

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise dinâmica de um modelo matemático não-linear e não-ideal de um dispositivo MagLev para a coleta de energia do meio ambiente

Autor: Hassan Costa Arbex

Orientador: Professor Titular José Manoel Balthazar

Bauru, 2016

SP, Brasil

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise dinâmica de um modelo matemático não-linear e não-ideal de um dispositivo MagLev para a coleta de energia do meio ambiente

Autor: Hassan Costa Arbex

Orientador: Professor Titular José Manoel Balthazar

Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Projetos Mecânicos

Tese de Doutorado a ser apresentada como exame geral de qualificação do Programa de PósGraduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Bauru, 2016

SP, Brasil

Arbex, Hassan Costa.

Análise dinâmica de um modelo não-linear e não-ideal de um dispositivo MagLev para coleta de energia do meio ambiente / Hassan Costa Arbex, 2016
96 f. : il.

Orientador: José Manoel Balthazar

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2016

1. Modelagem matemática. 2. Coleta de energia. 3. Dinâmica não-linear. 4. MagLev. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE HASSAN COSTA ARBEX ,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA
FACULDADE DE ENGENHARIA.**

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2016, às 15:30 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSE MANOEL BALTHAZAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica - docente voluntário / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP , Prof. Dr. ANGELO MARCELO TUSSET do(a) Departamento de Eletrônica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Prof. Dr. CLIVALDO DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal da Grande Dourados - MS, Prof. Dr. MAX MAURO DIAS SANTOS do(a) Departamento de Eletrônica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa, Prof. Dr. ATILA MADUREIRA BUENO do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de HASSAN COSTA ARBEX , intitulada **ANÁLISE DINÂMICA DE UM MODELO MATEMÁTICO NÃO-LINEAR E NÃO-IDEAL DE UM DISPOSITIVO MAGLEV PARA COLETA DE ENERGIA DO MEIO AMBIENTE**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: _____ *aprovado*. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

J N - !
Prof. Dr. JOSE MANOEL BALTHAZAR


Prof. Dr. ANGELO MARCELO TUSSET


Prof. Dr. CLIVALDO DE OLIVEIRA


Prof. Dr. MAX MAURO DIAS SANTOS


Prof. Dr. ATILA MADUREIRA BUENO

Dedicado à
Minha esposa Ana Paula
Meus pais Márcio e Maria Elena
Toda minha família
Meus grandes e inesquecíveis amigos
Meu orientador

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Professor Titular. José Manoel Balthazar por conduzir - me neste trabalho com muita sabedoria e dedicação e principalmente por sempre me incentivar a adquirir novos conhecimentos.

Aos meus grandes velhos amigos irmãos Carlos e Kleber e aos novos e não menores, Rodrigo, Itamar, Willians, Ricardo , Douglas, Fernando, que compartilharam todos os momentos desse trabalho e sempre me ajudaram a evoluir e realizar esse projeto.

A CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de doutorado. Ao Departamento de Engenharia Mecânica e a Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru por propiciarem as melhores condições para que esse trabalho fosse realizado.

Resumo

Arbex, H. A., Análise dinâmica de um modelo matemático não-linear e não-ideal de um dispositivo MagLev aplicado na coleta de energia, Bauru, Faculdade de Engenharia, UNESP – Universidade Estadual Paulista, 2016, 96 p., Tese de Doutorado.

Recentemente, o interesse e a pesquisa de coleta de energia têm aumentado substancialmente no meio técnico-científico. Com a grande demanda mundial por energia elétrica, muitos pesquisadores, no Brasil e no Mundo, têm concentrado seus esforços na busca de novas fontes de energia. No processo de coleta de energia, a energia elétrica é obtida através da conversão de energia mecânica criada por uma fonte de vibração do meio ambiente através de um transdutor. Fontes de vibração do meio ambiente podem ser causadas em estruturas através do movimento de veículos, ondas do mar e até o deslocamento de pessoas. Com isso, este trabalho tem como objetivo estudar a coleta de energia utilizando um dispositivo MagLev não-linear excitado externamente em sua base por uma fonte não ideal. A metodologia empregada para a realização das análises deste trabalho foram: utilizar o método de múltiplas escalas para buscar as melhores configurações dos parâmetros e realização de simulações numéricas utilizando o método de Runge-Kutta de quarta e quinta ordem com passo variável buscando otimizar a coleta de energia através da variação de parâmetros, diagramas de bifurcação, expoente de Lyapunov, históricos no tempo entre outros. Em geral serão feitas duas comparações entre o resultado numérico e o resultado obtido analiticamente pelo método das múltiplas escalas, bem como a melhor configuração de parâmetros para uma melhor coleta de energia.

Palavras-chave: *Modelagem matemática, Coleta de energia, Dinâmica Não-Linear, MagLev*

Abstract

Arbex, H. A., Dynamic analysis of a nonlinear mathematical model and non-ideal of an applied MagLev device in energy collection, Bauru, Engineering College, UNESP – São Paulo State University, 2016, 96 p., Ph.D. Thesis.

Recently, interest and energy harvesting research have increased substantially in the technical-scientific community. With the high global demand for electricity, many researchers in Brazil and the world, have concentrated their efforts in the search for new energy sources. Energy collection process, electrical energy is obtained by converting mechanical energy created by a vibration source of the environment through a transducer. environmental sources of vibration may be caused in structures by the movement of cars, train, sea waves, and even the movement of people. Thus, this work aims to study the collection of energy using an excited nonlinear MagLev device externally at its base by a non ideal source. The employed methodology for the carrying out the analyzes of this study were to use the method of multiple scales to find the best parameter settings and performing numerical simulations using the Runge-Kutta method of fourth and fifth order with variable step in order to optimize the collection energy by variation of parameters, bifurcation diagrams, exponent lyapunov, historical time among others. In general two comparisons are made between the numerical result and the analytical result obtained by the method of multiple scales, and the best parameter setting for improved energy harvesting.

Keywords: Mathematical modeling, Energy Harvesting, Nonlinear Dynamics, MagLev

LISTA DE FIGURAS

1.1	Dispositivo de captação de energia (Mann 2009)	7
1.2	Princípio da operação da turbina Maglev (www.oocities.org/shazuga/html/turbina-lpem-br.html)	9
2.1	Tipos de fontes de energia renováveis e não renováveis < http://energiasrenovaveis-12ct2.webnode.pt/energias-renovaveis/ >	16
2.2	Mecanismos de funcionamento da turbina eólica MagLev < http://inhabitat.com/super-powered-magnetic-wind-turbine-maglev/html >	36
3.1	Dispositivo de captação de energia.	38
3.2	Diagrama do circuito de captação de energia.	43
4.1	Comportamento do sistema (a) X_1: Deslocamento da massa magnética central, (b) Plano fase $X_1 \times X_2$, (c) mapa de Poincaré $X_1 \times X_2$	47
4.2	Bacia de atração $E = 3.07, \alpha_1 = 0.62$	48
4.3	Bacia de atração $E = 3.12, \alpha_1 = 0.594$	49
4.4	Diagrama de Bifurcação W_3 (a) resposta de X_1 para variação de W_3, (b) zoom da resposta de X_1 para variação de $2 \leq W_3 \leq 8.5$, (c) resposta de X_2 para variação de W_3, (d) zoom da resposta de X_2 para variação de $2 \leq W_3 \leq 8.5$	50

4.5	Diagrama de Bifurcação W_4 (a) resposta de X_1 para variação de W_4, (b) zoom da resposta de X_1 para variação de $8.2 \leq W_4 \leq 10.0$, (c) resposta de X_2 para variação de W_3, (d) zoom da resposta de X_2 para variação de $8.2 \leq W_4 \leq 10.0$	51
4.6	Expoente de Lyapunov (a) W_3, (b) W_4	52
4.7	Diagrama de Bifurcação e Expoente de Lyapunov (a) e (b) Coeficiente de amortecimento do sistema mecânico α_1, (c) e (d) Amplitude de excitação externa E	53
4.8	Diagrama de estabilidade bi dimensional	54
4.9	Diagrama do circuito de coleta de energia	55
4.10	Colheita de energia:Variação do nível de captação de energia variando α_1 e E	56
4.11	Colheita de energia: Variação do nível de captação de energia variando W_3 e W_4	57
4.12	Colheita de energia variando a rigidez cúbica e a resistência do shaker . . .	58
4.13	Comportamento dinâmica do sistema no ponto de máxima coleta de energia	59
4.14	Potência harvest coletada	59
5.1	Método das múltiplas escalas: a) Histórico no tempo X, b) Plano fase X, c) Histórico no tempo Q, d) Plano fase Q	68
5.2	Potência harvest coletada	69
6.1	Novo modelo obtido a partir do modelo de Mann(2009)	71
6.2	Potência harvest coletada	72

LISTA DE TABELAS

1.1	Lista de fontes de energia disponíveis que podem ser aproveitadas para a geração de eletricidade Fonte: Prys et al., 2007	4
1.2	Lista de fontes de energia disponíveis que podem ser aproveitadas para a geração de eletricidade Fonte: Adaptado Prys et al., 2007	6
3.1	Elementos análogos de sistemas mecânicos e elétricos baseados na relação força-voltagem. Medidas no Sistema Internacional de Unidades (SI)	37
4.1	Parâmetros do Sistema utilizados para as simulações numéricas.	46

SUMÁRIO

Resumo	vi
Abstract	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	7
1.2 Objetivos	11
1.3 Metodologia	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 FONTES DE ENERGIA	14
2.1.1 COLETA DE ENERGIA DO MEIO AMBIENTE “ENERGY HARVESTING”	19
2.1.2 TIPOS DE FONTES DE VIBRAÇÃO	24
2.2 LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	31
2.2.1 APLICAÇÕES DA LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	33

3	MODELAGEM MATEMÁTICA	37
3.1	Definição da força magnética (K_{mag})	41
3.2	Equações para o modelo de captação de energia	42
4	RESULTADOS NUMÉRICOS	45
4.1	Comportamento dinâmico	46
4.2	Projeto proposto para a coleta de energia	55
5	BUSCA DE UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA APROXIMADA USANDO-SE O MÉ- TODO DAS MÚLTIPLAS ESCALAS	60
5.1	Pesquisa de uma Solução Analítica pelo Método de Escalas Múltiplas	62
5.1.1	Caso ressonante	65
6	CONCLUSÕES	70

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A demanda global por energia tem aumentado sem precedentes nos últimos 150 anos, devido ao desenvolvimento industrial e ao rápido crescimento da população. A energia que usamos em nosso cotidiano vem de uma grande variedade de fontes e podem ser classificadas em duas categorias: não-renováveis e renováveis (Kong et al., 2014).

As fontes de energia não-renováveis, tem um fornecimento limitado, pois não há reposição em seu abastecimento que incluem fontes como: petróleo, gás natural, carvão e energia nuclear. Entre essas fontes não renováveis, petróleo, gás natural e carvão são chamados combustíveis fósseis, que têm sido a fonte de energia comercial primária no mundo de hoje. Já as fontes renováveis são aquelas que podem ser substituídas ou regeneradas a partir de uma fonte de procedência natural, elas incluem fontes como: hidráulica, geotérmica, solar, eólica, biomassa e das marés e das ondas do mar. (Shafiee & Topal, 2008;2009).

De acordo com Mescia et al., 2015, nas últimas duas décadas, a demanda mundial de energia aumentou 40%, através do uso de combustíveis fósseis. Haja visto que, cerca de 80% da energia

global é fornecida pelo carvão, petróleo e gás, fontes não renováveis que um dia serão esgotadas. Algumas pesquisas evidenciam que as reservas de petróleo e gás natural devem acabar por volta de 35 a 37 anos, e as de carvão em cerca de 107 anos (Shafiee & Topal, 2008;2009).

Vale destacar que a atual taxa de crescimento do consumo mundial de energia é de 2% ao ano. Se o gasto de energia mundial continuar crescendo nesse ritmo, deve dobrar em 35 anos, o que levanta preocupações sobre os recursos energéticos (Mason et al., 2007).

A pressão para substituir os combustíveis fósseis tem centrado grande atenção para as fontes de energia renováveis como, energia solar e eólica. Pois tais fontes não são poluentes e podem ser duradouras, além de oferecer uma alternativa atraente para as fontes de energia não renováveis tradicionais.

As diversas fontes de energia têm características distintas e necessitam ser colhidas por meio de tecnologias diferenciadas. De acordo com a Lei da Conservação de Energia, a energia não pode ser criada e nem destruída, ela só pode ser transformada de uma forma para outra. (Kong et al., 2014).

Por isso, ao longo da última década, avanços tecnológicos, têm promovido importantes desenvolvimentos em especial aos dispositivos eletrônicos, tais que possibilitam a grande redução no tamanho e no consumo de energia. Há uma considerável variedade de dispositivos sem fio e um aumento na demanda por sistemas eletrônicos auto alimentados os quais têm sido empregados em diferentes aplicações (Pinna et al., 2010).

Seu interesse como fonte de energia para futuras concepções de dispositivos eletrônicos tem crescido substancialmente. Os exemplos de tais sistemas podem ser: sensores sem fio, implantes biomédicos, dispositivos de monitorização, estação meteorológica remota, calculadoras, relógios, fones de ouvido e Bluetooth (Harb et al., 2011).

Essa nova tecnologia em reduzir o consumo de energia, que proporciona a popularização das tecnologias sem fio tanto para a comunicação e entretenimento quanto para aplicações industriais e ambientais de sensoriamento remoto, resultou em um aumento nas pesquisas e investimentos relacionados ao conceito “Energy Harvesting” (Colheita de Energia) viabilizando o desenvolvimento de sistemas de captação de energia numa vertente de micro escala, ou seja, dispositivos capazes de colher tipo de energia disponível no ambiente (energia solar, energia térmica, energia do vento e energia cinética, por exemplo) e converte – lá em uma quantidade de energia elétrica utilizável, que pode ser armazenada ou diretamente consumida por uma determinada carga.

A captura de energia é descrita como o processo de captura de energia do ambiente e sua conversão em eletricidade. Sem dúvida, a coleta de energia é uma técnica muito instigante para uma gama de variedade de microssistemas auto alimentados (Priya & Inman, 2009).

No processo de coleta de energia do ambiente, a energia elétrica é obtida através da conversão de energia mecânica, criada por uma fonte de vibração do ambiente através de um transdutor, por exemplo, um fino filme piezocerâmico (Iliuk, 2011).

A recuperação de energia a partir da energia desperdiçada ou não utilizada tem sido um tópico de discussão nos últimos tempos. Energia não utilizada existe em várias formas, tais como

máquinas industriais, atividade humana, veículos, estruturas e fontes de ambiente. Entre elas, algumas das fontes promissoras para a recuperação de energia são vibrações periódicas geradas por máquinas rotativas ou motores. (Prya 2007). Conforme tabela 1 onde observamos algumas das fontes de energia disponíveis que pode ser utilizadas para a geração de eletricidade.

Tabela 1.1: Lista de fontes de energia disponíveis que podem ser aproveitadas para a geração de eletricidade Fonte: Prya et al., 2007

Human body	Vehicles	Structures	Industrial	Environment
Breathing, blood pressure, exhalation, body heat.	Aircraft, UAV, helicopter, automobiles, trains.	Bridges, roads, tunnels, farm house structures.	Motors, compressors, chillers, pumps, fans.	Wind, solar, temperature gradient, daily temperature.
Walking, arm motion, finger motion, jogging, swimming, eating, talking.	Tires, Tracks, peddles, brakes, shock, absorbers, turbines.	Control-switch, HVAC systems, ducts, cleaners, etc.	Conveyors, cutting and dicing, vibrating mach.	Ocean currents, acoustic waves, EM waves, RF signal.

Fonte: Prya (2007).

Dentre as energias disponíveis para a transformação em energia elétrica, a energia mecânica é uma das energias mais onipresentes capazes de ser reutilizadas em nosso entorno. As fontes de energia mecânica pode ser uma estrutura de vibração, um objeto em movimento, e de vibração induzida pelo fluxo de ar ou água (Beeby, Tudor, & White, 2006).

A energia mecânica geralmente pode ser colhida, por meio da conversão de vibração em eletricidade. A característica mais distinta deste tipo de captação de energia, as coletas são inicialmente identificadas por gerações de baixa potência. Portanto, uma das aplicações alvo é de abastecer pequenos dispositivos eletrônicos. No entanto, o desenvolvimento recente indica que ele também pode ser usado em aplicações de grande escala. A conversão de vibração em eletricidade pode ser realizada através de quatro mecanismos básicos, incluindo eletromagnética, eletrostática, magnetorestritivo e piezoelétrico. A captação de energia por eletromagnetismo, que será nosso alvo nesse estudo, consiste na aplicação da Lei de Faraday onde a variação do

fluxo magnético dentro de uma bobina transforma a energia do movimento em energia elétrica. (Tipler & Mosca, 2009).

A necessidade em desenvolver novas tecnologias para coleta de energia tem aumentado nos últimos anos e vários trabalhos são encontrados na literatura.

Outro tema importante que deve-se mencionar é a levitação magnética, ponto crucial para o desenvolvimento do projeto em destaque. De acordo com a literatura a levitação magnética através de eletroímã, vem sendo realizada desde 1930, com o propósito de estudar o comportamento não linear deste tipo de dispositivo (Carmichael., 1986).

O método mais comum de levitação magnética é baseado na utilização de um eletroímã (Moon, 2004). Esse eletroímã é um ímã controlado por corrente elétrica, capaz de suspender um determinado objeto metálico a uma determinada altura (distância de operação) no eixo vertical, apenas com o campo magnético gerado pela corrente elétrica que circula no solenoide. Um sistema de levitação magnética simples, é conhecido pelo acrônimo MagLev (Magnetic Levitator).

Tabela 1.2: Lista de fontes de energia disponíveis que podem ser aproveitadas para a geração de eletricidade Fonte: Adaptado Prya et al., 2007

Autor	Ano	Experimento
Li <i>et al</i>	2013	Propôs um modelo experimental de amortecedor eletromagnético capaz de captar energia de vibração.
Litak <i>et al</i>	2010	Examinou as respostas regulares e caóticas de uma colhedora de energia vibracional composta por uma barra vertical com uma massa ponta. O feixe é excitado horizontalmente por uma força inercial harmônica, enquanto a energia vibracional mecânica é convertida em energia elétrica através de um material piezoelétrico. Foi observado que a energia de vibração mecânica foi continuamente convertida para a energia elétrica através do material piezoelétrico, observou também o aumento da produção de energia quando o sistema muda a dinâmica de um para mais períodos.
Marques <i>et al</i>	2014	Por meio de um dispositivo composto por uma plataforma oscilante a energia é capturada através das ondas do mar onde é transferida para um gerador eletromagnético.
Stephen	2006	A excitação de uma massa magnética passando por uma bobina gera energia limitada pela amplitude e frequência da excitação através do coeficiente de amortecimento (mecânico e elétrico). Além disso, a eficiência de transferência de energia é menor que 50% quando ocorrem perdas tanto no domínio mecânico, como no elétrico.
Triplett e cols	2009; 2001	Demostrou em seu experimento com uso de material piezoelétrico a captura a energia do ambiente por meio de um método de perturbação para obter uma coleta máxima de energia.
Mann e Sims	2009	Um dispositivo proposto por será utilizado como base para essa tese. Tal dispositivo consiste em uma massa magnética oscilando em uma bobina, causando uma variação do campo magnético dentro da bobina e consequentemente induzindo uma corrente elétrica.

Em um MagLev o sistema de controle é a parte fundamental do dispositivo, pois a levitação depende do equilíbrio entre as forças magnética e gravitacional (ARBEX et al., 2014). A levitação magnética, maglev, ou suspensão magnética é um método pelo qual um objeto é suspenso, apoiado apenas pelos campos magnéticos. A pressão magnética é usada para neutralizar os efeitos da gravidade e todas as outras acelerações (Braunbeck, 1939).

1.1 Motivação

Mediante a necessidade de obter novas fontes de energia para enfrentar a demanda mundial, estudos de novas fontes de energia, tais como o conceito de coleta de energia a partir da vibração de sistemas oscilatórios tem sido explorado. Pois, é de grande relevância para a população, que novas tecnologias para coleta de energia sejam desenvolvidas. Por essa razão, o presente estudo explora uma abordagem alternativa, considerando o potencial de captação de energia quando são consideradas as não-linearidades do sistema. Foi proposta a análise de um novo dispositivo de captação de energia que usa forças magnéticas para levantar um ímã centro oscilante. Essa análise partilhou da ideia do trabalho realizado por Mann (2009).

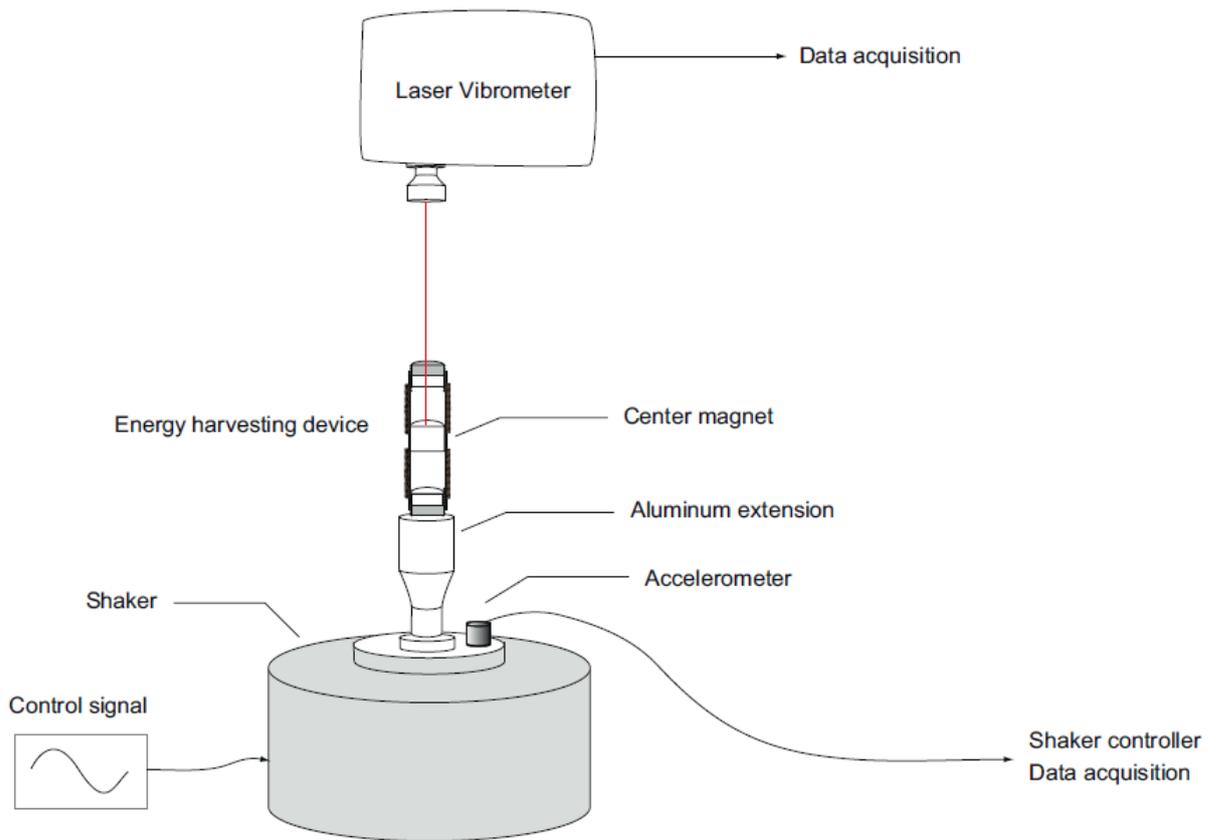


Figura 1.1: Dispositivo de captação de energia (Mann 2009)

Ainda com o intuito em desenvolver novas estratégias tecnológicas, a fim de contribuir economicamente para geração de energia, a energia renovável produzida a partir do vento tem

atraído muita atenção e apoio atualmente.

Os métodos atuais não estão sendo suficientes para acompanhar o crescente consumo. Portanto, a crise energética forçou o desenvolvimento de geração de energia por fontes renováveis, principalmente a energia eólica. Estima-se que as fontes renováveis possam contribuir em cerca de 20% - 50% para o consumo de energia até o final desse século.

Para isso, a turbina Eólica Maglev foi inaugurada pela primeira vez na exposição Wind Power Ásia em Pequim no ano de 2007. O princípio da operação deste projeto é através da levitação magnética, sendo um sistema extremamente eficiente para energia eólica. As turbinas eólicas Maglev têm várias vantagens sobre as turbinas eólicas convencionais. Por exemplo, elas são capazes de usar ventos com velocidades iniciais tão baixas quanto 1,5 metros por segundo (m / s). Além disso, elas podem operar em ventos superiores a 40 m / s. Atualmente, as maiores turbinas eólicas convencionais do mundo produzem apenas cinco megawatts de energia. No entanto, uma grande turbina eólica magnética poderia gerar um gigawatt de energia limpa, o suficiente para fornecer energia a 750 mil casas. Também aumentaria a capacidade de geração em 20% em relação às turbinas eólicas convencionais e reduziria os custos operacionais em 50%.

Além de baixo ruído e pequeno espaço, um Maglev começa a girar e produzindo energia elétrica a velocidades de vento muito baixas, devido à unidade sem atrito. O design vertical da lâmina (VAWT) permite que a turbina possa operar independentemente da direção do vento ou turbulência. Seu princípio de operação apresenta características de repulsão de ímãs permanentes, colocando estes dois ímãs em cima uns dos outros com polaridades iguais enfrentando um ao outro, a repulsão magnética será forte o suficiente para manter os dois ímãs a uma distância um do

outro. A força criada como resultado desta repulsão pode ser usada para propósitos de suspensão e é forte o suficiente para equilibrar o peso de um objeto. A turbina de Maglev é híbrida com vento combinados usando atrito com acionamento magnético de neodímio. Seus eixos verticais de tamanhos pequenos tornam possível obter a saída independentemente da direção do vento ou a velocidade, conforme figura 1.2.

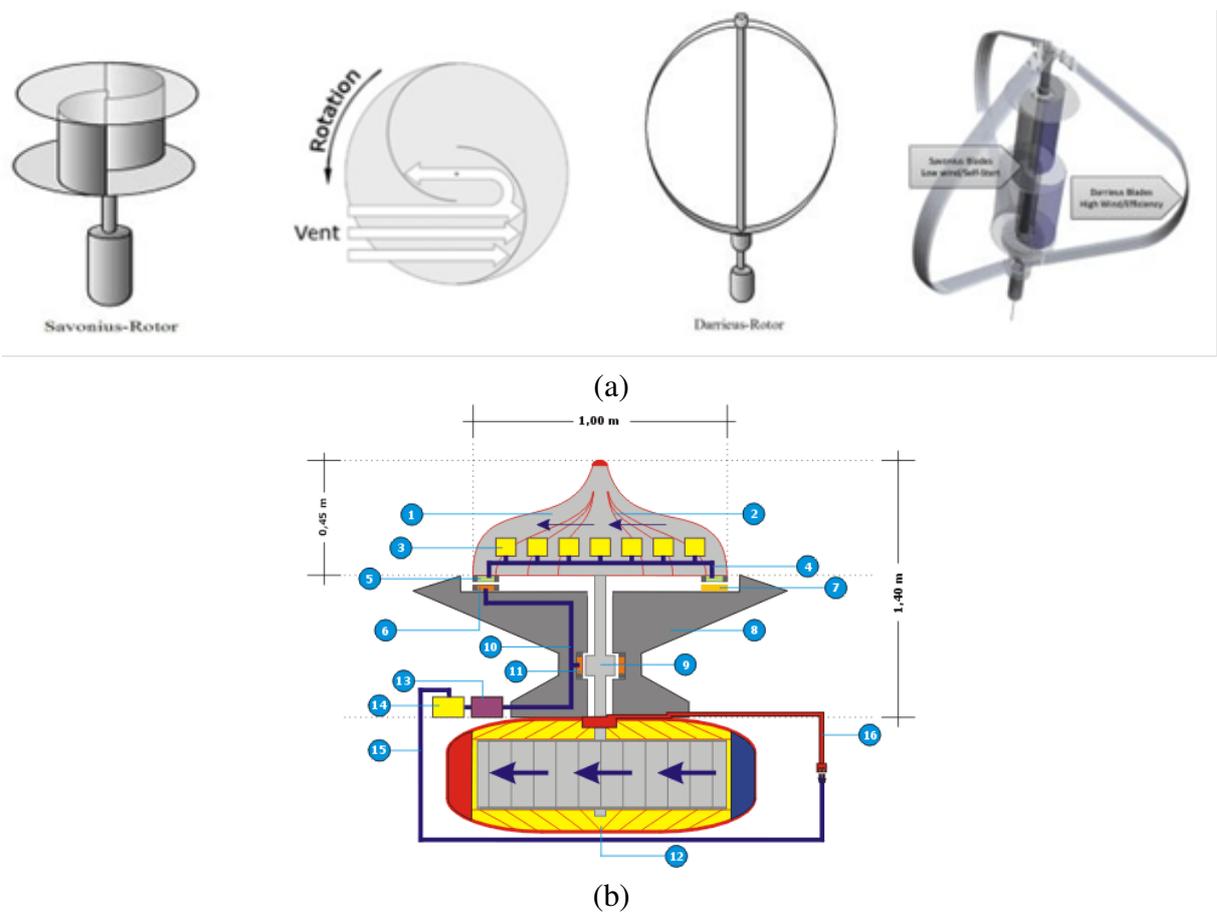


Figura 1.2: Princípio da operação da turbina Maglev (www.oocities.org/shazuga/html/turbina-lpem-br.html)

- 1-Seção levitada ou suspensa, área para o albergue das baterias.
- 2-Compartimentos aerodinâmicos para o albergue das baterias.
- 3-Baterias que alimentaram eletricamente aos eletroímãs de suporte (levitação) na seção levitada.

4-Sistema de alimentação (cabos) elétrica que transporta a energia aos eletroímãs de suporte na seção levitada.

5-Eletroímãs de suporte (tipo estator; para criar a levitação da seção suspensa). 6-Eletroímãs de suporte na seção imóvel (tipo rotor; responsáveis da levitação, da aceleração e paralisação da seção móvel).

8-Geradores colocados entre as seções para recarregar as baterias da seção levitada.

9-Estrutura de suporte; seção imóvel.

10-Seção de conexão entre o eixo da turbina e o rotor (eixo) do gerador de eletricidade.

11-Sistema de alimentação (cabos) elétrica que transporta a energia aos eletroímãs guias e os de suporte na seção imóvel, conectado a um inversor de corrente contínua / alterna ou diretamente às baterias ou uma fonte de corrente alterna. Eletroímãs guias (encarregados de manter em um lugar fixo o eixo da turbina e evitar possíveis roces com a parede interna da seção imóvel)

12-Gerador (alternador ou dínamo) de eletricidade.

13-Inversor de corrente contínua/alterna conectado às baterias.

14-Baterias conectadas a uma fonte de energia de corrente alterna para recarregar-las constantemente.

15-Sistema de alimentação elétrica conectado às linhas de distribuição para recarregar as baterias.

16-Anéis coletores da energia produzida pelo gerador de eletricidade.

Por tudo isso, constata-se que a tecnologia Maglev é o meio mais barato e eficiente de transferir energia cinética para gerar eletricidade.

1.2 Objetivos

Diante de todas as informações expostas na introdução, os principais objetivos do trabalho proposto foram:

Desenvolver um modelo matemático do sistema eletromecânico obtendo as equações dinâmicas;

Estudar o comportamento do sistema a partir da variação dos parâmetros;

Verificar os melhores parâmetros para a coleta de energia

Obter uma solução analítica aproximada para o sistema através do método de múltiplas escalas.

1.3 Metodologia

O processo das simulações numéricas foi realizado através de um computador pessoal, e programas matemáticos MAPLE® e MATLAB®. Nesse último, foram utilizadas rotinas de programação como:

Integrador ode113 (adams bashforth) para a integração direta das equações de movimento do sistema;

Rotinas computacionais desenvolvidas através do MATLAB®.

A sequência de atividades, técnicas e metodológicas para obtenção dos resultados, no desenvolvimento da tese de Doutorado, foram organizadas conforme as seguintes etapas descritas a seguir:

1) Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para: (a) discutir as fontes de não linearidades; (b) realizar as descrições de alguns exemplos principais de sistemas eletromecânicos de interesse e; (c) definir o conjunto de configurações do dispositivo eletromecânico que constituiu o objeto de estudo da pesquisa de tese de doutorado.

2) Após a definição das configurações do dispositivo, foi desenvolvido a modelagem física e matemática desse sistema dinâmico, utilizando o método de Lagrange.

3) Soluções analíticas aproximadas dos modelos matemáticos obtidos foram estudadas, para análise da existência de pontos de equilíbrio, ciclos limites, bifurcações e condições de estabilidade. Essas soluções analíticas foram importantes indicadores para a exploração do comportamento dinâmico do modelo obtido NAYFEHA.H.BALACHADRAN1995,NAYFEHA.H.;MOOK1979, STROGATZ1994,THOMPSON2002.

4) Os modelos matemáticos utilizados nas simulações numéricas para determinação das respostas dinâmicas do modelo linear e do não-linear. Nas simulações numéricas preliminares foi possível verificar a consistência dos modelos obtidos e a seleção dos parâmetros iniciais para o estudo da dinâmica desses sistemas BISHOP2002,BISHOP2006.

5) Análise e comparação das respostas dinâmicas. A forma de apresentação de resultados inclui: séries temporais, planos de fase, mapas de Poincaré, espectros de frequência, expoentes de Lyapunov e diagramas de bifurcações. Os aspectos observados nas respostas incluem a existência de pontos de equilíbrio, ciclos limites, regime periódico e caóticos NAYFEHA.H.BALACHADRAN1995,NAYFEHA.H.;MOOK1979, STROGATZ1994,THOMPSON2002.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FONTES DE ENERGIA

No último século houve um aumento rápido e constante da demanda de energia do mundo. Isso foi devido a muitas razões, incluindo um aumento global da população mundial, o desenvolvimento e industrialização dos países emergentes. A demanda de energia do mundo deve chegar a 18 bilhões de equivalentes de petróleo por tonelada em 2035 conforme as políticas atuais. A porcentagem de consumo de energia elétrica passou de 9% em 1973 para 18% em 2012, em contraste, a necessidade por outras fontes de energia, por exemplo petróleo, carvão ou gases naturais, permaneceu o mesmo ou até diminuiu no mesmo período de tempo. No futuro, energia elétrica será presumivelmente a forma mais consumida de energia, e sua produção deve ser o mais eficiente possível para satisfazer a crescente demanda (Invernizzi., et al 2016).

De acordo com Mescia et al. (2015) nas últimas duas décadas, a demanda mundial de energia aumentou 40%, mas a principal potência gerada hoje em dia ainda é produzida usando combustíveis fósseis que emitem toneladas de dióxido de carbono e outros poluentes a cada segundo.

Como resultado, os efeitos nocivos das fontes de energia à base de hidrocarbonetos como o aquecimento global, a poluição do ar, precipitação ácida, destruição do ozônio, a destruição da floresta é cada vez mais aparente.

A fim de limitar estes inconvenientes, são necessárias ações adequadas destinadas a reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, e a busca de fontes alternativas de energias limpas e renováveis é um dos desafios mais urgentes para o desenvolvimento sustentável da civilização humana (Mason, 2007).

Há nove principais áreas de recursos energéticos. Eles se dividem em duas categorias: não renováveis e renováveis. Recursos energéticos não renováveis, como: o carvão, energia nuclear, petróleo e gás natural, estão disponíveis em suprimentos limitados. Isso geralmente é devido ao longo tempo que leva para que sejam repostos. Os recursos renováveis são reabastecidos naturalmente e durante períodos de tempo relativamente curtos. As cinco principais fontes de energia renováveis são: solar, vento, água (hidro), biomassa e geotérmica (Renewable Energy World).

As principais fontes renováveis podem ser descritas da seguinte forma:

Solar: O Sol é a melhor fonte de grande parte da energia do mundo. Ele fornece a Terra luz e calor sob a forma de radiação eletromagnética. A energia solar é a fonte primária da Terra de energia renovável. O enorme fluxo de energia radiante fornecida pelo sol excede em muito o que o mundo necessita de energia elétrica. A energia solar pode ser utilizada diretamente como uma fonte de energia térmica e indiretamente como uma fonte de eletricidade. A geração de

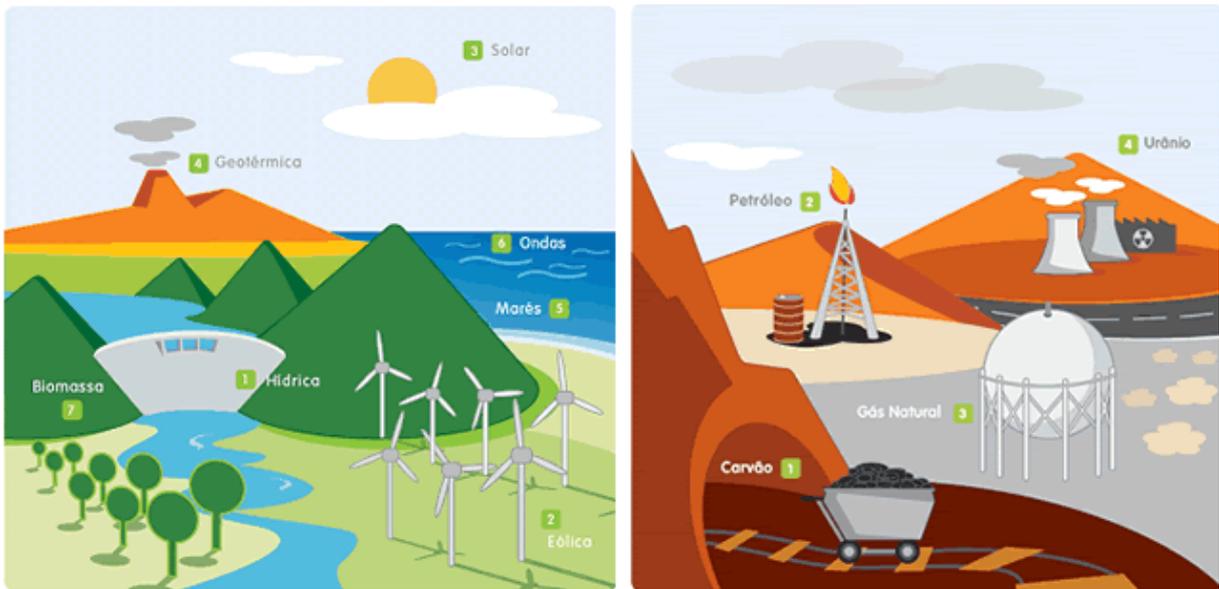


Figura 2.1: Tipos de fontes de energia renováveis e não renováveis < [http : //energiasrenovaveis – 12ct2.webnode.pt/energias – renovaveis/](http://energiasrenovaveis-12ct2.webnode.pt/energias-renovaveis/) >

eletricidade diretamente da luz solar não esgota, entre qualquer um dos recursos naturais da Terra, a energia solar é uma fonte renovável e inesgotável de energia.

Vento (eólica): A energia eólica é a tecnologia que mais cresce no mundo para a geração de eletricidade. Vento é um resultado da convecção do ar, causada pelo efeito de aquecimento do Sol e da rotação da Terra. Variações diárias e sazonais de temperatura consistentemente geram vento, produzindo uma fonte de energia que jamais se esgota. Instalações de energia eólica usam grandes lâminas giratórias para capturar a energia cinética do ar, que é então transferido para turbinas que geram energia elétrica a partir do movimento. A tecnologia em gerar eletricidade através das fontes eólicas é relativamente barata. O custo da eletricidade gerada pelo vento em locais privilegiados é próximo ao de eletricidade a carvão, porém a energia eólica é limpa e a tecnologia está sempre melhorando. A geração de energia eólica deverá crescer continuamente no futuro.

Água (Hidro): Através dos riachos, rios e lagos na Terra são geralmente formadas devido à

água da chuva e neve derretida fluida por gravidade. Instalações hidroelétricas são concebidas e construídas de tal modo que a água pode ser interceptada numa trajetória descendente, e sua energia mecânica é então convertida em eletricidade através de turbinas. A energia hídrica é muitas vezes considerada uma fonte de energia renovável, simplesmente porque o ciclo da água que evapora com o calor do Sol, cai de volta para a Terra é continuamente renovado pela energia do Sol.

Biomassa: A biomassa é matéria orgânica, que é geralmente a partir de resíduos, tais como: madeira, resíduos de madeira a partir de atividades de fabricação e resíduos agrícolas, entre outros. No futuro, quantidades muito maiores de energia de biomassa poderia vir de culturas que são plantadas e colhidas especificamente para uso como fonte de combustível de energia em plantações de rotação curta. A biomassa é considerada como sendo uma fonte renovável de energia, porque ela é derivada a partir de materiais que podem ser regeneradas a partir de fontes que ocorrem naturalmente.

Geotérmica: A energia geotérmica é devido ao calor do núcleo derretido da Terra. Energia geotérmica é uma fonte renovável de energia, porque é quase ilimitada. Devido à temperatura constante, de uma fonte geotérmica, pode ser usada como uma bomba de calor para aquecer ou arrefecer diretamente um edifício. Em outras palavras, a terra pode ser utilizada como um dissipador de calor no verão e como uma fonte de calor durante o inverno. A energia geotérmica também pode ser utilizada para gerar eletricidade, sob determinadas condições geológicas (Renewable Energy World).

Desde os primórdios da humanidade as pessoas têm usado as fontes renováveis de energia

para sobreviver, a madeira para cozinhar e para aquecimento, vento e água de moinhos de cereais e solar para acender fogueiras. Um pouco mais de 150 anos atrás, as pessoas criaram a tecnologia para extrair energia a partir dos antigos restos fossilizados de plantas e animais. Estas são fontes ricas porém limitadas de energia (carvão, petróleo e gás natural) de maneira que devem ser rapidamente substituídas pelas energias eólica, solar e de água como as principais fontes de combustível (Shafiee & Topal, 2009).

Os combustíveis fósseis constituem uma grande parte do mercado de energia de hoje, embora promissoras novas tecnologias renováveis estão a emergir. No entanto, existem diferenças entre os dois setores. Cada uma delas tem vantagens e desafios, e se relacionam com tecnologias exclusivas que desempenham um papel em nosso sistema energético atual. Por uma série de razões, a partir da quantidade limitada de combustíveis fósseis disponíveis aos seus efeitos sobre o meio ambiente, existe um interesse crescente na utilização de formas de energia renováveis e desenvolvimento de tecnologias para aumentar a sua eficiência (Shafiee & Topal, 2008).

Estudos afim de substituir os combustíveis fósseis tem centrado grande foco para as fontes de energia renováveis como: energia solar e eólica. Tais fontes não são poluentes e podem ser duradoras, além de oferecer uma alternativa atraente para as fontes de energia não renováveis tradicionais (Mescia., et al 2015).

Nesse contexto novas tecnologias para a recuperação de energia têm demonstrado grande impacto econômico e ambiental. Isto é, a coleta de energia do meio ambiente, também conhecida como energia limpa, é um processo que capta pequenas quantidades de energia que seria perdida na forma de calor, luz, som, vibração ou movimento. Esta energia capturada pode ser utilizada para várias aplicações de diversas maneiras (Kong et al., 2014).

2.1.1 COLETA DE ENERGIA DO MEIO AMBIENTE “ENERGY HARVESTING”

Essa nova tecnologia proporciona a popularização das tecnologias sem fio tanto para a comunicação e entretenimento quanto para aplicações industriais e ambientais de sensoriamento remoto, resultou em um aumento nas pesquisas e investimentos relacionados ao conceito “Energy Harvesting” (Colheita de Energia) viabilizando o desenvolvimento de sistemas de captação de energia numa vertente de micro escala, ou seja, dispositivos capazes de colher tipo de energia disponível no ambiente (energia solar, energia térmica, energia do vento e energia cinética, por exemplo) e converte – lá em uma quantidade de energia elétrica utilizável, que pode ser armazenada ou diretamente consumida por uma determinada carga (Kong et al., 2014).

A coleta de energia pode ser obtida a partir de diferentes fontes de energia, tais como vibrações mecânicas, fontes eletromagnéticas, luz, acústica, fluxo de ar, calor e variações de temperatura. Colheita de energia, em geral, é a conversão de energia do ambiente em energia elétrica utilizável. Quando comparado com a energia armazenada nos elementos de armazenamento comuns, tais como baterias, condensadores, e outros semelhantes, o ambiente representa uma fonte relativamente infinita de energia disponível (Yildiz, 2007).

Segundo Priya & Inman (2009), a recuperação de energia a partir da energia desperdiçada ou não utilizada têm sido um tópico de discussão nos últimos tempos. A energia não utilizada existe em várias formas, tais como máquinas industriais, atividade humana, veículos, estruturas e fontes de ambiente. Entre elas, algumas das fontes promissoras para a recuperação de energia

são vibrações periódicas geradas por máquinas rotativas ou motores. Pode-se descrever algumas fontes de energia disponíveis que podem ser aproveitadas para a geração de eletricidade: a energia pode ser gerada a partir de um corpo humano ou animal por ações como caminhada e corrida.

Energia natural: vento, fluxo de água, ondas do mar, e a energia solar pode fornecer disponibilidade de energia ilimitada a partir do ambiente.

Energia mecânica: vibrações de máquinas, estresse mecânico, tensão de motores de alta pressão, máquinas de fabricação, e rotações de resíduos podem ser capturados e utilizados como fontes de energia mecânica do ambiente.

Energia térmica: variações de energia calor residual dos fornos, aquecedores, e fontes de atrito.

Energia Luminosa: essa fonte pode ser dividida em duas categorias de energia: luz artificial e solar, a energia luminosa pode ser capturada através de sensores fotográficos, diodos de fotos e painéis solares fotovoltaicos (PV).

Energia eletromagnética: indutores, bobinas, e os transformadores podem ser considerados como fontes de energia do ambiente, dependendo da quantidade de energia necessária para a aplicação.

Destes tipos de fontes de energia citados para transformação em energia elétrica, a energia

mecânica é uma das energias mais abundantes capazes de ser reutilizadas em nosso entorno. Essa energia geralmente pode ser colhida, por meio da conversão de vibração em eletricidade (Roundy et al., 2003).

FORMAS DE COLHEITA DE ENERGIA MECÂNICA

Para coletar energia mecânica e converter em energia elétrica, requer vibração de um sistema mecânico. O sistema mecânico deve ser concebido para ser capaz de maximizar o acoplamento entre as fontes de energia mecânica e o mecanismo de transdução, em função das características dos movimentos ambientais (Kong et al., 2014).

O sistema transmite as vibrações a uma massa suspensa para produzir um deslocamento relativo. Como o sistema normalmente tem uma frequência de ressonância, este pode ser concebido para corresponder à frequência característica dos movimentos ambientais (Michels & Pitz-Paal, 2007).

Aceleração mecânica é produzida por vibrações que, por sua vez, fazem com que o componente de massa possa se mover e oscilar. Este deslocamento relativo faz com que ocorra um atrito e amortecimento de forças para ser aplicado contra a massa, reduzindo assim e, eventualmente, extinguindo as oscilações.

A energia da força de amortecimento pode ser convertida em energia elétrica por meio de um campo elétrico (Eletrostática), o campo magnético (eletromagnética), ou tensão em um material piezelétrico (Yildiz, 2007).

Eletrônica: Esta técnica utiliza um campo magnético para converter a energia mecânica em energia elétrica (Amirtharajah & Chandrakasan, 1998). Uma bobina ligada à massa oscilante é levada a passar através de um campo magnético, que é estabelecido por um ímã fixo, para produzir energia elétrica. A bobina desloca através de uma quantidade variável de fluxo magnético, induzindo uma tensão de acordo com a lei de Faraday. A tensão induzida é inerentemente pequena e, portanto, deve ser aumentada para se tornar uma fonte viável de energia (Kulah & Najafi, 2004). A variação de fluxo pode ser realizada com um ímã em movimento, cujo fluxo é ligado com uma bobina fixa ou com um ímã fixo cujo fluxo é ligada com uma bobina móvel. A primeira configuração é preferida em relação ao segundo porque os fios elétricos são fixos (Mateu & Moll, 2005). Como a grandeza relevante aqui é o fluxo magnético através de um circuito, o tamanho da bobina está inversamente relacionado com o campo elétrico e consequentemente, com a obtenção de energia gerada. Isso significa que grandes transdutores com grandes bobinas devem ter um desempenho melhor do que transdutores menores, a menos que um derivado de tempo maior esteja envolvido com os geradores de pequena escala (Amirtharajah & Chandrakasan, 1998). Técnicas para aumentar a tensão induzida pode incluir o uso de um transformador, aumentando o número de espirais da bobina, ou o aumento do campo magnético permanente (Torres & Rincón-mora, 2005).

Eletrônica (capacitivo): O princípio dos geradores eletrostáticos é que a parte móvel do transdutor se move contra um campo elétrico, gerando assim energia. (Mateu & Moll, 2005). Este método depende da capacitância variável de capacitor dependente de vibração. Esse capacitor variável, que é carregado inicialmente, vai separar suas placas por vibrações, deste modo, a energia mecânica é transformada em energia elétrica. A tensão constante ou corrente constante

alcança a conversão por meio de dois diferentes mecanismos. Por exemplo, a tensão variável através de um condensador é mantida constante quando se altera capacitância após uma carga primária. Como resultado, as placas divididas e a capacitância são reduzidas, até que a carga é conduzida para fora do dispositivo. A energia dirigida, em seguida, pode ser armazenada ou utilizada para carregar uma bateria, gerando a fonte de tensão necessário. A característica mais marcante deste método é a sua natureza IC-compatível, dado que MEMS (sistema micro-eletromecânicos) capacitores variáveis são fabricados através de técnicas relativamente bem conhecidos. Este regime produz níveis de tensão de saída mais altas e mais prático do que o método eletromagnético, com densidade de potência moderada (Amirtharajah & Chandrakasan, 1998).

Piezoelétrico: Este método altera a energia mecânica em energia elétrica por esforço de um material piezoelétrico (Priya, 2007). O efeito piezoelétrico foi descoberto por Jacques e Pierre Curie, em 1880, os irmãos Curie descobriram que certos materiais, quando submetidos a tensão mecânica, que sofre de uma polarização elétrica que é proporcional à tensão aplicada. Este é o efeito piezoelétrico mecânico utilizado para a conversão de energia elétrica (Mateu & Moll, 2005). Ele converte as variações de temperatura em voltagem elétrica ou corrente, sendo piroeletricidade a capacidade de certos materiais em gerar um potencial elétrico quando eles são aquecido ou arrefecido.

Com resultado da mudança de temperatura, as cargas positivas e negativas movem as extremidades opostas através de migração (polarizado) e, portanto, um potencial elétrico é estabelecido. Aplicações de captação de energia piezoelétrica exigem entradas com o tempo e variações que resultam em pequenas saídas de energia em aplicações de energia de eliminação. Uma

das principais vantagens que a coleta de energia piezoelétrica tem sobre captação de energia termelétrica é que a maioria dos materiais ou elementos piroelétricos são estáveis até 1200°C ou mais. Sua estabilidade permite captação de energia, mesmo a partir de fontes de alta temperatura com o aumento da eficiência termodinâmica (Litak, Friswell, & Adhikari, 2010).

Para que seja possível o estudo através de modelos matemáticos é necessário considerar o tipo da fonte de vibração. Podendo ser ideal (harmônica) ou não – ideal (Arbex, 2012).

2.1.2 TIPOS DE FONTES DE VIBRAÇÃO

Sistemas vibratórios compreendem meios para armazenar energia potencial (fonte), meios de armazenamento de energia cinética (massa), e os meios pelos quais a energia é gradualmente perdida (amortecedor). A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de energia entre as suas formas potencial e cinética. Em um sistema amortecido, alguma energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituído a partir de uma fonte externa (Blake, 2010).

As fontes de energia podem ser classificadas como ideal e não-ideal. As fontes de energia ideal não consideram que as forças atuantes no sistema não influenciem na dinâmica do motor ou shaker, ou seja, os modelos que utilizam o modelo ideal de excitação são modelos simplificados, que podem desprezar importantes fenômenos. Assim, o modelo que utiliza uma fonte de energia não-ideal, se aproxima significativamente de um modelo mais completo e complexo, assemelhando -se mais do modelo real (Moraes, 2012).

Sistema dinâmico do tipo ideal: a excitação ideal ou uma fonte ideal de energia é aquela onde

a excitação não é influenciada pela resposta do sistema. Por outro lado, quando uma excitação é induzida pela resposta do sistema, é dita não ideal. Dependendo da excitação, refere-se a um sistema dinâmico como ideal (força harmônica) ou não ideal (motor ou shaker com fonte de energia limitada). O comportamento do sistema dinâmico se afasta do caso ideal à medida que a potência do motor ou shaker se torna mais limitada. Para sistemas dinâmicos não ideal, deve-se adicionar uma equação que descreve, como a fonte de energia que passa tal energia às equações que governam o sistema (curva característica do motor ou shaker) (Felix, 2002).

Sistema Dinâmico do tipo não ideal: Quando a fonte de excitação é influenciada pela resposta do sistema, esta é dita não ideal. Se na formulação das equações dinâmicas de um sistema, além da influência da fonte de energia sobre o sistema oscilante, considera-se também a influência inversa do sistema oscilante sobre a fonte, o sistema é chamado não ideal. Geralmente sistemas oscilantes não ideais são aqueles para os quais a fonte de energia é limitada. Para o sistema dinâmico não ideal, adiciona-se as equações que descrevem o sistema dinâmico ideais uma equação que descreve como a fonte fornece energia ao sistema. Assim uma característica de um sistema oscilatório não ideal é que este tem um grau de liberdade a mais que o correspondente ideal. O fenômeno do salto e o aumento da potência exigida pela fonte de energia, operando na região de ressonância, são manifestações do fenômeno conhecido como efeito Sommerfeld, em homenagem ao primeiro pesquisador a observar esses fatos experimentalmente (Krasnopolskaya & Shvets, 1993).

Constata-se que é usual desconsiderar, no modelo matemático, a influência do movimento do próprio sistema em sua excitação. Todavia, em muitos casos, esta simplificação, no modelo matemático, não é razoável, devendo-se levar em conta que a excitação ou sua fonte, é influenciada

pela própria resposta do sistema. Este fato prejudica a formulação dos modelos matemáticos da Teoria de Vibrações tradicional, necessitando-se estabelecer uma formulação mais realista que leve em conta a interação entre as variáveis de controle, e as de estado, da excitação, com as de estado do sistema físico estrutural. Tem-se assim, um sistema vibratório não ideal, ou um sistema com fonte de excitação, não ideal. O sistema ideal é o tradicional onde não existe este fenômeno. A máquina não ideal é uma conceituação que depende fundamentalmente da estrutura que a suporta (Piccirillo, 2007).

Um sistema dinâmico pode ser classificado de diferentes maneiras. Quanto à variável tempo, o sistema pode ser contínuo, onde é descrito por equações diferenciais e o tempo varia continuamente, ou discreto, onde o estado do sistema somente muda em intervalos de tempo determinados de acordo com equações de diferenças. Quanto ao tipo de modelo, o sistema pode ser linear ou não linear (Monteiro, 2002).

Os modelos não lineares, de modo geral, descrevem de maneira mais efetiva os fenômenos físicos do que os modelos ou técnicas lineares. Por isso, afirma-se que a natureza é não linear em toda a sua essência. Muitos estudos são realizados no campo da dinâmica não linear a fim de tratar sistemas dinâmicos descritos por modelos matemáticos considerados simples, porém donos de uma resposta complexa e muito interessante. A falta de uma propriedade unificadora faz com que a sistematização dos sistemas não lineares possua um maior grau de dificuldade quando comparado aos sistemas lineares, que, por sua vez, satisfazem a um princípio característico, denominado princípio da superposição de efeitos, obtido através da combinação entre o princípio da aditividade e o princípio da proporcionalidade entre excitação e resposta (Belato et al., 2001).

A teoria dos sistemas não lineares não é tão desenvolvida como a dos sistemas lineares. Em razão disso, é normal haver uma concentração maior no estudo de modelos lineares que possuem um bom comportamento, tendo em vista as diversas dificuldades inerentes encontradas nos problemas não lineares, como seu comportamento desequilibrado e aperiódico, porém de riqueza exuberante. Trata-se de um sistema imprevisível, onde o seu estado futuro depende de seu estado presente, podendo ser alterado significativamente através de sensíveis mudanças na atual condição. Tais mudanças são frutos da principal característica dos sistemas dinâmicos não lineares, que é a sensibilidade às condições iniciais (Felix, 2002).

A dinâmica não linear constitui o estudo de sistemas de equações diferenciais não lineares. Entretanto, não existem técnicas analíticas gerais para resolver esse tipo de equação, pois os métodos numéricos conhecidos apresentam alguns problemas. Sendo assim, a análise gráfica no retrato de fases torna-se uma ferramenta de fundamental importância, sendo capaz de fornecer muitas informações acerca do comportamento do sistema não linear.

O comportamento caótico é uma das inúmeras possibilidades que podem ocorrer na dinâmica de sistemas não lineares. Além dele, outros fenômenos só ocorrem neste tipo de sistema, dentre os quais se destacam as bifurcações, a ocorrência de ciclo limite, a grande dependência dos parâmetros, a presença de múltiplos pontos de equilíbrio, a não unicidade da solução e o tempo de escape finito. Os sistemas não lineares são chamados assim porque existe algum componente ou subsistema não linear presente nas equações que o compõem. Estas não linearidades podem ser naturais, quando são próprias do sistema e estão intimamente associadas a ele, ou artificiais, quando são intencionalmente introduzidas com o intuito de controlar ou melhorar o comportamento dos sistemas. No estudo de problemas descritos por sistemas não lineares, costuma-se

realizar dois tipos distintos de análise. A análise qualitativa visa entender o comportamento global de um dado sistema, enquanto a análise quantitativa procura avaliar a evolução deste sistema no tempo. Geralmente, a análise qualitativa utiliza técnicas geométricas, dificultando a análise de sistemas com muitos graus de liberdade (Iliuk, 2012).

O espaço de estados ou espaço de fases: dentre as possíveis formulações para expor o comportamento de um sistema dinâmico, destaca-se a representação em espaço de estados, também conhecido como espaço de fases. O espaço de estados é um conjunto de n equações diferenciais ordinárias de primeira ordem que regem, ao mesmo tempo, o comportamento das n variáveis dependentes escolhidas que representam as dimensões do sistema, denominadas variáveis de estado. Por exemplo, um modelo matemático descrito por uma equação diferencial de ordem n é substituído por um sistema de n equações diferenciais, todas de primeira ordem. (Monteiro, 2002).

Estabilidade: Geralmente as equações diferenciais que regem o movimento de sistemas dinâmicos não lineares são complexas e não geram solução exata. Muitas vezes é preciso fazer uso da teoria de sistemas lineares para o estudo dos sistemas não lineares, a fim de identificar características importantes de suas soluções sem resolvê-los. Na análise de estabilidade de sistemas isso pode ser feito examinando o comportamento das soluções cujas condições iniciais encontram-se na vizinhança de um ponto de equilíbrio de comportamento conhecido. A este tipo de estabilidade dá-se o nome de estabilidade de uma solução estacionária, representada no retrato de fases por um ponto de equilíbrio estável ou instável. Na teoria dos sistemas dinâmicos, o conceito de estabilidade é de suma importância e pode ser entendido através de uma perturbação no sistema, pois está associado à característica de determinada solução. Caso esta perturbação

não afete tal solução de forma significativa, então esta é considerada estável. Do contrário, ela é dita instável (Álvarez,1994).

Bifurcação: uma bifurcação caracteriza-se pela mudança qualitativa da trajetória no espaço de fases, quando um parâmetro do sistema é variado. A teoria das bifurcações é fundamental para a análise de sistemas não lineares, visto que, do mesmo modo em que é útil classificar os diferentes tipos de movimentos de um sistema, também se torna importante identificar as formas como tais movimentos podem se modificar no retrato de fases. O termo bifurcação refere-se à mudança qualitativa na natureza do comportamento de um sistema dinâmico quando há variação de um dos parâmetros do qual o retrato de fases do sistema é dependente, denominados parâmetros de bifurcação. O ponto no retrato de fases onde ocorre uma bifurcação é chamado de ponto de bifurcação (Guilherme, 2004).

As bifurcações em sistemas dinâmicos podem ser classificadas em bifurcações locais e bifurcações globais. As bifurcações locais são aquelas que tratam das mudanças qualitativas de um sistema dinâmico nas vizinhanças de um ponto de equilíbrio ou de uma órbita fechada, e, na maioria das vezes, esse estudo local é realizado através da determinação dos autovalores. Nas bifurcações globais pode ocorrer uma variação na estrutura das órbitas, por isso não podem ser deduzidas a partir de uma análise local. (Monteiro, 2002).

A teoria do caos: O estudo de fenômenos relacionados com a teoria do caos vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. Geralmente, quando o assunto é o caos, a primeira impressão é a de uma ciência de extrema complexidade caracterizada por comportamentos imprevisíveis e desordenados, o que não deixa de ser verdadeiro. Entretanto, no contexto científico, o caos é

muito mais do que isso. O caos tem origem no século XIX, quando Poincaré buscava resolver um sistema de equações que descrevia o conhecido problema dos três corpos. Ele descobriu, ao contrário do que se imaginava, que as soluções não eram regulares e possuíam um comportamento totalmente imprevisível. Poincaré desenvolveu uma base matemática necessária para realizar tal estudo, porém não deu prosseguimento devido à falta de recursos tecnológicos na época. Aproximadamente um século mais tarde, Edward Norton Lorenz (1917-2008) encontrou o mesmo comportamento antes visto por Poincaré em um sistema de equações composto por três equações diferenciais e três variáveis que descreviam um modelo meteorológico. Foi com o auxílio de computadores que Lorenz calculou as soluções aproximadas de seu sistema e detectou o fenômeno da sensibilidade às condições iniciais.

Todos esses cálculos deram origem a um atrator cuja forma lembra uma borboleta, o qual se tornou um dos primeiros atratores estranhos a ser desvendado, conhecido como Atrator de Lorenz.

Além da conhecida dependência às condições iniciais, os sistemas caóticos também possuem algumas outras características importantes. Deve-se salientar que o caos é um comportamento típico de sistemas não lineares e, para que ele possa aparecer, é necessário que o sistema dinâmico possua, no mínimo, três dimensões. Uma resposta caótica de um sistema dinâmico possui infinitas trajetórias periódicas e não periódicas, além de uma possibilidade infinita de atratores. Em sistemas não lineares estáveis, as pequenas variações nas condições iniciais resultam em pequenas mudanças na resposta. Por outro lado, nos sistemas caóticos as condições iniciais crescem exponencialmente ao longo do tempo, provocando uma divergência nas trajetórias, tornando-se inviável a realização de previsões em longo prazo. Por isso, pode-se dizer então que as palavras mudança e tempo representam a base do caos (Álvarez, 1994).

Expoente de Lyapunov: o trabalho do matemático russo Aleksandr Lyapunov no século XIX deu origem ao desenvolvimento da teoria da estabilidade de Sistemas Dinâmicos, onde é discutida a evolução de Sistemas e seu comportamento. Em um sistema dinâmico, expoentes de Lyapunov, quantificam a taxa exponencial média de expansão ou contração de elementos de volume infinitesimal em cada sentido do espaço de fase. Expoentes negativos implicam a convergência de trajetórias inicialmente nas proximidades, enquanto os positivos significam divergência exponencial das órbitas vizinhas, portanto, ocorre a sinalização de comportamento caótico (Anteneodo, 2004).

2.2 LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

A levitação magnética é uma tecnologia com grande potencial futuro, com aplicações práticas que cativam tanto pelo aspecto visual como pelas funcionalidades. Criar um sistema mecânico estável para levitar um objeto sem necessidade de contato, onde a força gravitacional é contrariada apenas por forças magnéticas tem sido um objetivo de engenheiros e cientistas há muitos anos . No entanto, as características de instabilidade e não linearidade inerentes a este tipo de sistemas torna-os difíceis de controlar, o que atrasou durante várias décadas a aplicação prática desta tecnologia (French, 1968).

De acordo com Moon, 2004, a suspensão de objetos e pessoas sem meios visíveis de sustentação é fascinante para a maioria das pessoas, mesmo em tempos de altas tecnologias. Sistemas Dinâmicos sem os efeitos da gravidade são um sonho comum para gerações de pensadores desde Benjamin Franklin a Robert Goddard. Um método encontrado para resolver esta questão

foi a levitação magnética (maglev). A levitação magnética, maglev, ou suspensão magnética é um método pelo qual um objeto é suspenso, apoiado apenas pelos campos magnéticos. A pressão magnética é usada para neutralizar os efeitos da gravidade e todas as outras acelerações (Braunbeck, 1939).

Diferentes técnicas e métodos para promover a levitação magnética foram desenvolvidos, os quais podem ser classificados segundo a natureza da origem das forças magnéticas em: levitação por repulsão ou por atração magnética. Outra técnica em ascensão é a levitação supercondutora (Superconducting Quantum Levitation - SQL), baseado no Efeito Meissner de exclusão do campo magnético do interior de supercondutores (Moon, 2004).

Levitação por repulsão: a repulsão entre campos magnéticos de mesma polaridade pode ser facilmente constatada pela aproximação de dois ímãs permanentes, com pólos iguais, adequadamente orientados na direção um do outro. Deste modo, aproximando-se os dois ímãs, é fácil perceber que há uma força repulsiva agindo entre eles, procurando mantê-los afastados. Além de ímãs permanentes, foi descoberto em 1820 pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted que correntes elétricas também são capazes de produzir campos magnéticos. Assim, utilizando-se a Lei de Ampère nas situações em que há simetria, é possível calcular-se o campo magnético produzido por uma corrente elétrica que circula por um condutor, podendo este condutor ser um fio retilíneo ou uma bobina (Mann & Sims, 2009).

O método mais comum de levitação magnética é baseado na utilização de um eletroímã (Moon, 2004; Carmichael, 1986 e Wong, 1986). O eletroímã é um ímã controlado por corrente elétrica, capaz de suspender um determinado objeto metálico a uma determinada altura (distância

de operação) no eixo vertical, apenas com o campo magnético gerado pela corrente elétrica que circula no solenoide. Um sistema de levitação magnética simples, é conhecido pelo acrônimo MagLev (Magnetic Levitator). Em um MagLev o sistema de controle é a parte fundamental do dispositivo, pois a levitação depende do equilíbrio entre as forças magnética e gravitacional (Arbex et al 2014).

Segundo Carmichael (1986) a levitação magnética através de eletroímã, vem sendo realizada desde 1930, com o propósito de estudar o comportamento não linear deste tipo de dispositivo. Durante este período, os métodos utilizados para levitação magnética foram sendo aperfeiçoados, principalmente no que diz respeito aos sistemas de controle (Wong, 1986).

2.2.1 APLICAÇÕES DA LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

A levitação magnética é uma tecnologia avançada, que apesar de recente já possui várias aplicações práticas. O ponto comum entre estas aplicações é a inexistência de contato físico entre duas superfícies, o que elimina as forças de fricção. Este fato leva ao aumento da eficiência, redução de custos de manutenção, e aumento da vida útil dos sistemas. Já existem vários países que usam este tipo de tecnologia nas mais diversas áreas.

Sistemas de levitação magnética são amplamente utilizados em vários campos, tais como rolamentos sem atrito, trens de alta velocidade, levitação de modelos de túnel de vento, o isolamento de máquinas sensíveis a vibração, a levitação de metal fundido em fornos de indução, e levitação de placas de metal durante a fabricação (Barie & Chiasson, 1996).

Uma aplicação importante, especialmente da levitação magnética, de bastante relevância, foi na área das energias renováveis, onde foi criada uma turbina eólica com utilização de ímãs permanentes. Esta aplicação baseia-se no fato da não existência de atrito entre os mecanismos, proporcionando um maior desempenho do sistema de energia, visto que, um vento de 1,5 m/s consegue gerar energia (Nabavi & Zhang, 2016).

TURBINAS EÓLICAS MAGLEV

As turbinas eólicas Maglev proporcionam um desempenho superior às tradicionais, com baixo nível de ruído, e maior tempo de vida. Usando forças magnéticas, estas turbinas não apresentam atrito entre as hélices e a parte fixa. As turbinas Maglev funcionam com os mesmos princípios de levitação apresentados até agora, mas estas não são apenas usadas para manter as turbinas a levitar, mas também para assegurar uma estabilidade durante os 360° do movimento. Esta tecnologia pode ser aplicada em várias áreas e produtos, que requerem alto nível de transferência de calor, como computadores, projetores ou sistemas de áudio (Rocha, 2004).

A Turbina Eólica Maglev foi revelada primeiramente na exposição da energia de vento Ásia em Beijing 2007. O princípio de funcionamento exclusivo por trás deste projeto é através da levitação magnética, sistema extremamente eficiente para a energia eólica (Rocha, 2004).

Historicamente de acordo com os arquivos da indústria MAGLEV o projeto da super turbina é uma criação do empresário e engenheiro elétrico polonês Edward Mazur na tentativa de evitar a condição futura da falta de recursos energéticos renováveis. Sabe-se que a população aumenta de maneira exponencial e que o preço que se paga pela energia elétrica preocupa todos os

níveis da sociedade. Foi em busca de uma fonte de energia elétrica mais limpa e barata que o empreendedor do projeto super turbina eólica MAGLEV (levitação magnética) encontrou seu espaço no mercado energético (Araújo, 2011).

A Maglev turbina é capaz de gerar 1 GW de potência, o que daria para alimentar 750.000 casas por trimestre e pode durar mais de 500 anos devido à ausência de atrito nas peças principais. Ela é composta de diferentes tipos de materiais dentre os quais se destacam: os supercondutores, o neodímio que é um elemento extraído dos minerais da classe das terras-raras, há condutores presentes nos circuitos elétricos de distribuição, além de carbono e plásticos. A propulsão da hélice ocorre a partir da força do vento direcionado pelas três grandes paletas móveis compostas de um revestimento maleável (Inhabitat).

A turbina Maglev pode produzir mais energia do que turbinas eólicas horizontais convencionais. As pás verticais da turbina de vento são suspensas no ar acima da base do equipamento. Ao invés se sustentarem e de girarem sobre rolamentos, essas pás ficam suspensas, sem contato com outras partes mecânicas e, portanto, podem girar sem atrito, o que aumenta exponencialmente seu rendimento (Nabavi & Zhang, 2016).

A Levitação Magnética é um sistema que utiliza ímãs "permanentes" opostos em vez de rolamentos para transmissão de potência, o que significa que não há contato físico real entre as partes móveis, portanto não há atrito e nada a desgastar.

As turbinas eólicas da levitação magnética não sofrem desvantagens em relação as turbinas tradicionais. É um sistema de baixo ruído, virtualmente sem atrito, que necessita de pouca

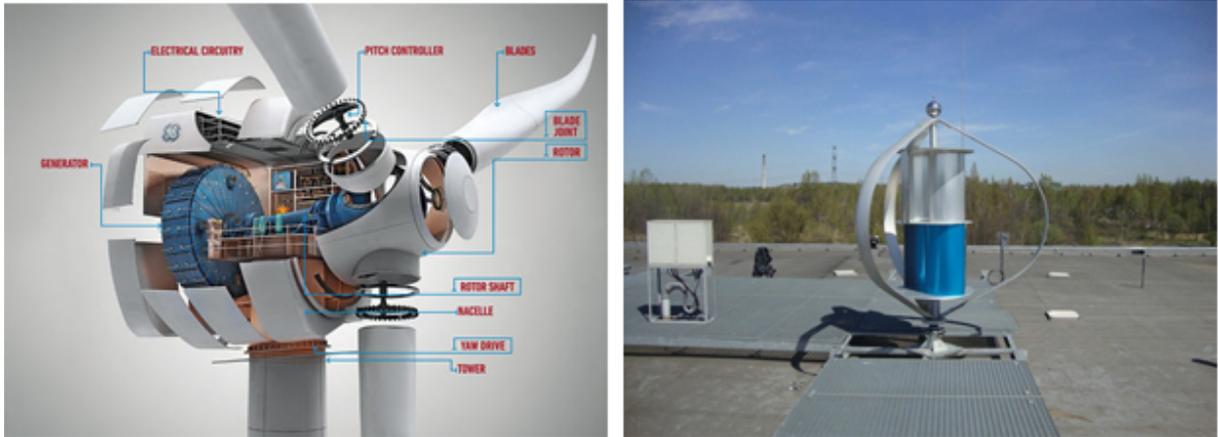


Figura 2.2: Mecanismos de funcionamento da turbina eólica MagLev < [http : //inhabitat.com/super – powered – magnetic – wind – turbine – maglev/html](http://inhabitat.com/super-powered-magnetic-wind-turbine-maglev/html) >

manutenção. Uma turbina eólica MagLev pode ser montada em praticamente qualquer superfície plana, devido ao seu design compacto. Ao contrário de outros tipos que devem ser pré-montadas, devido ao perigo das pás. (Exclus Solar). Acredita-se que futuramente as turbinas eólicas Maglev possam ser um mecanismo promissor para gerar novas energias. Haja visto que hoje na China já existem várias centrais de grande potência MW usando a tecnologia Maglev e está se tornando uma alternativa comercial muito popular devido à facilidade de instalação, operação, baixo ruído e durabilidade.

Capítulo 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

Para compreender e estudar a dinâmica envolvida em um sistema através de um modelo matemático adotado, é necessário obter as equações do movimento. Dessa forma, determinam-se as coordenadas generalizadas para cada caso. Em seguida, calcula-se a posição e a velocidade dos corpos envolvidos e na sequência, obtêm-se as equações de energia e suas derivadas, construindo assim, as equações dinâmicas por meio da metodologia proposta por Lagrange em Mecânica Analítica.

Tabela 3.1: Elementos análogos de sistemas mecânicos e elétricos baseados na relação força-voltagem. Medidas no Sistema Internacional de Unidades (SI)

Sistema Mecânico	Sistema Elétrico
Força f (N) ou Torque T (N.m)	Tensão e (V)
Massa m (Kg) ou Inércia J (Kg.m ²)	Indutância L (H)
Amortecimento Viscoso b ($\frac{N.s}{m}$) ou B ($\frac{N.m.s}{rad}$)	Resistência R (Ω)
Rigidez k ($\frac{N}{m}$) ou K ($\frac{N.m}{rad}$)	Inverso da Capacitância $\frac{1}{C}$ ($\frac{1}{F}$)
Deslocamento x (m) ou θ (rad)	Carga Elétrica q (C)
Velocidade \dot{x} ($\frac{m}{s}$) ou $\dot{\theta}$ ($\frac{rad}{s}$)	Corrente Elétrica $i = \frac{dq}{dt}$ (A)
Aceleração \ddot{x} ($\frac{m}{s^2}$) ou $\ddot{\theta}$ ($\frac{rad}{s^2}$)	Variação $\frac{di}{dt}$ ($\frac{A}{s}$)

As coordenadas generalizadas deste sistema, são determinadas da seguinte forma:

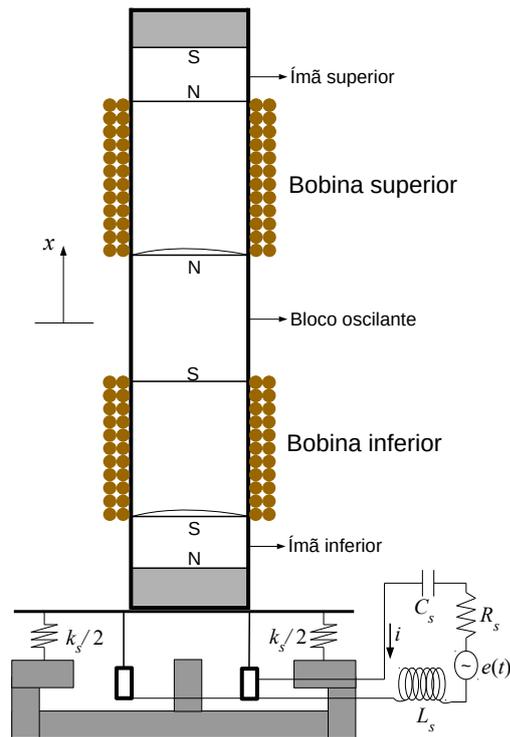


Figura 3.1: Dispositivo de captação de energia.

Para o oscilador tem-se:

$$\begin{cases} q_1 = 0 \Rightarrow \dot{q}_1 = 0 \\ q_2 = x \Rightarrow \dot{q}_2 = \dot{x} \end{cases} \quad (3.1)$$

Para o circuito elétrico, faz-se uma analogia força-voltagem, com base na Lei das Malhas de Kirchhoff.

Onde q representa a carga elétrica instantânea, L a indutância, R a resistência, C a capacitância e e a fonte de tensão.

Os termos L_s , R_s e C_s representam respectivamente a indutância, resistência e capacitância do eletro shaker.

Portanto, as energias **cinética (T)** e **potencial (V)** são definidas por:

Energia Cinética

$$T = \frac{1}{2}[m.\dot{x}^2 + L_s.\dot{q}^2] \quad (3.2)$$

Energia Potencial

$$V = \frac{1}{2}x^2.(K_{mag_b} - K_{mag_t}) - (-S.\dot{q}.x) + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C_s}.q^2\right) \quad (3.3)$$

$$V = \frac{1}{2}x^2.(K_{mag_b} - K_{mag_t}) + S.\dot{q}.x + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C_s}.q^2\right) \quad (3.4)$$

O termo $K_{mag_b} - K_{mag_t}$ descreve a rigidez da força magnética e o coeficiente S é o coeficiente de acoplamento entre os sistemas elétrico e mecânico.

Com $S = 2.\pi.N_s.l_s.B_s$, onde N_s é o número de voltas da bobina do shaker, l_s é o tamanho da bobina e B_s é a força média do campo magnético do shaker.

Função de dissipação de Rayleigh

$$D = \frac{1}{2}[c_m\dot{x}^2 + c_e\dot{x}^2 + R_s\dot{q}^2] \quad (3.5)$$

A partir das energias do sistema, constrói-se a função Lagrangiana, (L), que é definida pela diferença entre as energias cinética (T) e potencial (V) e as equações do movimento do sistema são as derivadas da função Lagrangiana em função das coordenadas generalizadas e do tempo.

Lagrangeano $L = T - V$

$$L = \frac{1}{2}[m.\dot{x}^2 + L_s.\dot{q}^2] - \left[\frac{1}{2}x^2.(K_{mag_b} - K_{mag_t}) + S.\dot{q}.x + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C_s}.q^2\right)\right] \quad (3.6)$$

$$L = \frac{1}{2}.m.\dot{x}^2 + \frac{1}{2}.L_s.\dot{q}^2 - \frac{1}{2}.x^2.(K_{mag_b} - K_{mag_t}) - S.\dot{q}.x - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C_s}.q^2\right) \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{x}}\right) = 0 \quad (3.8)$$

e

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q} \right) + \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{q}} \right) = e \cdot \cos(\Omega \cdot t) \quad (3.9)$$

Onde x é o deslocamento da massa magnética central e q é a carga elétrica do shaker.

logo, para o oscilador:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = m \cdot \dot{x} \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = m \cdot \ddot{x} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -x \cdot (K_{mag_b} - K_{mag_t}) - S \cdot \dot{q} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}} = c_m \cdot \dot{x} + c_e \cdot \dot{x} \quad (3.13)$$

logo, a equação dinâmica para o oscilador é definida por:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}} = m \cdot \ddot{x} + x \cdot (K_{mag_b} - K_{mag_t}) + S \cdot \dot{q} + c_m \cdot \dot{x} + c_e \cdot \dot{x} = 0 \quad (3.14)$$

As equações provenientes do movimento do eletroshaker são:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = L_s \cdot \dot{q} + S \cdot x \quad (3.15)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = L_s \cdot \ddot{q} + S \cdot \dot{x} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} = -\frac{1}{C_s} \cdot q \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = R_s \cdot \dot{q} \quad (3.18)$$

Concluindo que a equação dinâmica para o eletroshaker é dada pela expressão a seguir:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = L_s \ddot{q} + S \cdot \dot{x} + \frac{1}{C_s} \cdot q + R_s \cdot \dot{q} = e \cdot \cos(\Omega \cdot t) \quad (3.19)$$

Portanto o sistema de equações para o sistema oscilatório é:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + x \cdot (K_{mag_b} - K_{mag_t}) + S \cdot \dot{q} + c_m \cdot \dot{x} + c_e \cdot \dot{x} = 0 \\ L_s \ddot{q} - S \cdot \dot{x} + \frac{1}{C_s} \cdot q + R_s \cdot \dot{q} = e \cdot \cos(\Omega \cdot t) \end{cases} \quad (3.20)$$

3.1 Definição da força magnética (K_{mag})

De acordo com o experimento realizado por Mann (2009) a força magnética pode ser expressa na forma de série de potências.

$$F(x) = F_b - F_t = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \cdot (x+d)^n - \sum_{n=0}^3 \alpha_n \cdot (d-x)^n \quad (3.21)$$

Onde F_b é a força do magneto inferior, F_t é a força do magneto superior e d é o espaçamento entre os magnetos. Os coeficientes α_n foram obtidos experimentalmente por (??)

Portanto:

$$F(x) = (2 \cdot \alpha_1 + 4 \cdot d \cdot \alpha_2 + 6 \cdot d^2 \cdot \alpha_3) \cdot x + 2 \cdot \alpha_3 \cdot x^3 = k \cdot x + k_3 \cdot x^3 \quad (3.22)$$

Logo, é possível reescrever o sistema de equações 3.20 da seguinte forma

$$\begin{cases} m.\ddot{x} + k.x + k_3.x^3 + S.\dot{q} + c_m.\dot{x} + c_e.\dot{x} = 0 \\ m.\ddot{q} - S.\dot{x} + \frac{1}{C_s}.q + R_s.\dot{q} = e.\cos(\Omega.t) \end{cases} \quad (3.23)$$

Onde $k = 2.\alpha_1 + 4.d.\alpha_2 + 6.d^2.\alpha_3$ representa a rigidez linear e $k_3 = 2.\alpha_3$ representa a rigidez não linear do sistema.

3.2 Equações para o modelo de captação de energia

O circuito apresentado a seguir, representa a captação de energia através das forças eletromagnéticas induzidas pelo oscilador magnético. A equação para o circuito elétrico de captação de energia é obtida aplicando a Lei de Kirchoff para circuitos elétricos.

Logo:

$$i.(R_{load} + R_{int}) - \alpha.\dot{x} = 0 \quad (3.24)$$

Onde $i = \frac{dq}{dt}$ é a corrente elétrica, R_{load} e R_{int} são as resistências externa e interna respectivamente e α é o termo de acoplamento eletromecânico definido por $\alpha = N.l.B$ com N é o número de voltas da bobina, l o tamanho da bobina e B é a força média do campo magnético.

Amortecimento elétrico (c_e)

De acordo com a Lei de Faraday, o amortecimento elétrico surge devido à introdução da bobina para converter energia mecânica em elétrica. Assim, da equação 3.24, segue que

$$i = \frac{\alpha}{R_{load} + R_{int}} \dot{x} \quad (3.25)$$

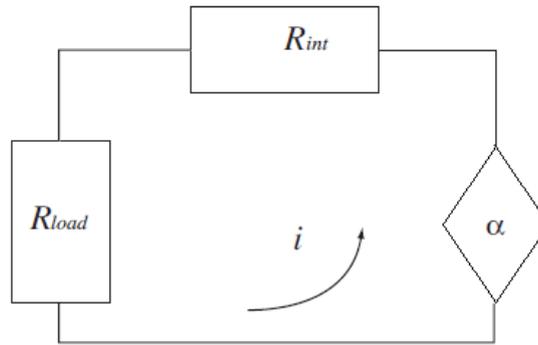


Figura 3.2: Diagrama do circuito de captação de energia.

Portanto,

$$c_e = \frac{\alpha^2}{R_{load} + R_{int}} \Rightarrow i = \frac{c_e}{\alpha} \cdot \dot{x} \Rightarrow \alpha \cdot i = c_e \cdot \dot{x} \quad (3.26)$$

Sendo assim, o termo $c_e \cdot \dot{x}$ deve ser introduzindo na equação 3.20.

$$\begin{cases} m\ddot{x} + kx + k_3x^3 + S\dot{q} + c_m\dot{x} + c_e\dot{x} = 0 \\ L_s\ddot{q} - S\dot{x} + \frac{1}{C_s}q + R_s\dot{q} = e\cos(\Omega t) \end{cases} \quad (3.27)$$

Dividindo a primeira equação por m e a segunda por L_s obtem-se:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{k}{m}x + \frac{k_3}{m}x^3 + \frac{S}{m}\dot{q} + \frac{c_m+c_e}{m}\dot{x} = 0 \\ \ddot{q} - \frac{S}{L_s}\dot{x} + \frac{1}{C_sL_s}q + \frac{R_s}{L_s}\dot{q} = \frac{e}{L_s}\cos(\Omega t) \end{cases} \quad (3.28)$$

Fazendo $\tau = \omega_0 t$, segue que:

$$\frac{d}{dt} = \omega_0 \frac{d}{d\tau}$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = \omega_0^2 \frac{d^2}{d\tau^2}$$

Com $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$

Introduzindo as variáveis adimensionais $X = \frac{x}{x_0}$ e $Q = \frac{q}{q_0}$ sendo assim

$$\dot{x} = x_0 \omega_0 X' \Rightarrow \ddot{x} = x_0 \omega_0^2 X''$$

$$\dot{q} = q_0 \omega_0 Q' \Rightarrow \ddot{q} = q_0 \omega_0^2 Q''$$

Logo, o sistema pode ser escrito na forma adimensional da seguinte forma:

$$\begin{cases} X'' + X + W_3 X^3 + \alpha_2 Q' + \alpha_1 X' = 0 \\ Q'' - \alpha_3 X' + W_4 Q + \alpha_4 Q' = E \cos(\Theta \tau) \end{cases} \quad (3.29)$$

Onde:

$$W_3 = \frac{k_3 x_0^2}{m \omega_0^2}, W_4 = \frac{1}{C_s L_s \omega_0^2}$$

$$\alpha_1 = \frac{c_m + c_e}{m \omega_0}, \alpha_2 = \frac{S q_0}{m \omega_0 x_0}, \alpha_3 = \frac{S x_0}{L_s \omega_0 q_0}, \alpha_4 = \frac{R_s}{L_s \omega_0}$$

$$E = \frac{e}{q_0 L_s \omega_0^2}, \Theta = \frac{\Omega}{\omega_0}$$

Capítulo 4

RESULTADOS NUMÉRICOS

Os parâmetros utilizados para as simulações numéricas estão na Tab. 3.1 cujos valores estão de acordo com Mann (2009).

Em geral, todos os parâmetros de Tab. 3.1 são considerados como padrão para as simulações a seguir. No entanto, alguns deles, tais como: a amplitude e de excitação, a rigidez e o amortecimento serão variados ao longo do trabalho, a fim de analisar a dinâmica e a coleta de energia do sistema.

É importante notar que um dos parâmetros que tem uma importância primordial para a Colheita é a amplitude da excitação externa E , porque maior a amplitude maior será a coleta de energia. No entanto a excitação externa depende dos valores de outros parâmetros.

Além disso, a condição inicial a ser considerada é $X = [0000]$.

Os parâmetros utilizados nas simulações serão identificados a seguir, Tabela 3, e estão de

acordo com Mann (2009).

Tabela 4.1: Parâmetros do Sistema utilizados para as simulações numéricas.

Parâmetros	Valores	Descrição
α_1	0.62	Amortecimento do Bloco
α_2	0.64944	Termo de acoplamento mecânico
α_3	0.64944	Termo de acoplamento elétrico
α_4	0.1499	Capacitância do vibrador eletrodinâmico
W_3	4.0	Rigidez cúbica do bloco central
W_4	9.108	Termo resistivo do vibrador eletrodinâmico
E	3.07	Amplitude de excitação externa
Θ	3.1215	Frequência de excitação externa
N	7	Número de voltas da bobina
B	36	Força média do campo magnético
l	1	Tamanho da bobina

Com os parâmetros apresentados na tabela 3.1, foram obtidos os resultados a seguir.

4.1 Comportamento dinâmico

O comportamento dinâmico do sistema foi analisado através de simulações numéricas usando um integrador ode113 (adams bashforth), e os algoritmos foram feitos em Matlab ®. A análise foi realizada observando o plano de fase, histórico do deslocamento no tempo, mapa de Poincaré, diagramas de bifurcação, cálculo do expoente de Lyapunov e bacia de atração.

A partir das equações dinâmicas do sistema, é possível observar vários parâmetros que são uma grande influência para o seu comportamento do sistema. Além disso, é possível observar um número limitado desses parâmetros a serem estudados. Portanto, o estudo da influência destes parâmetros no sistema é uma das maiores características envolvidas neste trabalho.

Utilizando os parâmetros apresentados na tabela 3.1, o sistema se demonstrou ter um comportamento irregular ou quasi-periódico como pode ser observado nas figuras 4.1 a seguir.

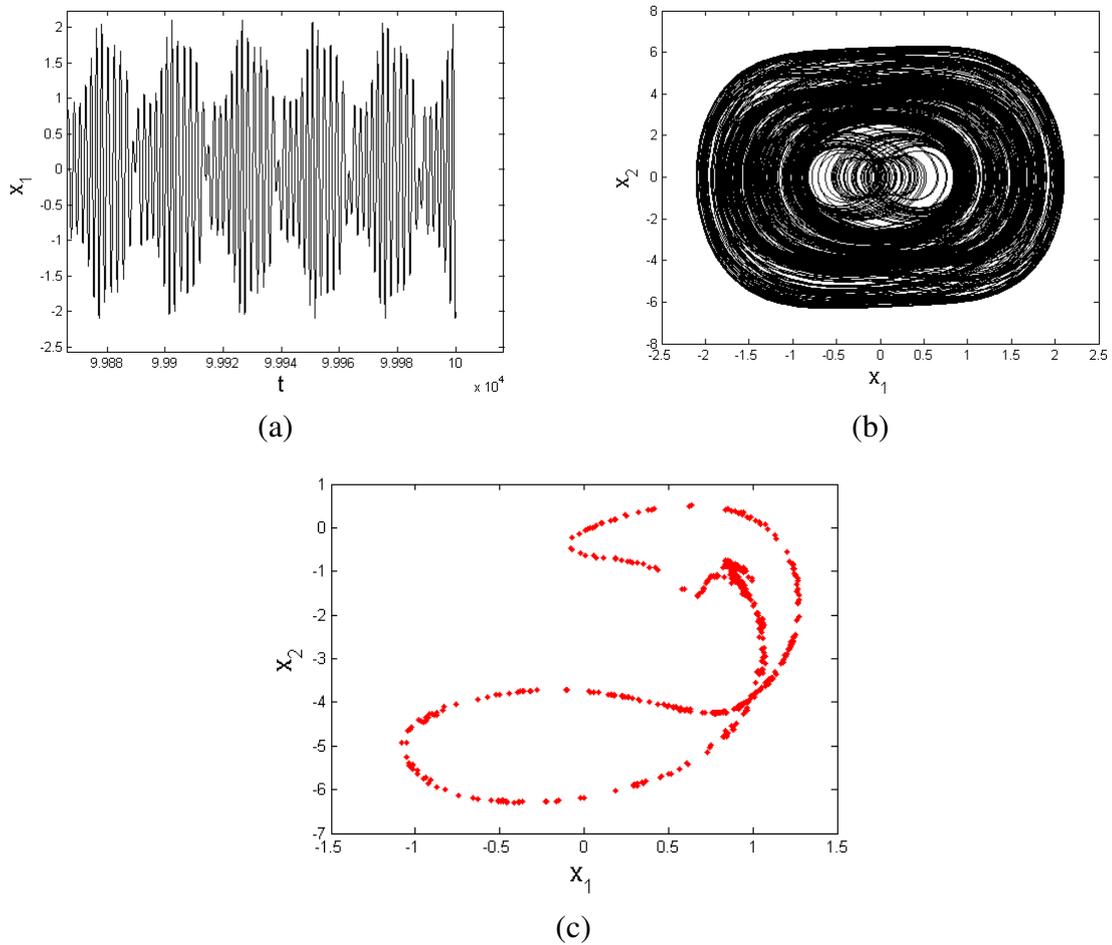


Figura 4.1: Comportamento do sistema (a) X_1 : Deslocamento da massa magnética central, (b) Plano fase X_1x_2 , (c) mapa de Poincaré X_1x_2

É possível observar também que, dependendo da condição inicial, o sistema tende a um dos dois atratores distintos. As figuras 4.2 e 4.3 mostram as bacias de atração para $E = 3.07$, $\alpha_1 = 0.62$ (fig.4.2) e $E = 3.12$, $\alpha_1 = 0.594$ (fig.4.3) que evidenciam tal afirmação.

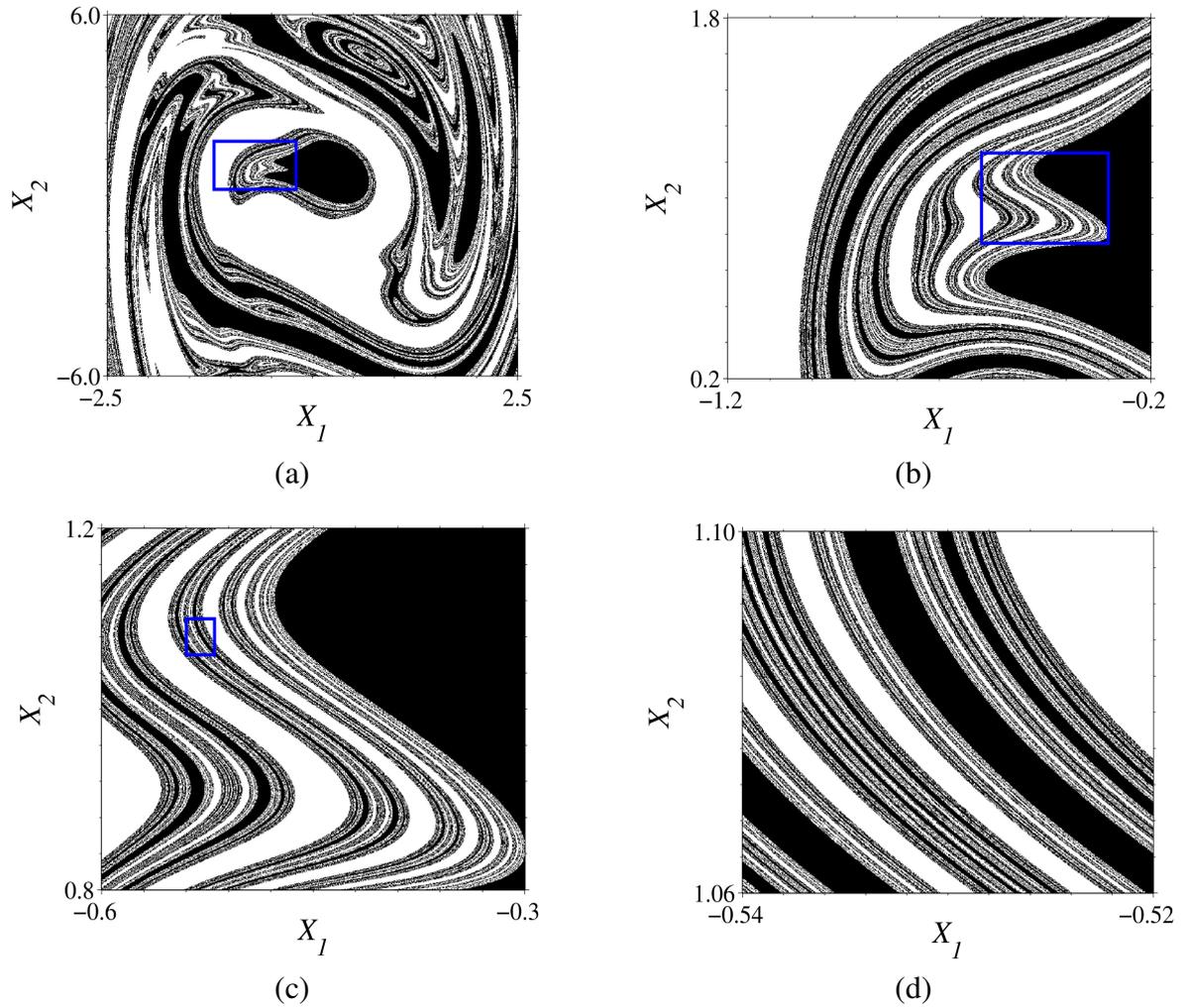


Figura 4.2: Bacia de atração $E = 3.07$, $\alpha_1 = 0.62$

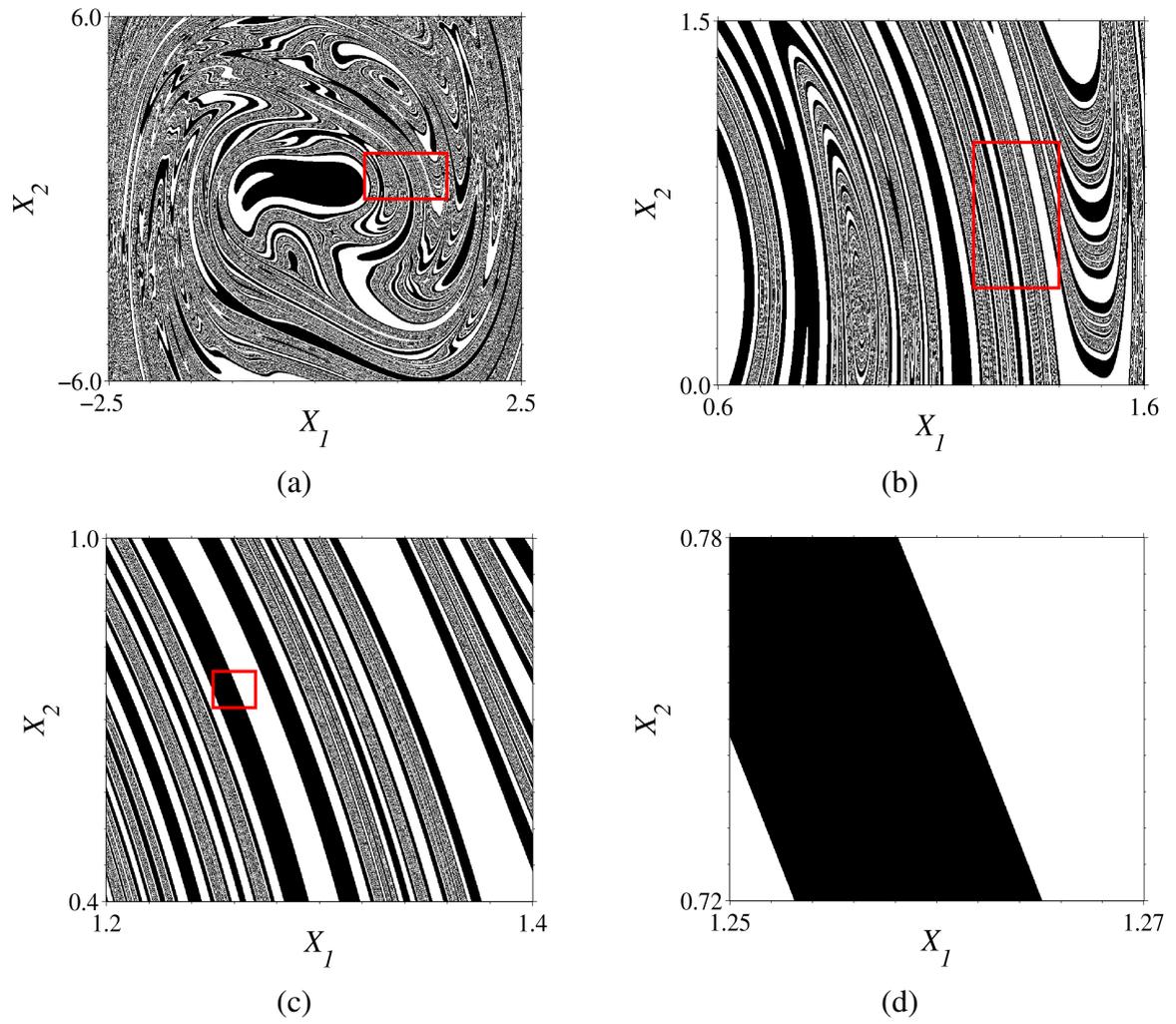


Figura 4.3: Bacia de atração $E = 3.12$, $\alpha_1 = 0.594$

A rigidez cúbica (W_3), o amortecimento (α_1) do sistema e a resistência do shaker (W_4) são alguns dos parâmetros mais importantes, pois mostram o quanto a não linearidade influencia na dinâmica do sistema. No entanto, a alteração desses parâmetros também podem diminuir e aumentar a coleta de energia.

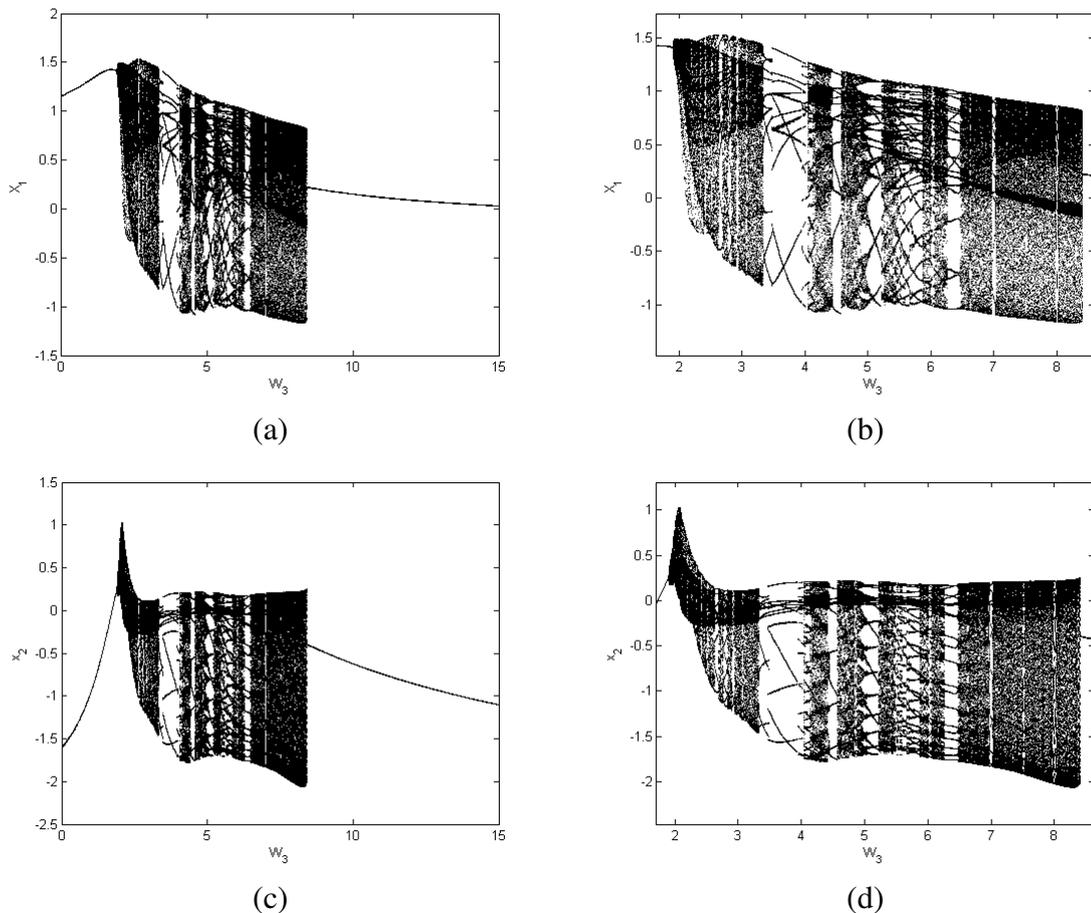


Figura 4.4: Diagrama de Bifurcação W_3 (a) resposta de X_1 para variação de W_3 , (b) zoom da resposta de X_1 para variação de $2 \leq W_3 \leq 8.5$, (c) resposta de X_2 para variação de W_3 , (d) zoom da resposta de X_2 para variação de $2 \leq W_3 \leq 8.5$

Os diagramas de bifurcação para W_3 e W_4 operando no intervalo de $0 \leq W_3 \leq 15$ e $0 \leq W_4 \leq 15$ são construídos nas Figs. 4.3a e 4.3c para observar o que acontece em cada intervalo de variação desses dois parâmetros. Nos intervalos $0 \leq W_3 \leq 2$ e $8.5 \leq W_3 \leq 15$, o sistema mantém-se periódico. No entanto, no intervalo $2 \leq W_3 \leq 8.5$, o sistema apresenta um movimento irregular, isto é, uma órbita quasiperiódica ou comportamento caótico. A região de aproximação no

intervalo $2 \leq W_3 \leq 8.5$ na Fig. 4.3b e 4.3d, é possível concluir que o movimento irregular tem regiões de órbita quasiperiódica e regiões caóticas.

O mesmo ocorre para o comportamento periódico para $0 \leq W_4 \leq 8.2$ e $9.9 \leq W_4 \leq 15$ e um comportamento que pode ser quasiperiódico ou caótico dependendo da região. (Fig4.4)

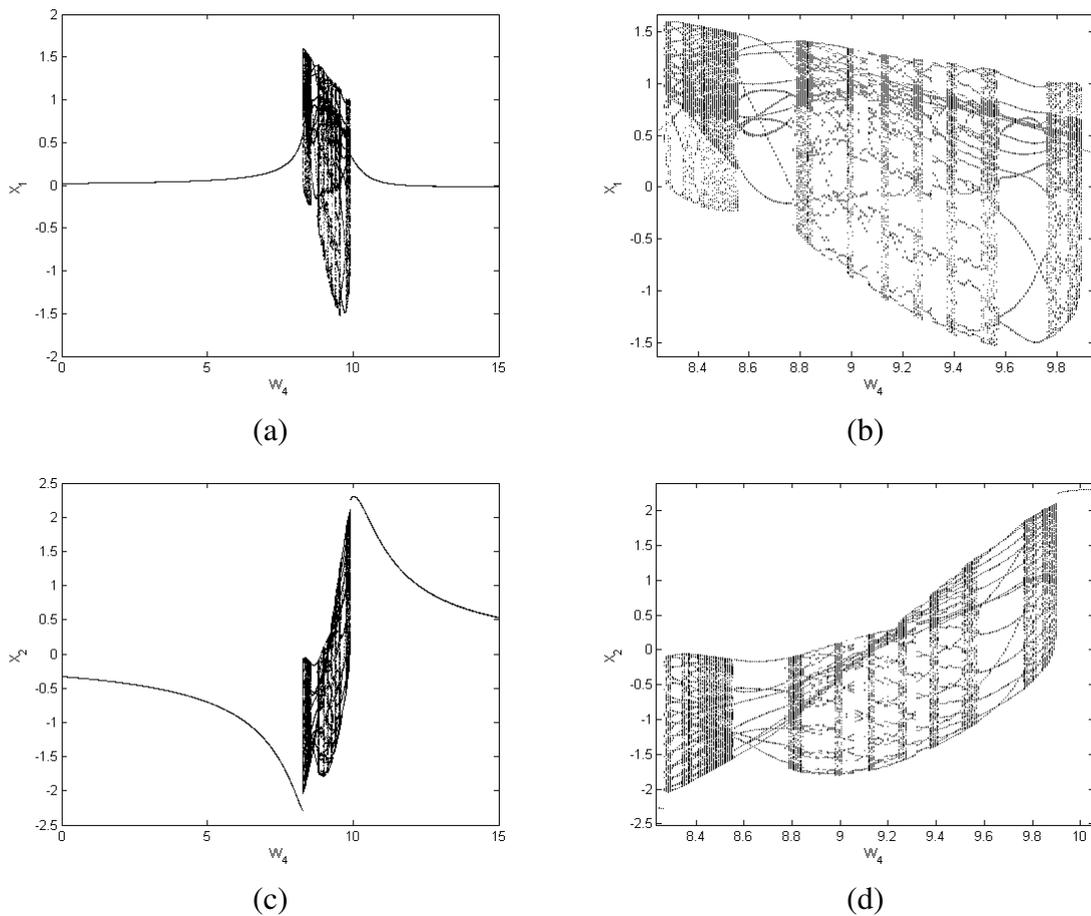


Figura 4.5: Diagrama de Bifurcação W_4 (a) resposta de X_1 para variação de W_4 , (b) zoom da resposta de X_1 para variação de $8.2 \leq W_4 \leq 10.0$, (c) resposta de X_2 para variação de W_3 , (d) zoom da resposta de X_2 para variação de $8.2 \leq W_4 \leq 10.0$

Somente após o cálculo do Expoente de Lyapunov e a verificação de pelo menos um expoente positivo é possível afirmar que o sistema apresenta um comportamento caótico.

Variando os parâmetros W_3 e W_4 nota-se que o sistema, observando figuras 4.5a e 4.5b, apresenta pelo menos um dos expoentes positivo, constatando a presença de caos para os valores de $W_3 = 4$ e $W_4 = 9.108$.

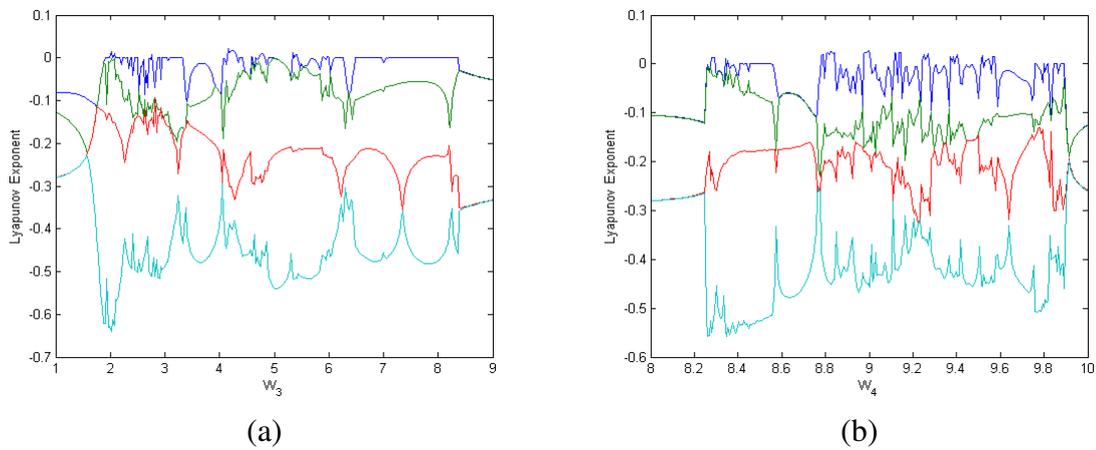
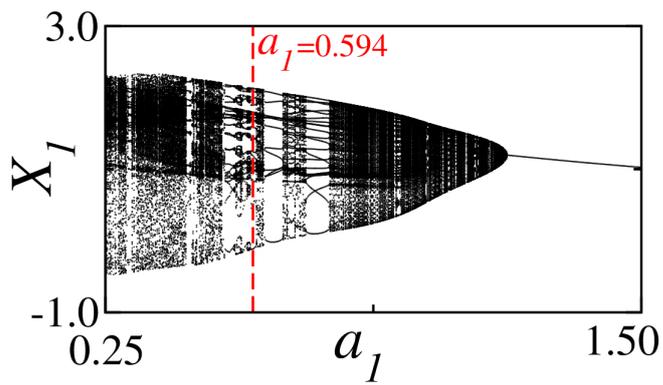
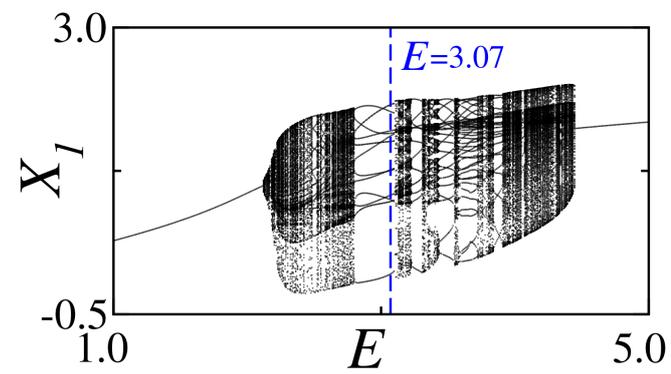


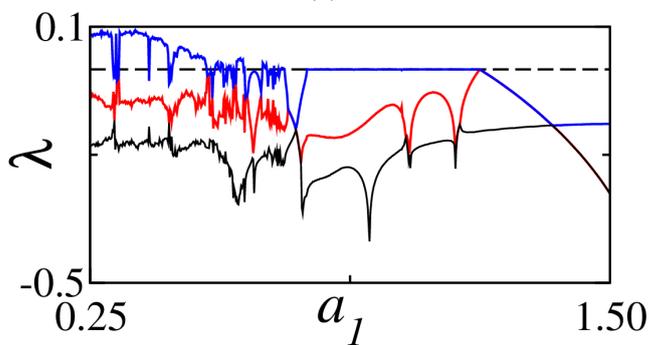
Figura 4.6: Expoente de Lyapunov (a) W_3 , (b) W_4



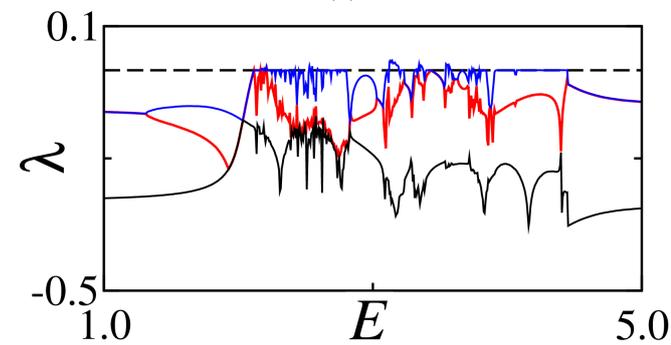
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 4.7: Diagrama de Bifurcação e Expoente de Lyapunov (a) e (b) Coeficiente de amortecimento do sistema mecânico α_1 , (c) e (d) Amplitude de excitação externa E

Fixando os valores de $W_3 = 4$ e $W_4 = 9.108$, e variando os valores da amplitude de excitação externa e do coeficiente de amortecimento do bloco em valores próximos á fronteira entre duas regiões (caótica e quasiperiodica) (figuras 4.6a e 4.6b), é possível verificar as configurações possíveis entre E e α_1 em que tem-se regiões de estabilidade (vermelho) ou instabilidade (azul). (Figuras 4.7 e 4.8)

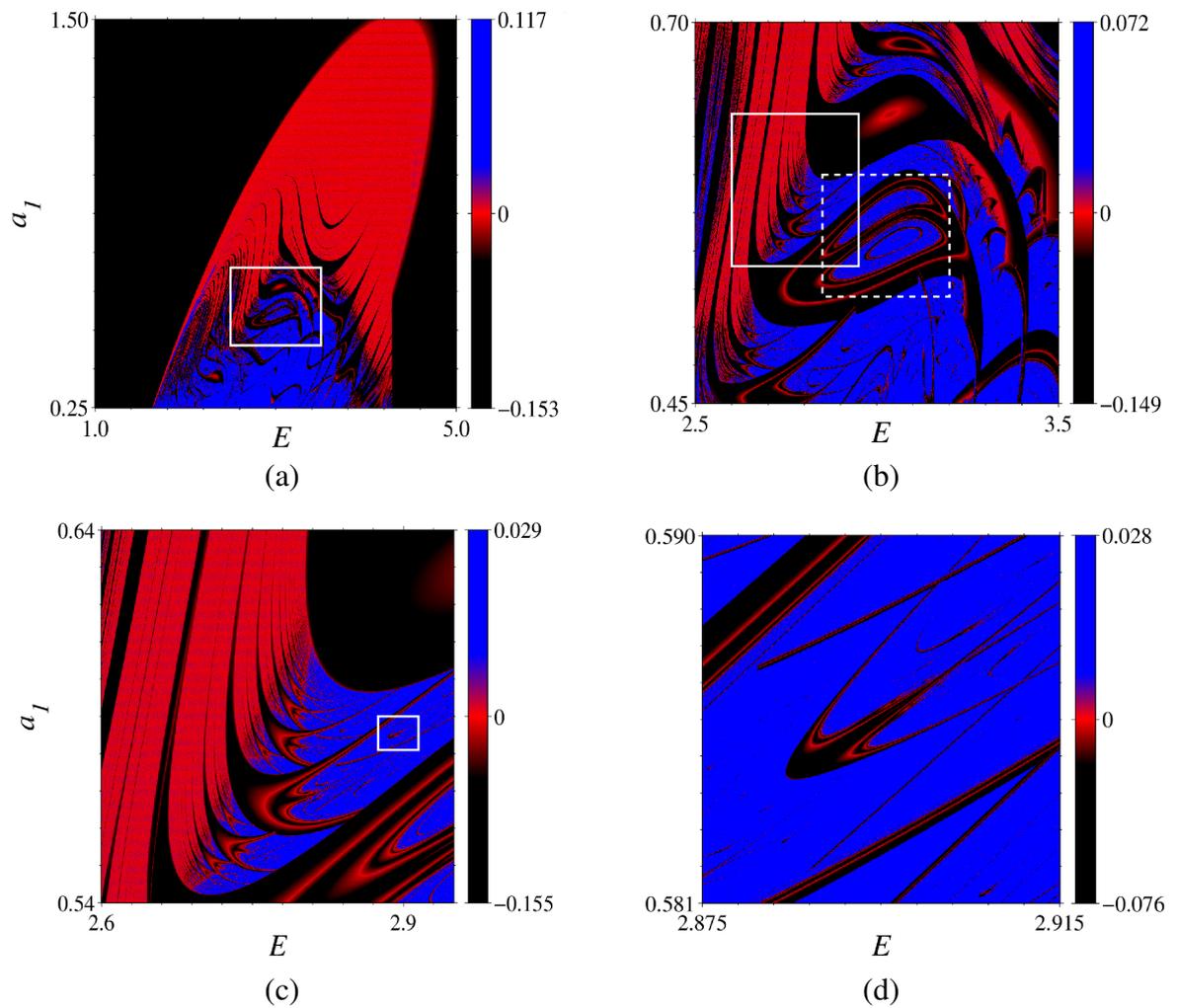


Figura 4.8: Diagrama de estabilidade bi dimensional

4.2 Projeto proposto para a coleta de energia

Nesta secção, as relações do circuito eléctrico, isto é, será definido o circuito de coleta de energia através de forças electromagnéticas induzidas pelo oscilador magnético, ilustrado na Fig. Fig3.1 . A equação para o circuito de coleta de energia é obtida pela aplicação da lei de Kirchoff para circuitos eléctricos, que é mostrada pela Eq. 4.1.

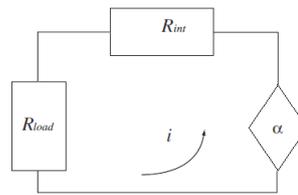


Figura 4.9: Diagrama do circuito de coleta de energia

$$i(R_{load} + R_{int}) - \alpha\dot{x} = 0 \quad (4.1)$$

Onde $i = \frac{dq}{dt}$ é a corrente eléctrica, R_{load} e R_{int} são as resistências externas e internas respectivamente e α é o termo de acoplamento eletromecânico definido para $\alpha = NLB$ com N é o Número de rotações da bobina, l o tamanho da bobina e B é a intensidade média do campo magnético.

De acordo com a Lei de Faraday, o amortecimento eléctrico é dado a partir da introdução da bobina para converter energia mecânica em eletricidade. Assim, a equação 4.1, segue que:

$$i = \frac{\alpha}{(R_{load} + R_{int})} \dot{x} \quad (4.2)$$

Portanto

$$c_e = \frac{\alpha^2}{(R_{load} + R_{int})} \Rightarrow i = \frac{c_e}{\alpha} \dot{x} \Rightarrow \alpha i = c_e \dot{x} \quad (4.3)$$

De acordo com a equação Eq. (4.3), a potência harvest pode ser escrita da seguinte forma:

$$P = i^2 R_{load} = \left(\frac{\alpha}{R_{load} + R_{int}} \dot{x} \right)^2 R_{load}$$

$$P_{dimensional} = \left(\frac{c_e}{\alpha} \dot{x} \right)^2 R_{load} \quad (4.4)$$

$$P_{adimensional} = (C_e X')^2 \quad (4.5)$$

Onde $C_e = \frac{c_e}{\alpha} x_0 \omega_0 \sqrt{R_{load}}$.

Com a mesma variação dos parâmetros α_1 e E utilizadas na figura 4.7, ($0.0 \leq \alpha_1 \leq 1.5$ e $1.0 \leq E \leq 5.0$) obtém-se a potência "harvesting" média para cada combinação dos parâmetros.

(figura 4.11)

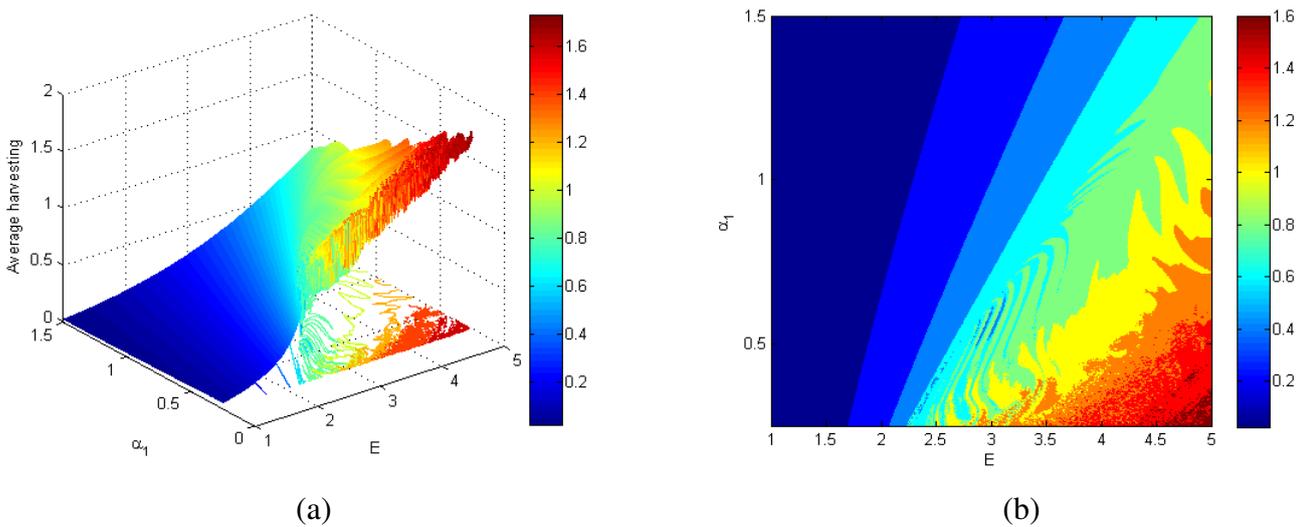


Figura 4.10: Colheita de energia:Variação do nível de captação de energia variando α_1 e E

Conforme a observação feita no início do capítulo, a figura 4.11 mostra que, quanto maior a amplitude de excitação externa, maior a energia colhida no sistema.

Porém, a quantidade de energia colhida depende, também, de outros parâmetros, entre eles a rigidez da massa magnética centro oscilante e a rigidez (W_3) do Shaker eletrodinâmico (W_4).

Variando esses dois parâmetros ($1 \leq W_3 \leq 9$) e ($8 \leq W_4 \leq 10$) é possível observar que a região de maior coleta de energia está em $2 \leq W_3 \leq 4$ e $9 \leq W_4 \leq 10$.

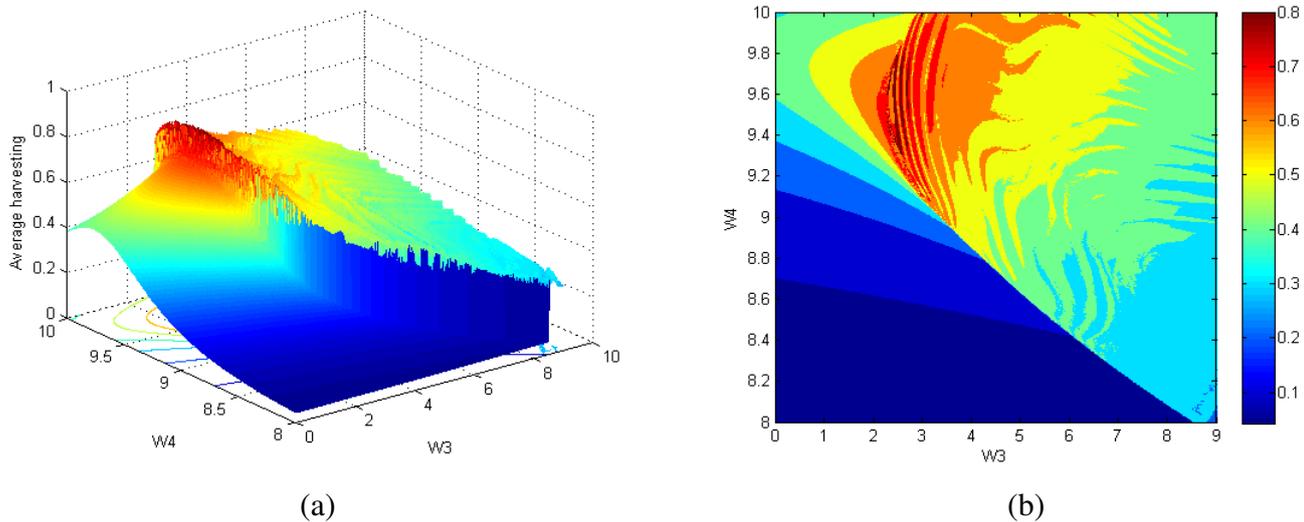


Figura 4.11: Colheita de energia: Variação do nível de captação de energia variando W_3 e W_4

Sendo assim, tomando $W_3 = 2.4269$ e $W_4 = 9.5631$ está em uma região de maior coleta de energia conforme mostra a figura 4.12.

Para essa configuração de valores, o sistema apresenta um comportamento periódico de período 1, tornando possível assim, a coleta de energia para o conjunto de parâmetros adotados, conforme mostram as figuras 4.13.

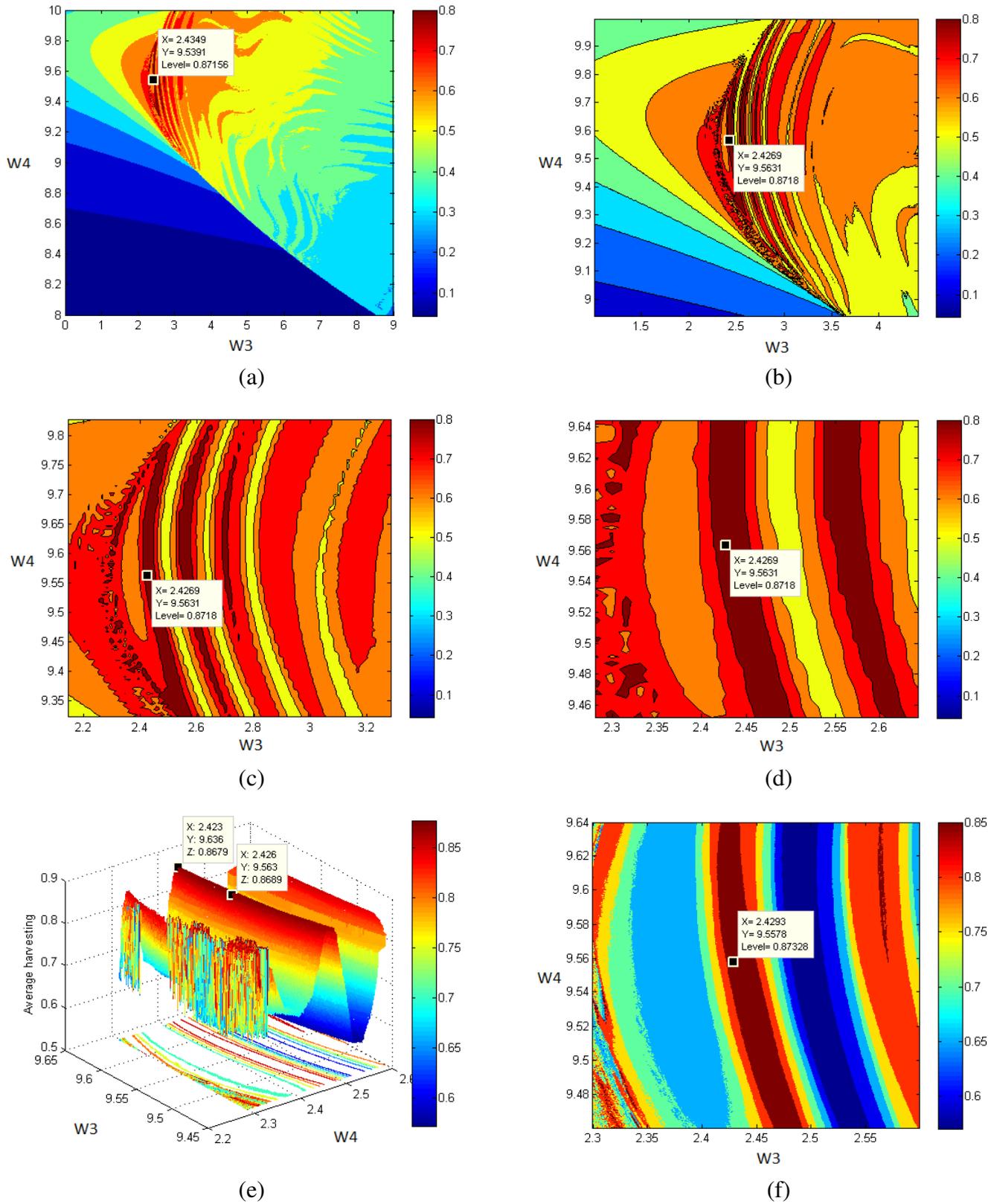


Figura 4.12: Colheita de energia variando a rigidez cúbica e a resistência do shaker

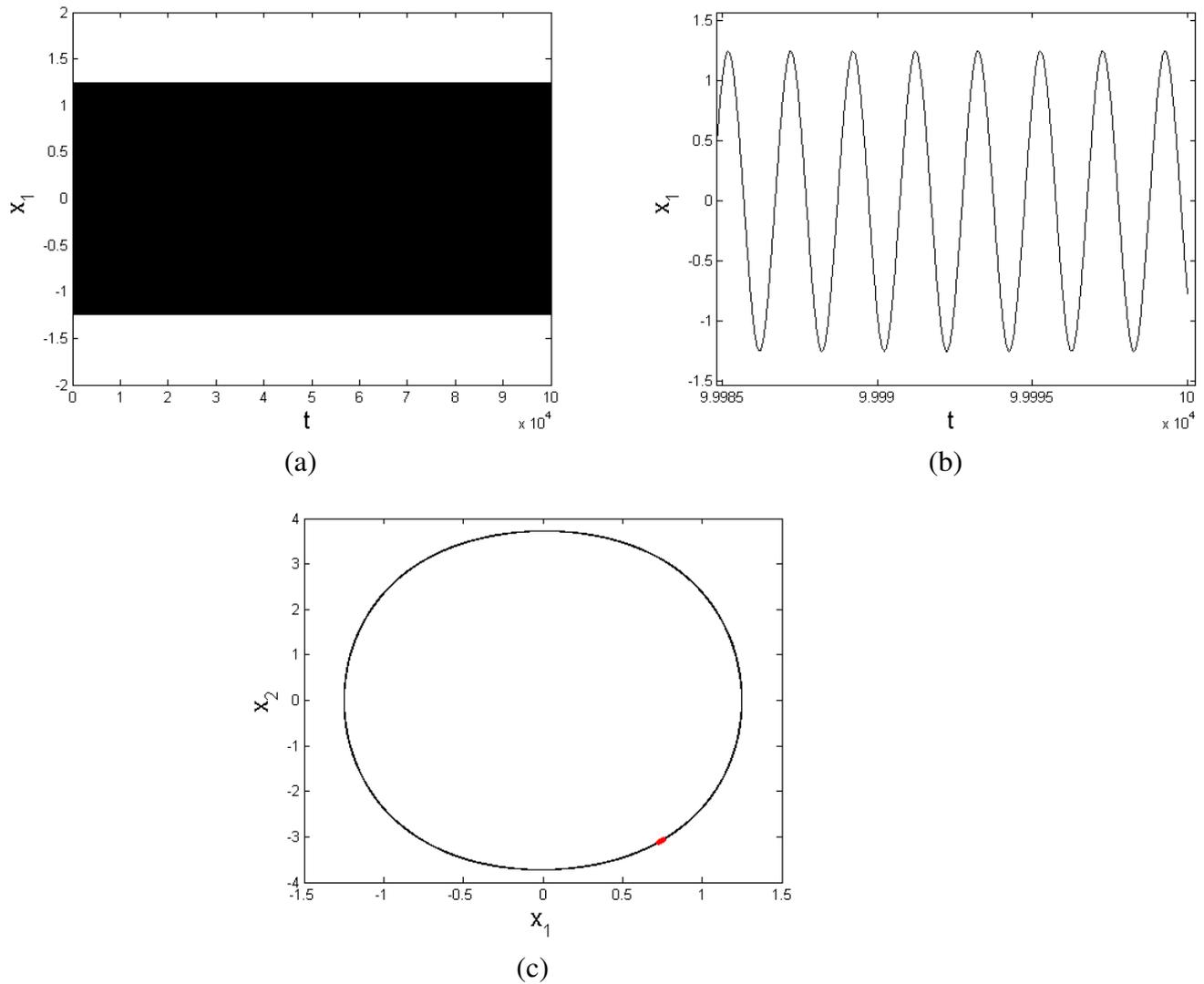


Figura 4.13: Comportamento dinâmico do sistema no ponto de máxima coleta de energia

W3\W4	7,3006	6,4028	5,4088	4,4309	3,4369	0,2427	1,5291
8,0842	0,0600	0,0581	0,0556	0,0537	0,0518	0,0496	0,0485
8,5932	0,3797	0,4560	0,4119	0,1202	0,1080	0,0994	0,0936
8,9419	0,4436	0,4143	0,4230	0,5032	0,2629	0,1949	0,1697
9,5632	0,5138	0,5194	0,5593	0,6020	0,6821	0,8731	0,5783
10,0000	0,5480	0,5917	0,5699	0,6439	0,5687	0,1487	0,4431

Figura 4.14: Potência harvest coletada

Capítulo 5

BUSCA DE UMA SOLUÇÃO

ANALÍTICA APROXIMADA

USANDO-SE O MÉTODO DAS

MÚLTIPLAS ESCALAS

O que caracteriza um método de perturbação é a escolha "a priori" da representação da solução, que é procurada como sendo série de potências de um pequeno parâmetro ε , ou seja, $x(t) \approx \sum \varepsilon^k \Phi_k(t)$. Em geral, as funções $\Phi_k(t)$ são soluções de equações diferenciais e quanto maior for o número de termos da série, melhor será a aproximação da solução.

Nayfeh apresenta uma descrição dos principais métodos de perturbação: método da expansão direta, técnica de Lindstead-Poincaré, método da renormalização, método da média e média generalizada e método das múltiplas escalas. Todos esses métodos são caracterizados pela presença do pequeno parâmetro ε , o qual aparece naturalmente ou é introduzido na equação

com a finalidade de obter solução analítica aproximada.

Um aspecto prático importante do método de perturbação consiste na substituição de um problema não linear por uma sequência de problemas lineares, que na verdade, constituem um único problema linear com dados recursivos.

O método das múltiplas escalas é um método de perturbação no qual introduzimos diferentes escalas de tempo como se fossem variáveis independentes distintas. Isso transforma o estudo do sistema de equações diferenciais ordinárias no estudo de um sistema de equações diferenciais parciais.

Essa aparente complexidade que o sistema ganha devido a introdução das transformações é compensada pelos fatos de conseguirmos encontrar uma solução livre de termos seculares mistos e propiciar a análise dos vários fenômenos de ressonância.

Da mesma forma que os termos seculares mistos, os fenômenos de ressonâncias internas são determinados pela expansão direta da solução do sistema. Termos ressonantes são também chamados pequenos divisores e podem ser primários ou secundários, dependendo da ordem da potência de ϵ em que aparecem na solução da expansão direta.

No método das múltiplas escalas, termos com pequenos divisores são transformados em termos seculares mistos através da introdução do parâmetro de sintonia ϵ , conseqüentemente, podem ser eliminados através da imposição das condições de eliminação de termos seculares. Essas condições fornecem as equações diferenciais que dão as funções que tornam a solução livre

de termos seculares mistos. Como, em geral, as equações obtidas também são não lineares, então a resolução dessas equações diferenciais pode ser tão difícil quanto a resolução das equações originais. No entanto, para os estados estacionários precisamos resolver e analisar um sistema de equações algébricas e, portanto, teoricamente, mais fácil de obter conclusões analíticas.

O método das múltiplas escalas tem a vantagem de que podemos trabalhar com notação complexa, o que torna mais claro e concisa as manipulações algébricas associado ao fato de possibilitar fazer a análise dos casos de ressonâncias internas que ocorrem no sistema. Na aplicação do método das múltiplas escalas vamos precisar analisar os diversos casos de ressonâncias existentes no sistema e, por isso, precisamos determinar os termos seculares e os termos que geram pequenos divisores. Termos que geram pequenos divisores dominam a solução do sistema e termos seculares tornam as soluções inválidas depois de um certo intervalo de tempo. Para a determinação de termos seculares e pequenos divisores encontramos a expansão direta da solução em série de potências de ϵ .

5.1 Pesquisa de uma Solução Analítica pelo Método de Escalas Múltiplas

O método das escalas múltiplas consiste em um método aplicado em equações não lineares que procuram uma solução analítica aproximada para rodear o comportamento modal do sistema acoplado. Portanto, é necessário encontrar soluções para uma grande ordem de tempo, isto é, escalas múltiplas de tempo ($T_n = \epsilon^n t$, thus: $T_0 = t$; $T_1 = \epsilon t$; $T_2 = \epsilon^2 t \dots$), uma vez que o parâmetro ϵ assume como um valor pequeno, porém indicando o balanço de ordem (Nayfeh, AH, 1981)

(Nayfeh, AH, Mook, DT, 1979).

Portanto, em primeiro lugar, as derivadas na variável t devem ser escritos em termos das derivadas de T_n como segue:

$$\frac{d}{dt} = D_0 + \varepsilon D_1 + \varepsilon^2 D_2 + \dots$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1 + \dots$$

where $D_n = \frac{\partial}{\partial T_n}$.

Considerando a solução aproximada das equações de movimento do sistema s Eqs. (5.1) e (5.2).

$$X = u_0 + \varepsilon u_1 \quad (5.1)$$

$$Q = v_0 + \varepsilon v_1 \quad (5.2)$$

Substituindo Eqs. (5.1) , (5.2) e suas respectivas derivadas, a solução, considerando apenas a 1a ordem, é dada pelas equações Eqs. (5.3) - (5.6).

$O(\varepsilon^0)$

$$D_0^2 u_0 + u_0 = 0 \quad (5.3)$$

$$D_0^2 v_0 + W_4 v_0 = 0 \quad (5.4)$$

$O(\varepsilon^1)$

$$D_0^2 u_1 + u_1 = -D_0 \alpha_1 u_0 - W_3 u_0^3 - D_0 \alpha_2 v_0 - 2D_0 D_1 u_0 \quad (5.5)$$

$$D_0^2 v_1 + W_4 v_1 = D_0 \alpha_3 u_0 - D_0 \alpha_4 v_0 - 2D_0 D_1 v_0 + E \cos(\Theta T_0) \quad (5.6)$$

Considerando as soluções de Eqs. (5.3) e (5.4) como:

$$u_0(T_0, T_1) = A_1(T_1) e^{iT_0} + \bar{A}_1(T_1) e^{-iT_0}$$

$$v_0(T_0, T_1) = A_2(T_1) e^{i\sqrt{W_4} T_0} + \bar{A}_2(T_1) e^{-i\sqrt{W_4} T_0}$$

e substituindo nas equações (5.5) and (5.6), tornando (5.7) e (5.8).

$$D_0^2 u_1 + u_1 = -i\alpha_1 A_1 e^{iT_0} - W_3 (A_1^3 e^{3iT_0} + 3A_1^2 \bar{A}_1 e^{iT_0}) - .. \\ i\sqrt{W_4} \alpha_2 A_2 e^{i\sqrt{W_4} T_0} - 2iA_1' e^{iT_0} + cc \quad (5.7)$$

$$D_0^2 v_1 + W_4 v_1 = i\alpha_3 A_1 e^{iT_0} - i\sqrt{W_4} \alpha_4 A_2 e^{i\sqrt{W_4} T_0} - ... \\ i2\sqrt{W_4} A_2' e^{i\sqrt{W_4} T_0} + \frac{1}{2} E e^{\Theta T_0} + cc \quad (5.8)$$

A partir deste ponto, duas seções serão consideradas discutindo as soluções do sistema considerando a ressonância da força externa com o Shaker, uma vez que a coleta máxima ocorre com o sistema em ressonância.

5.1.1 Caso ressonante

O caso ressonante considerará a ressonância entre a frequência da tensão de entrada com a frequência natural do Shaker eletrodinâmico. Portanto, as condições de solvabilidade dependerão,

$$\Theta = \sqrt{W_4} + \varepsilon\sigma$$

Portanto, os termos seculares das equações (5.7) e (5.8) passam a ser as equações (5.9) e (5.10).

$$-i\alpha_1 A_1 - 3W_3 A_1^2 \bar{A}_1 - i2A_1' = 0 \quad (5.9)$$

$$-i\sqrt{W_4} A_2 \alpha_4 - i2\sqrt{W_4} A_2' + \frac{1}{2} E e^{i\sigma T_1} = 0 \quad (5.10)$$

restando,

$$D_0^2 u_1 + u_1 = -W_3 A_1^3 e^{3iT_0} - i\sqrt{W_4} \alpha_2 A_2 e^{i\sqrt{W_4} T_0} + cc \quad (5.11)$$

$$D_0^2 v_1 + W_4 v_1 = i\alpha_3 A_1 e^{iT_0} + cc \quad (5.12)$$

Resolvendo as nova equações (5.11) e (5.12), As soluções de segunda ordem da solução completa são dadas pelas equações (5.13) e (5.14).

$$u_1 = \frac{W_3 A_1^3 e^{3iT_0}}{8} - i \frac{\alpha_2 \sqrt{W_4}}{1 - W_4} A_2 e^{i\sqrt{W_4} T_0} + cc \quad (5.13)$$

$$v_1 = i \frac{\alpha_3 A_1}{W_4 - 1} e^{iT_0} + cc \quad (5.14)$$

Eliminando o secular resolvendo as equações (??) and (??) nas constantes A_1 e A_2 , introduzindo a notação polar como a equação (??) e separando as equações (5.15) e (5.16) em parte real e parte imaginária, segue que:

\Re

$$\begin{aligned} a'_1 &= -\frac{\alpha_1 a_1}{2} \\ a'_2 &= -\frac{\alpha_4 a_2}{2} + \frac{E}{2\sqrt{W_4}} \sin \gamma \end{aligned} \quad (5.15)$$

\Im

$$\begin{aligned} a_1 \theta'_1 &= \frac{3}{8} W_3 a_1^3 \\ a_2 \theta'_2 &= -\frac{E}{2\sqrt{W_4}} \cos \gamma \end{aligned} \quad (5.16)$$

onde $\gamma = \sigma T_1 - \theta_2$.

As soluções de a_1 e θ_1 das equações (5.15) and (5.16) são dadas pelas equações (5.17) e (5.18).

$$a_1 = e^{-\frac{\alpha_1}{2} T_1} + a_0 \quad (5.17)$$

$$\theta_1 = \frac{3}{8} W_3 a_1^2 T_1 \quad (5.18)$$

Para a_2 e θ_2 das equações (5.15) e (5.16), elimina-se primeiramente θ_2 resultando na expressão a seguir:

$$\begin{aligned} a'_2 &= -\frac{\alpha_4 a_2}{2} + \frac{E}{2\sqrt{W_4}} \sin \gamma \\ \gamma' &= -\frac{E}{2a_2 \sqrt{W_4}} \cos \gamma - \sigma \end{aligned} \quad (5.19)$$

Para soluções do estado estacionário (órbitas periódicas) $a'_2 = \gamma' = 0$, a solução da equação (5.19) é dada por (5.20) e (5.21)

$$a_2 = \frac{E}{2\sqrt{W_4}\sigma} \cos\left(\arctan\left(\frac{\alpha_4}{2\sigma}\right)\right) \quad (5.20)$$

$$\theta_2 = \sigma T_1 - \arctan\left(\frac{\alpha_4}{2\sigma}\right) \quad (5.21)$$

Portanto, A solução aproximada do caso ressonante no regime de estado estacionário é dada pelas equações (6.1) e (6.2).

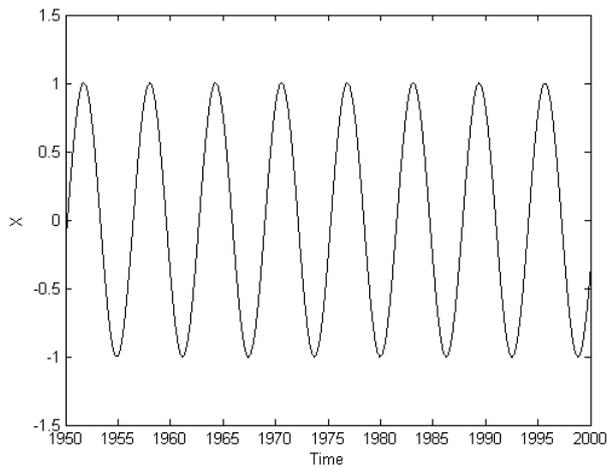
$$X = a_0 \cos \omega_1 t + \dots$$

$$\varepsilon \left[-\frac{W_3}{32} \cos 3\omega_1 t + \frac{\alpha_2 \sqrt{W_4}}{1 - W_4} \left(\frac{E}{2\sqrt{W_4}\sigma} \cos\left(\arctan\left(\frac{\alpha_4}{2\sigma}\right)\right) \right) \sin(\omega_2 t + \phi) \right] \quad (5.22)$$

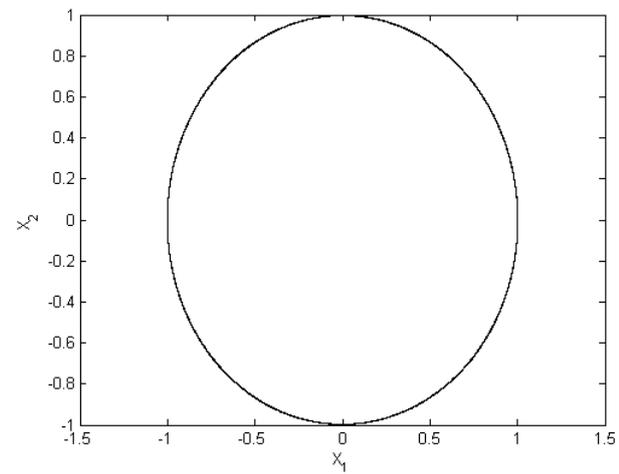
$$Q = \left(\frac{E}{2\sqrt{W_4}\sigma} \cos\left(\arctan\left(\frac{\alpha_4}{2\sigma}\right)\right) \right) \sin(\omega_2 t + \phi) - \varepsilon \frac{\alpha_3}{W_4 - 1} \sin a_0 \omega_1 t \quad (5.23)$$

onde $\omega_1 = -\frac{\alpha_1}{2}\varepsilon + \frac{3}{8}W_3 a_0^2 \varepsilon + 1$, and $\omega_2 = \sqrt{W_4} + \varepsilon\sigma$, $\phi = \arctan\left(\frac{\alpha_4}{2\sigma}\right)$.

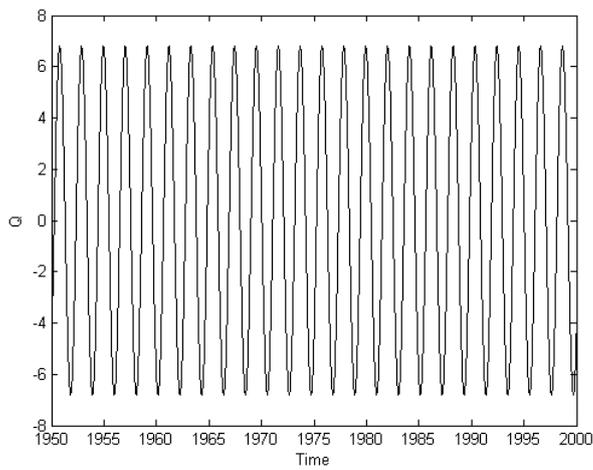
A potência obtida para essa solução foi de $P_{avg} = 0.7400$, cerca de 15% menor que o resultado obtido numericamente $P_{avg} = 0.8731$.



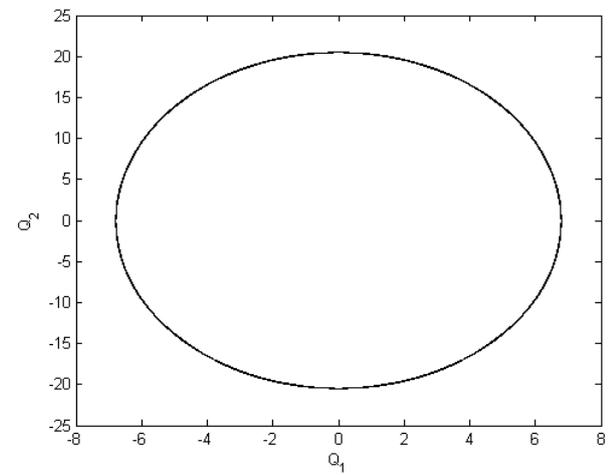
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1: Método das múltiplas escalas: a) Histórico no tempo X , b) Plano fase X , c) Histórico no tempo Q , d) Plano fase Q

W3\W4	7,3006	6,4028	5,4088	4,4309	3,4369	0,2427	1,5291
8,0842	0,0600	0,0581	0,0556	0,0537	0,0518	0,0496	0,0485
8,5932	0,3797	0,4560	0,4119	0,1202	0,1080	0,0994	0,0936
8,9419	0,4436	0,4143	0,4230	0,5032	0,2629	0,1949	0,1697
9,5632	0,5138	0,5194	0,5593	0,6020	0,6821	0,8731	0,5783
10,0000	0,5480	0,5917	0,5699	0,6439	0,5687	0,1487	0,4431

Colheita obtida numericamente	Colheita obtida através da solução analítica aproximada
0.8731	0.7400

Figura 5.2: Potência harvest coletada

Capítulo 6

CONCLUSÕES

No presente estudo proposto, é possível concluir e considerar alguns fatos importantes. Inicialmente foi possível perceber que o novo dispositivo maglev de captação de energia possui uma grande instabilidade devido à natureza de suas forças restauradoras. Além disso, o sistema possui um comportamento caótico que deve ser evitado para uma otimização da energia coletada. Diante do objetivo principal apresentado nesse trabalho, podemos concluir:

- O modelo matemático do sistema eletromecânico através das equações dinâmicas, gerou um novo dispositivo de coleta de energia que utiliza o campo magnético gerado por ímãs para transformar energia vibratória em energia elétrica;
- O comportamento do sistema a partir da variação dos parâmetros, demonstrou que para alguns valores apresenta comportamento periódico, enquanto para uma grande parte o comportamento mostrou-se irregular com características de comportamento caótico. Tal comportamento deve ser evitado a fim de obter a máxima coleta de energia;

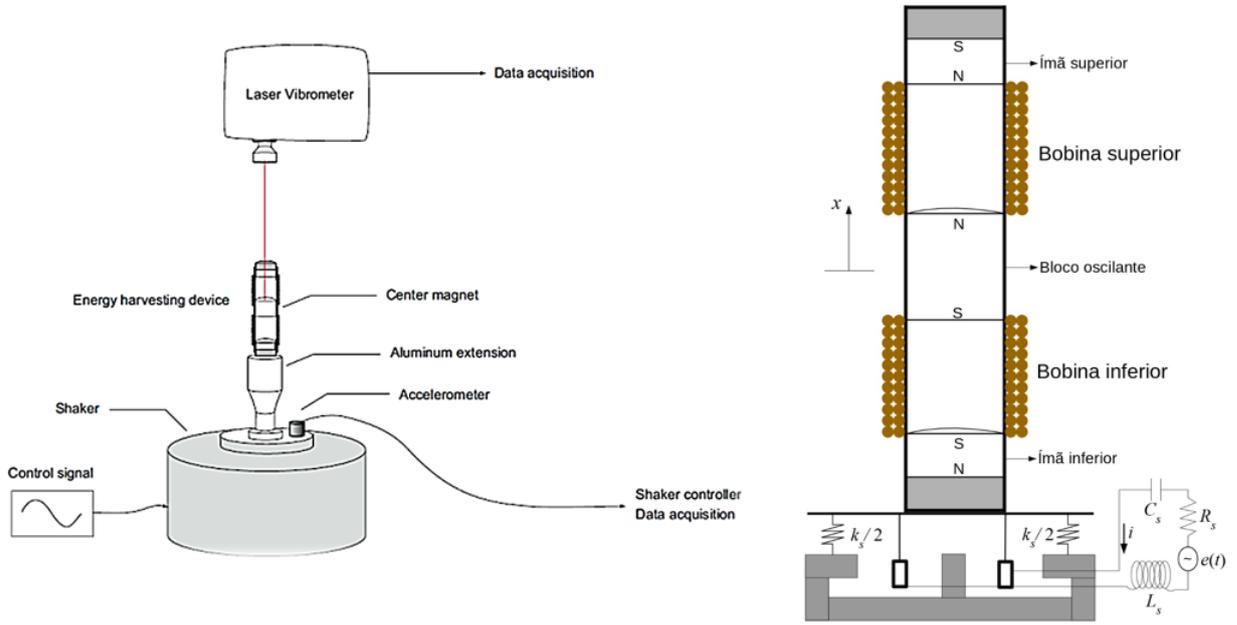


Figura 6.1: Novo modelo obtido a partir do modelo de Mann(2009)

- Foi possível verificar, na região estudada, que a região em torno de $W_3 = 2.4269$ e $W_4 = 9.5631$ são os melhores valores para coleta de energia;
- Quanto a solução analítica para o sistema através do método de múltiplas escalas. Foi possível observar a amplitude e a fase para o sistema através das equações

$$X = a_0 \cos \omega_1 t + \dots$$

$$\varepsilon \left[-\frac{W_3}{32} \cos 3\omega_1 t + \frac{\alpha_2 \sqrt{W_4}}{1 - W_4} \left(\frac{E}{2\sqrt{W_4}\sigma} \cos \left(\arctan \left(\frac{\alpha_4}{2\sigma} \right) \right) \right) \sin(\omega_2 t + \phi) \right] \quad (6.1)$$

$$Q = \left(\frac{E}{2\sqrt{W_4}\sigma} \cos \left(\arctan \left(\frac{\alpha_4}{2\sigma} \right) \right) \right) \sin(\omega_2 t + \phi) - \varepsilon \frac{\alpha_3}{W_4 - 1} \sin a_0 \omega_1 t \quad (6.2)$$

• Além disso, a potência coletada através da solução analítica foi cerca de 15,25% menor que a potência obtida numericamente, o que foi considerado satisfatório para os objetivos do trabalho.

W3\W4	7,3006	6,4028	5,4088	4,4309	3,4369	0,2427	1,5291
8,0842	0,0600	0,0581	0,0556	0,0537	0,0518	0,0496	0,0485
8,5932	0,3797	0,4560	0,4119	0,1202	0,1080	0,0994	0,0936
8,9419	0,4436	0,4143	0,4230	0,5032	0,2629	0,1949	0,1697
9,5632	0,5138	0,5194	0,5593	0,6020	0,6821	0,8731	0,5783
10,0000	0,5480	0,5917	0,5699	0,6439	0,5687	0,1487	0,4431

Colheita obtida numericamente	Colheita obtida através da solução analítica aproximada
0.8731	0.7400

Figura 6.2: Potência harvest coletada

Trabalhos Futuros

Com o intuito de aprofundar os resultados deste trabalho, as etapas propostas para compreensão deste tema são:

- Estudo aprofundado nos resultados obtidos com os diagramas do espaço dos parâmetros;
- Realizar uma possível experiência futura para comprovar os resultados obtidos numericamente e analiticamente;
- Intensificar o estudo teórico e prático quanto as turbinas MagLev.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, Adelheid Ingeborg Mahla. Estabilidade e Caos em Sistemas Dinâmicos Não Lineares: Aplicação no Sistema PLL-Dual. 1994. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas.

Amirtharajah, R., & Chandrakasan, A. P. (1998). Self-powered signal processing using vibration-based power generation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 33(5), 687–695. <http://doi.org/10.1109/4.668982>.

Anteneodo, C. (2004). Statistics of finite-time Lyapunov exponents in the Ulam map. *Physical Review E*, 69(1), 1–6. <http://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.016207>

Araújo, O.C. O Efeito Meissner em Super Turbinas Eólicas. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Física. Brasília - DF 2011.

Arbex, H.C., et al. (2014). On nonlinear dynamics behavior and control of a new model of a magnetically levitated vibrating system, excited by an unbalanced DC motor of limited power supply. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.

Arbex, Hassan Costa. Dinâmica não linear de sistemas de levitação magnética. 2012. 138 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia.

Barie, W., & Chiasson, J. (1996). Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation. *International Journal of Systems Science*, 27(11), 1153–1163. <http://doi.org/10.1080/00207729608929322>.

Belato, D., Weber, H. I., Balthazar, J. M., & Mook, D. T. (2001). Chaotic vibrations of a nonideal electro-mechanical system. *International Journal of Solids and Structures*, 38(10–13), 1699–1706. [http://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00130-X](http://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00130-X).

Beeby, S. P., Tudor, M. J., & White, N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 17(12), R175. <http://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>.

Blake, R. E. (2010). Basic vibration theory. *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 2.1-2.32. <http://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5079-3.50003-6>.

Braunbeck, W. (1939). Free suspension of bodies in electric and magnetic fields. *Zeitschrift Für Physik*, 112(11), pp753—763.

Carmichael, A. T. et al (1986). Magneticsuspension systems with digital controllers. *Rev. Sci. Instrum*, v57(8), 1611–1615.

Felix, Jorge Luis Palacios. Teoria de Sistemas Vibratórios Aporticados Não Lineares e Não Ideais. 2002. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

French, D. (1968). Electromagnetic suspension. *Electronics and Power*, 14(4), 176. <http://doi.org/10.1049/ep.1968.0170>.

Guilherme, Karen de Lolo. Vibrações Não-Lineares e Não-Ideais de um Sistema de Dois Graus de Liberdade. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

Harb, A. (2011). Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, 36(10), 2641–2654. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>.

Iliuk, I., et al. (2011). On a Vibrating Model of Energy Harvester, with Nonlinear Piezoelectric Coupling and Excited by a Non-ideal Motor Proceedings of 11th Conference on Dynamical Systems Theory and Applications, Lodz, Poland, p.391-396, ISBN: 978-83-7283-448.

Invernizzi, F., Dulio, S., Patrini, M., Guizzetti, G., & Mustarelli, P. (2016). Energy harvesting from human motion: materials and techniques. *Chem. Soc. Rev.*, 488(ii), 7411. <http://doi.org/10.1039/C5CS00812C>.

Kong, L. B., Li, T., Hng, H. H., Boey, F., Zhang, T., & Li, S. (2014). Waste Energy Harvesting (Vol. 24). <http://doi.org/10.1007/978-3-642-54634-1>.

Krasnopolskaya, T. S., & Shvets, A. Y. (1993). Chaos in vibrating systems with a limited power-supply. *Chaos* (Woodbury, N.Y.), 3(3), 387–395. <http://doi.org/10.1063/1.165946>.

Kulah, H., & Najafi, K. (2004). An Electromagnetic Micro Power Generator. 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 237–240. <http://doi.org/10.1109/MEMS.2004.1290566>.

Li, Z. et al. (2013). Electromagnetic Energy Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 62, n. 3.

Litak, G., Friswell, M. I., & Adhikari, S. (2010). Magnetopiezoelastic energy harvesting driven by random excitations. *American Institute of Physics, Applied Physics Letters* 96, 214-103.

Mann, B. P., & Sims, N. D. (2009). Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *Journal of Sound and Vibration*, 319(1–2), 515–530 <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.06.011>.

MARQUES, C. E. et al. (2014). Modelagem Matemática de uma Plataforma Oscilante, Com Excitação Harmônica em sua base, para a Colheita de Energia pelas Ondas do Mar. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM). Uberlândia – Minas Gerais – Brasil: [s.n.].

Mason, J. E. (2007). World energy analysis: H2 now or later? *Energy Policy*, 35(2), 1315–1329. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.024>.

Mateu, L., & Moll, F. (2005). Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics (Keynote Address). *Proc. SPIE 5837, VLSI Circuits and Systems II*, 5837, 359–373. <http://doi.org/10.1117/12.613046>.

Mescia, L., Losito, O., & Prudenzano, F. (2015). Innovative Materials and Systems for Energy Harvesting Applications. *Innovative Materials and Systems for Energy Harvesting Applications*. <http://doi.org/10.4018/978-1-4666-8254-2>.

Michels, H., & Pitz-Paal, R. (2007). Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. *Solar Energy*, 81(6), 829–837. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2006.09.008>.

Monteiro, Luiz Henrique Alves. (2002). *Sistemas Dinâmicos*. São Paulo: Livraria da Física. 527 p.

Moon, F. C. (2004). *Superconducting Levitation*. Book, Weinheim: Cap WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Moraes, Fernando de Haro. *Comportamento dinâmico não-linear de um sistema mecânico com vibrações associadas a uma transição brusca na rigidez*. 2012. 104 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia.

Nabavi, S., & Zhang, L. (2016). Portable wind energy harvesters for low-power applications: A survey. *Sensors (Switzerland)*, 16(7). <http://doi.org/10.3390/s16071101>.

Piccirillo, Vinícius, Nonlinear Dynamical and Control of a Modeling Vibrating System with Shape Memory and, Exited by Energy Sources of the Ideal and Non – Ideal Type, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2007.

Pinna, L., Dahiya, R. S., De Nisi, F., & Valle, M. (2010). Analysis of self-powered vibration-based energy scavenging system. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 402–408. <http://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637866>.

Priya, S. (2007). Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. Journal of Electroceramics, 19(1), 165–182. <http://doi.org/10.1007/s10832-007-9043-4>.

Priya, S., Innan, D. J. (2009). Energy Harvesting Technologies. Book, New York: Springer.

Renewable Energy World. Disponível em: <http://www.renewableenergyworld.com/index/tech.html>. Acesso em 10 de outubro de 2016.

Rocha, Fábio Krug. Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise de Estrutura Veicular. 2004. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004

Roundy,S., Wright, P.K., Rabaey, J. M. (2003). Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks. Book, New York: Springer.

Shafiee, S., & Topal, E. (2008). An econometrics view of worldwide fossil fuel consumption and the role of US. *ELSEVIER: Energy Policy*, 36, 775–786.

Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When fossil fuel reserves be diminished? *ELSEVIER, Energy Policy*, 37, 181–189.

Stephen, N. (2006). On the maximum power transfer theorem within electromechanical systems. v. 220, p. 1261–1267, <http://dx.doi.org/10.1243/09544062JMES304>.

Solar Excluss. Disponível em: <http://www.solar.excluss.com/wind-power/magnetic-levitation-wind-turbine-versus-other-turbines.html>> Acesso em 10 de outubro de 2016.

The Maglev: The Super-powered Magnetic Wind Turbine. Disponível em: <http://inhabitat.com/super-powered-magnetic-wind-turbine-maglev/html>. Acesso em 10 de outubro de 2016.

Tipler, P. A.; Mosca, G. (2009). Física para cientistas e engenheiros, v. 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Torres and G.A. Rincón-Mora. (2005). "Long-lasting, self-sustaining, and energy-harvesting system-in-package (SiP) wireless micro-sensor solution," International Conference on Energy, Environment, and Disasters (INCEED), Charlotte, NC.

Triplett, A.; Quinn, D. D. (2009). The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, n. 16, p.

1959–1967. ISSN 1045-389X.

Triplett, A.; Linton, J.; Quinn, D. D. Electromagnetic Energy Harvesting. In: 7th European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC). Rome - Italy: [s.n.], 2011.

Turbina de Levitação e Propulsão Magnética Eletromagnética <http://www.oocities.org/shazuga/html/turbina-lpem-br.html>. Acesso em 10 de outubro de 2016

Wong, T.H. (1986). Design of a magnetic levitation control systems – an undergraduate project. IEEE Transactions of Education, E-29(4), 196–200.

Yildiz, F. (2007). Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques. The Journal of Technology Studies, 40–48. <http://doi.org/10.21061/jots.v35i1.a.6>.

Vita

Hassan Costa Arbex nasceu em 22 de junho de 1977, em Botucatu, SP. Graduou-se em Matemática pela Universidade Estadual de São Paulo - Campus Rio Preto, Brasil, 2001 (Bacharelado) e 2003 (Licenciatura). Além disso, recebeu seu mestrado em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia Mecânica de Bauru da Universidade Estadual de São Paulo - Campus Bauru, Brasil, em 2012. Ingressou no curso de doutorado no Programa de Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia Mecânica de Bauru da Universidade Estadual de São Paulo - Campus Bauru, Brasil, no 1º semestre de 2014. Desde então, vem trabalhando sob a supervisão do Professor José Manoel Balthazar em muitos problemas de Dinâmica Não-Linear e Tema de Coleta de Energia.

Durante seus estudos na pós graduação, publicou artigos com seu supervisor e co-autores que estão listados acima.

Artigos completos publicados em periódicos

1. Arbex, Hassan Costa; Balthazar, José Manoel ; De Pontes Junior, Bento Rodrigues ; Da Fonseca Brasil, Reyolando Manoel LOPES Rebello ; Felix, Jorge Luis Palacios ; Tusset, Angelo Marcelo ; Bueno, Átila Madureira . On nonlinear dynamics behavior and control of a new model of a magnetically levitated vibrating system, excited by an unbalanced DC motor of limited

power supply. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 37, p. 1139-1150, 2014.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1.Hassan Costa Arbex; José Manoel Balthazar ; Angelo Marcelo Tusset ; Vinícius Piccirillo ; Reyolando Manoel Lopes Rebello Da Fonseca Brasil ; Jorge Luis Palacios Felix . On Energy harvesting from nonlinear Vibrations of a magnetic levitation system excited by an Electromechanical shaker. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2015, Rio de Janeiro, 2015.

2.Arbex, H. C.; Balthazar, J.M. ; Félix, J. L. P. ; Tusset, A. M. . On the nonlinear behavior of a maglev system. In: XV International Symposium on Dynamic Problem of Mechanics, 2013, Buzios, RJ. DINAME 2013, 2013, Buzios. XV International Symposium on Dynamic Problem of Mechanics, 2013. v. XV. p. 1-11.

3.Arbex, H. C.; Balthazar, J.M. ; Pontes Júnior, B. R. ; Brasil, R. M. L. R. F. ; Tusset, A. M. ; Félix, J. L. P. . Dinâmica não linear e controle de um sistema vibratório do tipo MAGLEV, excitado por um motor não ideal. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luiz, MA. CONEM, 2012, São Luis. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012. v. VII. p. 1-9.

4.Arbex, H. C.; Balthazar, J.M. ; Pontes Júnior, B. R. ; Brasil, R. M. L. R. F. ; Tusset, A. M. ; Félix, J. L. P. . Modelagem Matemática de um Sistema Vibratório Acoplado a um Absorvedor de Energia Não Linear (NES). In: ERMAC, 2012, Botucatu, SP. Anais do ERMAC 2012 - Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional., 2012. v. 1. p. 1-4.

5.ARBEX, H. C.; Balthazar, J.M. ; Brasil, R. M. L. R. F. ; Félix, J. L. P. ; Pontes Júnior, B. R. ; Tusset, A. M. . ON NONLINEAR DYNAMICS AND CONTROL OF A BLOCK, MAGNETICALLY LEVITED, EXCITED BY A NON-IDEAL ENGINE. In: COBEM, 2011,

Natal. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering October 24-28. RJ: ABCM, 2011. v. 21.

6. Arbex, H. C.; Balthazar, J.M. ; Pontes Júnior, B. R. ; Félix, J. L. P. ; Brasil, R. M. L. R. F. . DINÂMICA NÃO-LINEAR DE UM BLOCO MAGNÉTICAMENTE LEVITADO, EXCITADO POR UM MOTOR NÃO IDEAL. In: DINCON, 2011, Aguas de Lindóia. Dincon 2011: X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, 29 de agosto 02 de setembro de 2011. São Carlos, SP: SBMAC USP, 2011. v. 10.

7. Arbex, H. C.; Balthazar, J.M. . Dinâmica não linear de um Maglev. In: V Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011, Bauru. Anais do V Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011. v. 5.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

1. Balthazar, J. M. ; Brasil, R. M. L. R. F. ; Felix, Jorge Luis Palacios ; Tusset, Angelo Marcelo ; Piccirillo, V. ; Iliuk, I. ; Rocha R. T. ; Janzen, F. C. ; Marques, C. E. ; Arbex, Hassan Costa . TOUR OF NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF ELASTIC STRUCTURES. In: Symposium on the Mechanics of Slender Structures (MoSS2015), 2015, Northampton. proceedings of MoSS2015, 2015. v. v. 201.

Resumos publicados em anais de congressos

1. Arbex, H. C.; Balthazar, J.M. . TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA E DISSIPACÃO EM OSCILADORES ACOPLADOS A UM ABSORVEDOR ESSENCIALMENTE NÃO-LINEAR. In: IV Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica ? Unesp - Bauru, 2010, Bauru. Anais do IV Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Unesp - Bauru, 2010. v. 4.