360 simulações. Duas estratégias foram utilizadas para reduzir o tempo de simulação: simulação em duas dimensões e redução do espaço de tempo simulado.

Relembrando, o movimento de vibração em sistemas rotativos pode ser dividido em dois componentes: rotação e translação. Esta translação, cuja direção é radial, é gerada pelo desbalanceamento do sistema. Como já se sabe pelas simulações compiladas na tabela 4.2, um dispositivo baseado na configuração A4 não deve gerar torque reativo. Assim, a partir destas informações, conclui-se que a rotação, pelo menos para esta configuração específica, não possui efeito direto sobre a geração de força contrária, sendo, portanto, tarefa exclusiva do efeito de translação. Como é possível realizar o mesmo estudo considerando apenas o efeito de translação, a simulação computacional pode ser simplificada para um modelo bidimensional (contendo apenas o ímã e o enrolamento), obtendo ganhos em tempo e desempenho consideráveis.

Outra estratégia é a redução do tempo de simulação. A partir da figura 4.11, percebe-se que a força atinge sua amplitude máxima, em termos absolutos, ao completar o primeiro quarto de tempo, isto é, em 12,5 ms, diminuindo seu valor até zerar em 25ms, repetindo o resultado, de forma simétrica, com sinal oposto. O valor que interessa para a comparação entre as simulações propostas é o valor máximo da amplitude da força radial, a qual pode ser obtida em 12,5 ms, reduzindo o tempo necessário das simulações em 75%.

Como pode ser visto nas figuras 4.16 e 4.17, o resultado das 360 simulações propostas na tabela 4.3 permite concluir que a força radial é maior quando o número de ímãs está entre 3 e 5, sendo o raio do enrolamento entre 7 e 10 mm e o número de voltas do enrolamento entre 500 e 1000. Este número de voltas resultaria em um comprimento final do enrolamento de 15 mm, uma vez que o enrolamento está sendo considerado com 10 camadas de fio AWG 32 de 0,2 mm de diâmetro. Tal comprimento representa um problema prático de construção do protótipo porque o enrolamento seria mais curto do que o conjunto de ímãs utilizado. Para não ter este problema, fixou-se um enrolamento com comprimento de no mínimo 25 mm, ou seja, 1250 voltas, o que representou, nas

simulações, uma perda de apenas 10% na força radial.

Assim, definiu-se a configuração do dispositivo de conversão energética a ser construído, da forma:

- Raio do enrolamento: 10mm;
- Comprimento do enrolamento: 25mm (1250 voltas);
- Número de ímãs: 4.

(a) Raio do enrolamento = 5 mm

(b) Raio do enrolamento = 6 mm

(c) Raio do enrolamento = 7 mm

(d) Raio do enrolamento = 8 mm

(e) Raio do enrolamento = 9 mm

(f) Raio do enrolamento = 10 mm

Figura 4.16: Força radial resultante no enrolamento para diferentes quantidades de ímãs e número de espiras, com raio de enrolamento constante.

(a) Número de voltas = 500

(b) Número de voltas = 1000

(c) Número de voltas = 1500

(d) Número de voltas = 2000

(e) Número de voltas = 2500

Figura 4.17: Força radial resultante no enrolamento para diferentes quantidades de ímãs e raio do enrolamento, com número de espiras constante.

5 *Bancada de Testes*

Para a avaliação experimental do dispositivo de conversão de energia, utilizou-se a bancada de testes disponível no Laboratório de Dinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP (figura 5.1). Esta bancada é composta por um eixo de aço de 20 mm de diâmetro suportado por mancais de rolamento autocompensadores. O eixo é acionado por um motor elétrico de 0,5 cv, cuja velocidade de rotação é controlada por um inversor de frequências. O torque transmitido ao eixo é medido por um transdutor de torque montado entre o motor elétrico e o eixo. Discos de aço de 200 mm de diâmetro e 12 mm de espessura são montados no eixo de forma a se compor o sistema rotativo. A deflexão do eixo devido ao desbalanceamento é medida através de sensores de proximidade indutivos montados nas direções ortogonais (horizontal e vertical) próximo aos discos (figura 5.2).

Figura 5.1: Visão geral da bancada de testes.

Figura 5.2: Detalhe da montagem dos sensores de proximidade indutivos.

O protótipo foi dividido em três conjuntos (figura 5.3):

1. Suportes primário e secundário (parte fixa);
2. Conjunto do enrolamento (parte fixa);
3. Conjunto de ímãs (parte móvel).

Os suportes do dispositivo foram construídos em acrílico e divididos em duas partes para possibilitar uma montagem da parte fixa sem a necessidade de remoção do eixo. A parte primária (ou superior) é fixada na base da bancada de ensaios por cantoneiras de alumínio e comportam até cinco bobinas. A parte secundária (ou inferior) comporta até três bobinas e é inicialmente fixada à primária por interferência e posteriormente por meio de dois conjuntos de longos parafusos, porcas e contraporcas (figura 5.4).

Figura 5.3: Divisões do protótipo.

Figura 5.4: Suportes primário e secundário.

O conjunto do ímã é composto por quatro ímãs de neodímio-ferro-boro, com diâmetro externo de 40 mm, diâmetro interno de 26 mm e espessura de 5 mm, separados por anéis de poliacetal de 3 mm de espessura cada, montados sobre uma bucha de bronze e presilhas de fixação de alumínio (figura 5.5). Os pequenos separadores entre os ímãs permite uma maior facilidade de montagem sem perder as características originais do campo magnético.

A bucha e a presilha são necessárias porque o diâmetro interno dos ímãs é maior do que o diâmetro do eixo. Foram escolhidos os materiais bronze e alumínio pela fácil usinabilidade e por serem materiais não-ferromagnéticos (caso contrário, os resultados poderiam ser afetados).

Figura 5.5: Conjunto do ímã e visão explodida.

Por fim, o conjunto do enrolamento é composto por um carretel de poliacetal (figura 5.6) e fio de cobre esmaltado AWG 30, enrolado com 400 voltas no carretel de 9 mm de diâmetro e montados afastados 2 mm do ímã (da última camada de enrolamento à face externa do ímã), com os terminais inicialmente desconectados (“em aberto”). Devido à disponibilidade comercial de material, o diâmetro do fio utilizado (AWG 30) foi maior que o simulado numericamente no capítulo anterior (AWG 32). Por esta razão e pelo enrolamento das bobinas ter sido feito manualmente, o número de espiras diminuiu de 1200 para 400. Esta diminuição tem um efeito significativo, pois, segundo as equações do capítulo 3, a força é mais afetada pela variação do número de espiras do que pela variação de resistência elétrica. Portanto, é de se esperar que a força resultante no sistema seja inferior à aquela observada nas simulações numéricas do capítulo 4.

Figura 5.6: Conjunto de bobinas.

A montagem do dispositivo na bancada de testes (figuras 5.7 e 5.8), acrescentados de um sistema de aquisição (computador e placa de aquisição), possibilitaram os ensaios experimentais descritos no Capítulo 6.

Figura 5.7: Dispositivo montado sem os enrolamentos.

Figura 5.8: Dispositivo montado com os enrolamentos.

6 *Resultados Experimentais*

6.1 Procedimento Experimental

O procedimento experimental adotado seguiu os passos abaixo:

1. Determinação dos parâmetros a serem medidos.

Foram determinados que os parâmetros de medição são: tempo, deslocamento horizontal do eixo, deslocamento vertical do eixo, torque e tensão elétrica induzida. As frequências de rotação do rotor nas quais os parâmetros foram medidos foram fixadas em: 10, 10,5, 11, 11,5, 12, 12,5, 13, 13,5, 14, 14,5 15, 15,5, 16, 16,5, 17, 17,1, 17,2, 17,3, 17,35, 17,4, 17,5, 17,625, 17,75, 17,875, 18, 18,25, 18,5, 18,75, 19, 19,5, 20, 20,5 e 21 Hz. Em cada frequência de rotação do rotor, foram coletados os dados pelo sistema de aquisição a uma taxa de 1 kHz durante um período de três segundos.

2. Determinação do valor de referência.

Também denominado “zero” ou “nível DC”, é importante para se ter uma referência dos sinais de medição, coletando-se os valores adequados e diminuindo o erro das medições. Um valor de nível DC nos sinais de medição pode estar associado a diversos fatores, dentre eles mau aterramento e interferências eletromagnéticas no sistema de aquisição e/ou nos sensores.

3. Testes do dispositivo sem carga (em vazio).

O teste com o dispositivo sem carga ou em vazio é o experimento em que apenas o componente móvel do dispositivo é montado (conjunto dos ímãs). Este teste é utilizado para verificar a funcionalidade do transdutor de torque e dos sensores indutivos que medem os deslocamentos horizontais e verticais. O teste é também utilizado para se determinar o comportamento do sistema rotativo sem a atuação do dispositivo de conversão de energia.

4. Testes do dispositivo com carga.

Os testes do dispositivo com carga é aquele em que todo o sistema é montado, incluindo os enrolamentos. Este teste é utilizado para verificar a funcionalidade do dispositivo e determinar o novo comportamento do sistema. As cargas utilizadas nestes testes são puramente resistivas, vindas da resistência do próprio enrolamento (circuito fechado). Os testes do dispositivo com carga foram efetuados em três associações elétricas: enrolamentos ligados em série; enrolamentos ligados em paralelo e enrolamentos ligados de forma independente.

6.2 Testes do Dispositivo sem Carga

Quando se gera o gráfico do deslocamento horizontal pelo deslocamento vertical do eixo (movimentos laterais) tem-se o formato da órbita que o eixo exibe durante seu movimento de rotação. Caso o eixo não apresentasse vibrações, este gráfico seria um conjunto de pontos agrupados em torno da origem. Caso apresentasse vibrações de mesma intensidade em ambas as direções, as órbitas seriam círculos perfeitos. Porém, órbitas elípticas foram detectadas, como mostradas na figura 6.1, as quais revelam características anisotrópicas da bancada de ensaios: o sistema possui rigidez diferente nas direções horizontal e vertical. A evidência disto é dada pela mudança de orientação da órbita ao passar pela ressonância, indicando a presença de duas frequências críticas bastante próximas entre si, que podem ser observadas na figura 6.2. Como se pode observar na figura 6.2, existe um pico de máxima amplitude na velocidade crítica do sistema na direção horizontal na frequência de 17,1 Hz, enquanto na direção vertical a frequência de ressonância ocorre em 17,35 Hz.

Uma função de resposta ao desbalanço costuma ter amplitude zero em frequência zero. Como se observa na figura 6.2, isto não parece ocorrer apesar da figura também representar uma função de resposta ao desbalanço. Isto pode ser explicado pela presença de uma deformação plástica residual do eixo (empenamento). Com isto, em baixas velocidades de rotação, o efeito do desbalanço é menor do que o efeito do empenamento em termos de amplitude, e o que se mede efetivamente é o empenamento ao invés da resposta ao desbalanço. No outro extremo da função de resposta ao desbalanço, em velocidades de rotação além da velocidade crítica, ocorre a chamada autocentragem: o centro de rotação do sistema tende a ser o centro de massa. Como o centro de massa não está localizado no centro geométrico do eixo, devido a heterogeneidades de material e geométricas, o centro de massa apresenta uma excentricidade em relação ao centro geométrico, e esta

excentricidade é o valor medido em altas velocidades de rotação (além da ressonância). No presente caso, os valores observados estão em torno de $10\ \mu\text{m}$.

Figura 6.1: Órbitas do eixo para diferentes frequências de rotação do eixo.

Figura 6.2: Máxima amplitude de vibração nas direções vertical e horizontal.

6.3 Testes do Dispositivo com Carga

Foram realizados testes em três associações elétricas distintas (figura 6.3): em série, em paralelo e de forma independente.

Figura 6.3: Associações elétricas adotadas nos testes experimentais.

Os resultados dos testes do dispositivo com carga e sem carga foram comparados através da média dos máximos de cada período contido em três segundos de medição 6.4.

A comparação é feita em relação aos resultados obtidos na direção horizontal, na direção vertical e em relação ao eixo maior das órbitas (máxima distância da órbita ao centro de rotação). Esta distância é calculada pela expressão:

$$d_{max} = \max \left(\sqrt{x^2 + y^2} \right) \quad (6.1)$$

Figura 6.4: Exemplo ilustrativo da média dos máximos.

A figura 6.5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para a associação elétrica independente. Como se pode observar, houve uma redução da amplitude de vibração na região dos picos de máxima amplitude na velocidade crítica do sistema na direção horizontal e também na direção vertical. Como consequência, a máxima distância da órbita ao centro de rotação (figura 6.5(c)) apresentou uma redução de 6,8% na região da ressonância com o uso do dispositivo em relação ao sistema em vazio.

O uso do dispositivo com a associação elétrica em paralelo (figura 6.6) apresentou resultados piores de redução da amplitude de vibração em relação ao caso de associação elétrica independente. Observa-se que a redução da amplitude de vibração na região dos picos de máxima amplitude na velocidade crítica do sistema, tanto na direção horizontal quanto na direção vertical, foi menor do que no caso da associação elétrica independente. Com isto, a máxima distância da órbita ao centro de rotação apresentou uma redução de apenas 1,8% em relação ao sistema em vazio.

A associação elétrica em série apresentou resultados intermediários aos obtidos com as associações independente e em paralelo. Como se pode observar na figura 6.7, também houve redução da amplitude de vibração na região dos picos de máxima amplitude na velocidade crítica do sistema, levando o sistema a apresentar uma redução da máxima distância da órbita ao centro de rotação de 2,5% em relação ao sistema em vazio.

Figura 6.5: Comparação entre as amplitudes de vibração do eixo obtidas com a associação elétrica independente e o sistema em vazio.

Assim, analisando os resultados experimentais obtidos, o dispositivo com a associação elétrica independente foi o que apresentou os melhores resultados em termos de dissipação da energia vibratória do eixo. Esta dissipação ocorreu preponderantemente nas faixas de frequência correspondentes às velocidades críticas do sistema, que são as regiões onde o eixo apresenta maior amplitude de vibração.

Outro requisito do trabalho era que o sistema apresentasse um torque nulo ou muito baixo. A princípio, foi medido o torque do sistema em vazio, o qual apresentou um torque médio de 0,077 Nm (figura 6.8). Os ensaios com as três associações elétricas do dispositivo resultaram em torques inferiores a 0,2 Nm. A associação elétrica independente apresentou valores de torque muito próximos daqueles obtidos com o sistema em vazio, atendendo, portanto, de maneira satisfatória este requisito de projeto do sistema. O dispositivo com a associação elétrica em série apresentou um torque médio de 0,137 Nm, representando um aumento de 0,040 Nm em relação ao sistema em vazio. Além disso,

Figura 6.6: Comparação entre as amplitudes de vibração do eixo obtidas com a associação elétrica em paralelo e o sistema em vazio.

observa-se uma pequena taxa de variação (positiva) do torque em relação à velocidade de rotação. O dispositivo com a associação elétrica em paralelo apresentou uma significativa taxa de variação (positiva) do torque em relação à velocidade de rotação, sendo estes os resultados com o maior valor de torque de acionamento medido dentre os três casos estudados.

Um torque de acionamento adicional já era esperado devido à não homogeneidade do campo magnético dos ímãs permanentes, à não homogeneidade dos enrolamentos e aos efeitos de borda. Mesmo assim, os resultados obtidos com a associação elétrica independente mostram que o aumento no torque de acionamento não é significativo, reiterando ser esta a melhor escolha dentre os casos estudados.

Os resultados obtidos de tensão elétrica induzida nos enrolamentos são mostrados na figura 6.9. Como se pode observar, os testes do dispositivo com carga apresentaram um resultado de tensão elétrica induzida crescente com a frequência. A associação elétrica em

Figura 6.7: Comparação entre as amplitudes de vibração do eixo obtidas com a associação elétrica em série e o sistema em vazio.

Figura 6.8: Comparação entre os torques de acionamento do eixo obtidos experimentalmente com as diferentes associações elétricas e o sistema em vazio.

série apresentou os maiores resultados de tensão elétrica induzida (máximo de aproximadamente 90 mVac), o que já era esperado, pois nesta associação elétrica cada enrolamento funciona como uma fonte de tensão elétrica e a associação em série é um somatório destas fontes. A associação elétrica em paralelo apresentou resultados de tensão elétrica induzida de menor valor em relação à associação elétrica em série, porém apresentando uma taxa de variação maior com a velocidade de rotação. Já a associação elétrica independente apresentou os menores valores de tensão elétrica induzida, com uma taxa de variação em relação à velocidade de rotação próxima da obtida com a associação elétrica em paralelo. Entretanto, é importante lembrar que a medição da associação elétrica independente foi feita em apenas um dos enrolamentos e que o sistema é composto por oito enrolamentos induzindo, teoricamente, igual tensão elétrica. Em resumo, na associação elétrica independente tem-se oito fontes de tensão de equivalentes.

Figura 6.9: Comparação entre as tensões elétricas induzidas nos enrolamentos obtidas experimentalmente com as diferentes associações elétricas e o sistema em vazio.

É importante considerar que nas associações em série e em paralelo há um efeito direto de um enrolamento sobre o outro, pois estão interligados eletricamente. Outros fatores que podem ter influenciado os resultados obtidos nos ensaios experimentais com o dispositivo:

- Bancada de ensaio: desalinhamentos, interferências eletromagnéticas e mecânicas (por exemplo, atrito nos mancais de rolamento), heterogeneidade e anisotropia de seus componentes;
- Conjunto dos ímãs: não homogeneidade de material e do campo magnético, efeito de borda e magnetização do eixo, que não foi levada em consideração durante as simulações;

- Conjunto de bobinas: heterogeneidade e variação na resistência elétrica entre bobinas.

Em resumo, a análise dos dados revela que o dispositivo que melhor atendeu os requisitos de projeto é aquele com associação elétrica independente. Esta associação foi a que resultou em maior redução das amplitudes de vibração na região de ressonância ($-6,8\%$) e também aquela que introduziu menor torque de acionamento ao sistema em relação à condição de operação em vazio. Todas as associações testadas atenderam os requisitos de baixo torque reativo (valores abaixo de $0,12$ Nm adicional ao torque de acionamento em vazio) e geraram energia elétrica. Adicionalmente, o conjunto também apresentou baixo custo por utilizar materiais comerciais (alumínio, polímeros e cobre) e de fácil usinagem (manufatura simples).

7 Conclusão

Este trabalho propôs um dispositivo inovador de amortecimento de vibrações laterais indesejadas em máquinas rotativas baseada em uma técnica de colheita de energia.

Primeiramente, as três principais técnicas (eletrostática, piezelétrica e eletromagnética) foram abordadas, sintetizadas e comparadas entre si, possibilitando uma análise que serviu como base para decisão da escolha daquela que melhor se adequaria para a solução do problema proposto. No caso, a técnica escolhida foi a eletromagnética, por não necessitar de contato mecânico e por possibilitar alta flexibilidade no projeto e desenvolvimento do dispositivo.

Dada a escolha da técnica de conversão (eletromagnética), o trabalho apresenta as teorias de eletromagnetismo para uma análise qualitativa, uma vez que a modelagem matemática para o problema em questão é complexa. Assim, também foi escolhido o Método dos Elementos Finitos como método adicional de análise, o qual confirmou a análise qualitativa feita em relação a torque, forças e tensão elétrica induzida. Por este método, foram analisadas oito configurações distintas para o dispositivo, baseadas na direção de polarização do ímã permanente e na posição e direção dos enrolamentos.

Dentre as configurações testadas, apenas a configuração A4 (tabela 4.1) preencheu todos os requisitos necessários (geração de força contrária à vibração a partir da conversão da energia translacional de vibração do eixo em energia elétrica, não afetando o torque de acionamento do sistema). O dispositivo foi construído e testado experimentalmente em uma bancada de testes, com uma configuração de apenas um único enrolamento e outras três configurações diferentes de acordo com o circuito elétrico adotado (independente, série e paralelo).

As três associações elétricas neste trabalho exibiram o mesmo tipo de comportamento: redução na amplitude de vibração na região de velocidades críticas e também torque reativo de baixa intensidade, o qual já era esperado, dada a configuração escolhida (A4).

O dispositivo com associação elétrica independente apresentou os melhores resultados

experimentais, pois resultou em uma redução da órbita do sistema na região de ressonância ($-6,8\%$), com mínimo torque adicional de acionamento. Neste caso, a tensão elétrica máxima induzida nos enrolamentos foi de aproximadamente 55 mVac na máxima frequência de rotação testada do sistema rotativo.

Entretanto, as demais configurações do dispositivos também podem ser utilizadas para a mesma finalidade, porém com menor efeito de dissipação vibratório. Neste caso, o sistema com enrolamentos conectados em série apresentou redução da órbita de até $2,5\%$ e o sistema com enrolamentos conectados em paralelo apresentou redução da órbita de $1,8\%$.

Em relação à tensão elétrica induzida, a melhor configuração foi aquela em que os enrolamentos foram conectados em série. Neste caso, uma tensão elétrica máxima de aproximadamente 90 mVac foi obtida na máxima frequência de rotação testada. Também foi observado nesta configuração o aumento da tensão induzida com o aumento da frequência de rotação do sistema, o que é coerente com a teoria estudada: o aumento da frequência de rotação aumenta a taxa de variação do campo magnético nos enrolamentos, o que aumenta a corrente elétrica induzida. Apesar dos resultados de tensão elétrica induzida obtidos com a associação elétrica independente serem os menores dentre todos testados, é importante ressaltar que os resultados desta associação foram obtidos em apenas um enrolamento.

Assim, este trabalho apresenta resultados promissores da aplicação do dispositivo em estudo na redução da vibração lateral de eixos. Dada a inovação do sistema proposto, foi depositado um pedido de patente junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial em 23/07/2013 sob o número BR10.2013.018837-9.

7.1 Perspectivas futuras

Para o futuro, sugere-se um estudo focado na configuração escolhida (A4), com diferentes tipos, formas e materiais de ímãs (como por exemplo, ímã anelar cônico de AlNiCo) e diferentes dimensões dos enrolamentos, incluindo superposição entre eles, de forma a se obter não só o máximo de redução da amplitude de vibração, mas de se atingir esta redução em toda a faixa de frequência. Recomenda-se a aquisição de dados em diversos pontos, com a finalidade de obter maior discretização e faixa de frequência possível.

Também são sugeridos estudos adicionais sobre o efeito da anisotropia do sistema nos resultados, comparando a mesma montagem em sistemas com órbitas circulares e elipsoi-

des, histerese na indução de tensão elétrica, percorrendo frequências de rotação em rampas crescentes e decrescentes, sobre a eficiência de conversão de energia da configuração A4 e de como utilizar as técnicas de aumento de eficiência para esta configuração. É interessante também efetuar uma série de medições para verificar se existe algum efeito de característica exclusivamente transiente, ou seja, se existe algum resultado diferente do apresentado imediatamente posterior à alteração de frequência de rotação. Neste caso, é também importante efetuar um estudo da consistência dos resultados a longo prazo, ou em longos tempos de operação do sistema.

Adicionalmente, pode-se utilizar a energia gerada, através de componentes de armazenamento e eletrônica de interface, como fonte de alimentação para processadores de baixíssima potência, como os PICs XLP (MICROCHIP, 2011).

Referências Bibliográficas

- AMIRTHARAJAH, R.; CHANDRAKASAN, A. P. Self-powered signal processing using vibration-based power generator. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 33, n. 5, p. 687 – 695, 1998.
- BEAMS, J. W.; KINSEY, E. E.; SNODDY, L. B. *Magnetically Supported Rotating Bodies. Patent US 2,691,306*. 12 out. 1954.
- BEEBY, S. P. et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 17, p. 1257 – 1265, 2007.
- BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, v. 17, p. 175 – 195, 2006.
- CAMPOS, R. O.; NICOLETTI, R. Vibration reduction in vertical axis washing machine using a rotating dynamic absorber. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 19 p., 2013.
- COHEN, E. R.; LIDE, D. R.; TRIGG, G. L. AIP Physics desk reference. In: _____. 3. ed. New York, United States: Springer-Verlag, 888 p., 2003. cap. 11.
- ELVIN, N. G.; ELVIN, A. A. An experimentally validated electromagnetic energy harvester. *Journal of Sound and Vibration*, v. 330, p. 2314 – 2324, 2011.
- GLYNNE-JONES, P.; WHITE, N. M. Self-powered systems: A review of energy sources. *Sensor Review*, v. 21, n. 2, p. 91 – 97, 2001.
- HELLER, A. *Israel focuses on alternative energy, cleaner technology*. 2011. Disponível em: <http://www.huffingtonpost.com/2011/01/04/israel-focuses-its-energy_n_804129.html>. Acesso em: 04 dez. 2011.
- HIBBELER, R. C. Kinetics of a particle: Work and energy. In: _____. *Engineering Mechanics: Dynamics*. United States: Pearson Education, 2010. cap. 14, p. 170 – 219.
- IDTECHEX. *Energy harvesting markets analysed: a USD4.4 Billion Market in 2021*. 2011. Disponível em: <<http://www.energyharvestingjournal.com>>. Acesso em: 04 ago. 2011.
- INMAN, D. J. Engineering vibration. In: _____. 2. ed. New York, United States: Prentice Hall, 2001. cap. 1, p. 322.
- KARAMI, M. A.; VAROTO, P. S.; INMAN, D. J. Experimental study of the nonlinear hybrid energy harvesting system. In: PROULX, T. (Ed.). *Modal Analysis Topics*. New York, United States: Springer-Verlag, 590 p., 2011. v. 3.

KULAH, H.; NAJAFI, K. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations. In: *Center for Wireless Integrated MicroSystems*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 237 – 240.

LEBLANC, M. *Automatic Balancer for Rotating Bodies. Patent US 1,209,730*. 26 dez. 1916.

MICROCHIP. *nanoWatt XLP eXtreme Low Power PIC® MCUs*. 2011. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39941e.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

NICOLETTI, R.; SANTOS, I. Frequency response analysis of an actively lubricated rotortilting-pad bearing system. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 127, n. 3, p. 638 – 645, 2005.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 3 - Eletromagnetismo*. 1. ed. [S.l.]: Ed. Blücher, 2007. 336 p.

O'DONNELL, T.; SAHA, C.; BEEBY, S. Scaling effects for electromagnetic vibrational power generators. *Microsystems Technologies*, v. 13, p. 1637 – 1645, 2007.

RAO, S. Controle de vibrações. In: _____. *Vibrações Mecânicas*. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. cap. 9, p. 305 – 343.

RAVAUD, R.; LEMARQUAND, G.; LEMARQUAND, V. Coils and magnets: 3d analytical models. In: *PIERS Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1178 – 1184.

RENNO, J. M.; DAQAQ, M. F.; INMAN, D. J. On the optimal energy harvesting from a vibration source. *Journal of Sound and Vibration*, v. 320, p. 386 – 405, 2009.

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

SAHA, C. et al. Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 147, p. 248 – 253, 2008.

SARI, I.; BALKAN, T.; KULAH, H. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibration based on the frequency upconversion technique. *Journal of Microelectromechanical Systems*, v. 19, n. 1, p. 14 – 26, 2010.

SATO, Y. Dynamic absorber using a hollow rotor partially filled with liquid. *JSME International Journal*, v. 33, p. 446 – 452, 1990.

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

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; WYLEN, G. J. V. Fundamentals of thermodynamics. In: _____. 6. ed. United States: John Wylen & Sons, 2003. cap. 2, p. 14 – 42.

STEPHEN, N. G. On energy harvesting from ambient vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 293, p. 409 – 425, 2005.

XING, X. et al. High power density vibration energy harvester with high permeability magnetic material. *Journal of Applied Physics*, v. 109, 3 p., 2011.

ZERVOS, H. *What Can Energy Harvesting and Wireless Sensors Do For You?* 2012. Disponível em: <<http://www.idtechex.com/EH/Webinar>>. Acesso em: 20 mar. 2012.

ZHU, D.; BEEBY, S. Kinetic energy harvesting. In: _____. *Energy Harvesting Systems – Principles, Modeling and Applications*. 1. ed. Southampton, UK: Springer, 2011. cap. 1, p. 1 – 77.

ZHU, D.; TUDOR, M. J.; BEEBY, S. P. Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review. *Measurement Science and Technology*, v. 21, 29 p., 2010.