

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**FENÔMENOS NÃO-LINEARES, INCLUINDO-SE OS
NÃO-IDEAIS, EM CAPTURA DE ENERGIA
UTILIZANDO-SE DISPOSITIVOS PIEZOELÉTRICOS**

Autor: Itamar Iliuk

Orientador: Prof. Titular José Manoel Balthazar

BAURU

2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**FENÔMENOS NÃO-LINEARES, INCLUINDO-SE OS
NÃO-IDEAIS, EM CAPTURA DE ENERGIA
UTILIZANDO-SE DISPOSITIVOS PIEZOELÉTRICOS**

Autor: Itamar Iliuk

Orientador: Prof. Titular José Manoel Balthazar

Curso: Mestrado em Engenharia Elétrica

Área de concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Mecatrônica

Dissertação de mestrado apresentada
à comissão de Pós Graduação da
Faculdade de Engenharia, como
requisito para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

BAURU

2012

Iliuk, Itamar.

Fenômenos Não-Lineares, incluindo-se os Não-Ideais, em Captura de Energia Utilizando-se Dispositivos PiezoElétricos / Itamar Iliuk, 2012
143 f.

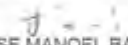
Orientador: José Manoel Balthazar

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1 Captura de Energia. 2. Caos. 3. Efeito Sommerfeld. 4. Sistema Não-Ideal. 5. Controle Robusto. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Fenômenos Não-Lineares, incluindo-se os Não-Ideais, em Captura de Energia Utilizando-se Dispositivos PiezoElétricos.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ITAMAR ILIUK, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 21 dias do mês de junho do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSE MANOEL BALTHAZAR do(a) Departamento de Estatística, Matemática Aplicada e Computação / Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro - UNESP, Prof. Dr. ANGELO MARCELO TUSSET do(a) Departamento de Engenharias / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Ponta Grossa, Prof. Dr. BENTO RODRIGUES DE PONTES JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ITAMAR ILIUK, intitulada "FENÔMENOS NÃO-LINEARES, INCLUINDO-SE OS NÃO-IDEAIS, EM CAPTURA DE ENERGIA UTILIZANDO-SE DISPOSITIVOS PIEZOELETRICOS". 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.


Prof. Dr. JOSE MANOEL BALTHAZAR


Prof. Dr. ANGELO MARCELO TUSSET


Prof. Dr. BENTO RODRIGUES DE PONTES JUNIOR

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu filho
Itamar Iliuk Júnior por ser o motivo
da minha existência.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me manter aqui neste mundo por um motivo que ainda não sei mas que tem sido uma busca muito interessante.

À Jeane Patricia dos Santos minha amiga, namorada, noiva, esposa e verdadeiramente companheira, que fez com que tudo o que estou vivendo hoje fosse possível, sem o seu incentivo e seu amor nada do que estou vivendo hoje aconteceria, com ela e por ela conheci um mundo de possibilidades que me levaram a ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais Estefano e Gerda que sempre acreditaram em mim e me deram forças para continuar, um muitíssimo obrigado.

Agradeço ao meu filho Itamar Júnior por aguentar firme a distância entre nós dois e ser a cada dia motivo de orgulho para mim.

Agradeço ao professor Titular José Manoel Balthazar por confiar em meu trabalho e me ajudar a crescer pessoal e profissionalmente.

Um especial agradecimento ao meu amigo Professor Doutor Angelo Marcelo Tusset por ter me indicado para fazer o mestrado, espero ter correspondido as suas expectativas.

Ao professor Doutor Bento sempre pronto a ajudar e aos demais professores do mestrado.

Aos meus colegas de mestrado Kléber, Willians, Hassan, Ricardo, Dailhane, Carlão que estiveram comigo nas horas de descontração e nas horas de estudo, onde trabalhamos realmente em grupo para alcançar nossos objetivos.

Ao Fernando e demais colegas do mestrado um obrigado pela amizade.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado. Ao Professor Aguiar, a todo Departamento de Engenharia Elétrica e a Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru por propiciarem as melhores condições para que esse trabalho fosse realizado.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais volta ao seu tamanho original.”

-Albert Einsten -

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Descrição do Trabalho	2
CAPÍTULO 2	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Revisão Bibliográfica	4
2.2 Captura de Energia do Ambiente	5
2.3 Piezoeletricidade	7
2.4 Modelos Matemáticos	9
2.4.1 Modelo Proposto por duToit e Wardle (2007)	9
2.4.2 Modelo Proposto por Erturk (2009)	10
2.4.3 Modelo Proposto por Triplett e Quinn (2009)	11
2.4.4 Modelo Proposto por Von Wagner e Hagedorn (2001)	12
2.5 Característica da Fonte de Energia	13
2.6 Tipos de Sistemas de Captura de Energia de Vibrações	14
2.6.1 Dispositivo de Captura de Energia Eletrostático	15
2.6.2 Dispositivo de Captura de Energia Eletromagnético	16
2.6.3 Dispositivo de Captura de Energia Piezoelétrico	17
2.7 Modos de Operação do Transdutor Piezoelétrico	18
2.8 Não-linearidade Piezoelétrica	20
CAPÍTULO 3	24
3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA	24
3.1. Considerações Gerais	24
3.2. Modelagem Matemática do Sistema de Captura de Energia Não-Ideal (SCENI)	24
3.2.1. Obtenção das Equações do Movimento	27
3.2.2. Adimensionalização do Sistema	29
3.3. Equações do Modelo Ideal	31
CAPÍTULO 4	32
4. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	32
4.1. Análise do Modelo de Captação de Energia Ideal	32
4.1.1. Caso Linear	33
4.1.2. Caso Não-Linear	36
4.2. Análise do Sistema de Captura de Energia Não-Ideal	40
4.2.1. Resposta Dinâmica do Sistema Excitado por um Motor com Relação Linear Torque-Velocidade	41
4.2.1.1. Captura de Energia Linear	42

4.2.1.2.	Captura de Energia Não-Linear	44
4.2.1.3.	Comportamento Caótico do Sistema	47
4.2.2.	Resposta Dinâmica do Sistema Excitado por um Motor com Relação Exponencial Torque-Velocidade	49
4.2.2.1.	Captura de Energia Linear	50
4.2.2.2.	Captura de Energia Não-Linear	51
4.2.2.3.	Comportamento Caótico do Sistema	54
4.3.	Análise da Influência do Efeito Sommerfeld	56
4.3.1.	Primeiro Caso: Captura de Energia Linear	57
4.3.2.	Segundo Caso: Captura de Energia Não-Linear	59
	CAPÍTULO 5	67
5.	BUSCA POR UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA APROXIMADA PARA O MODELO NÃO-IDEAL	67
5.1.	Busca de uma Solução Analítica Aproximada para o Modelo Não-Ideal na Região Próxima a Ressonância	68
5.2.	Solução Analítica Sobre a Dinâmica do Sistema	73
	CAPÍTULO 6	76
6.	MÉTODOS DE CONTROLE APLICADOS A SISTEMAS NÃO-IDEAIS E CAÓTICOS	76
6.1.	Método de Controle (SDRE)	78
6.2.	Método de Controle LQR	80
6.3.	Método de Controle de Retroalimentação que Altera a Energia de Oscilação Proposto por Tereshko	85
6.4.	Aplicação dos Métodos de Controle	89
6.4.1.	Aplicação do Método SDRE ao Sistema Não-Ideal	90
6.4.1.1.	Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Linear Torque-Velocidade	90
6.4.1.2.	Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Exponencial Torque-Velocidade	94
6.4.2.	Aplicação do Controle LQR	97
6.4.2.1.	Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Linear Torque-Velocidade	98
6.4.2.2.	Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Exponencial Torque-Velocidade	102
6.4.3.	Aplicação do Método de Controle de Retroalimentação que Altera a Energia de Oscilação Proposto por Tereshko	105
6.4.3.1.	Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Linear Torque-Velocidade	106
6.4.3.2.	Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Exponencial Torque-Velocidade	108
	CAPÍTULO 7	111
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	111
	CAPÍTULO 8	114
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
	SÚMULA CURRICULAR	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo de Captura de Energia do Ambiente (Fujitsu, 2010)	6
Figura 2.2 – a) Efeito Piezoelétrico Direto; b) Efeito Piezoelétrico Inverso (Silva et al, 2009)	8
Figura 2.3 – Configuração do tipo bimorph com conexão em série duToit e Wardle (2007)	10
Figura 2.4 – Modelo piezoelétrico estudado por Erturk (2009)	11
Figura 2.5 – Modelo proposto por Triplett e Quinn (2009)	12
Figura 2.6 – Modelo proposto por Von Wagner e Hagedorn (2001)	12
Figura 2.7 – Representação das curvas características de um motor elétrico a) Exponencial $ae^{-b\dot{\phi}}$, b) Linear $a - b\dot{\phi}$ (Rafikova, 2006)	13
Figura 2.8 – a) Variação de sobreposição no plano, b) diminuição da distância no plano, c) diminuição da distância fora do plano, (Cottone, 2007)	15
Figura 2.9 - a) Desenho de um gerador de indução, b) Seção do gerador eletromagnético em escala de <i>wafer</i> ou lâmina (Cottone, 2007)	16
Figura 2.10 – a) Modelo conceitual gerador piezoelértico, b) Circuito equivalente de um gerador piezoelétrico (Cottone, 2007)	17
Figura 2.11 – Modos de Operação do Transdutor Piezoelétrico (Priya e Inman, 2009)	19
Figura 2.12 – (a) Viga em balanço com massa na extremidade livre, (b) PZT multicamadas submetido a vibração transversal excitando a base, e (c) Sistema massa-mola de parâmetros concentrados equivalente de um corpo rígido em vibração (Priya e Inman, 2009)	19
Figura 2.13 - Não-linearidade Histerese em (a) Os materiais magnéticos, (b) Os materiais piezoelétricos, e (c) ligas com memória de forma (Jalili, 2010)	20
Figura 2.14 - Dependência de d_{31}^* sobre a tensão induzida. A curva experimental representação de Crawley e Anderson (1990).	22
Figura 2.15 – Função de Aproximação da não-linearidade piezoelétrica definida por Triplett e Quinn (2009)	23
Figura 3.1 – Modelo Proposto do Sistema de Captura de Energia Não-Ideal (SCENI)	25

Figura 4.1 - Históricos no tempo, Deslocamento (à esquerda) e Velocidade (à direita).	33
Figura 4.2 - Retrato de Fase no plano x-y (à esquerda) e Retrato de Fase em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).	34
Figura 4.3 - Históricos no tempo: da Carga Elétrica (à esquerda) e da Potência Máxima de Capturada (à direita).	34
Figura 4.4 - Seção de Poincaré no plano x-y (à esquerda) e Seção de Poincaré em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).	35
Figura 4.5 - Caso linear com coeficiente de acoplamento não-linear $\Theta=0$, e com a variação do valor do coeficiente de acoplamento linear θ ; preto: Deslocamento do Sistema, cinza: Potência Máxima Capturada.	35
Figura 4.6 - Históricos no tempo, Deslocamento (à esquerda) e Velocidade (à direita).	36
Figura 4.7 - Retrato de Fase no plano x-y (à esquerda) e Retrato de Fase em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).	37
Figura 4.8 - Históricos no tempo: da Carga Elétrica (à esquerda) e da Potência Máxima Capturada (à direita).	37
Figura 4.9 - Seção de Poincaré no plano x-y (à esquerda) e Seção de Poincaré em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).	38
Figura 4.10 - Caso não-linear com coeficiente de acoplamento não-linear $\Theta=1.00$, e com a variação do valor do coeficiente de acoplamento linear θ ; preto: Deslocamento do Sistema, cinza: Potência Máxima Capturada.	39
Figura 4.11 - Potência máxima alcançada com coeficiente de acoplamento linear $\theta=1.00$, e com a variação do valor do coeficiente de acoplamento não-linear Θ ; preto: Deslocamento do Sistema, cinza: Potência Máxima Capturada.	40
Figura 4.12 – Com $\theta = 0.00$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	42
Figura 4.13 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	43
Figura 4.14 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	45

Figura 4.15 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	46
Figura 4.16 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	47
Figura 4.17 – Com $\theta = 0.10$ e $\Theta = 0.50$: Comportamento Caótico do Sistema: em (a) Retrato de Fase; (b) Histórico de Deslocamento no Tempo; (c) Potência Máxima Capturada; (d) em azul Maior Expoente de Lyapunov	48
Figura 4.18 – Efeito Sommerfeld e Comportamento Caótico	49
Figura 4.19 – Com $\theta = 0.00$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	50
Figura 4.20 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	51
Figura 4.21 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	52
Figura 4.22 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	53
Figura 4.23 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor	54
Figura 4.24 - Com $\theta = 0.10$ e $\Theta = 0.50$: Comportamento Caótico do Sistema: em (a) Retrato de Fase; (b) Histórico de Deslocamento no Tempo; (c) Potência Máxima Capturada; (d) em azul Maior Expoente de Lyapunov	55
Figura 4.25 - Efeito Sommerfeld e Comportamento Caótico	56
Figura 4.26 - Respostas do Sistema para Incrementos de θ linear = 0 à 1.50, Θ não-linear = 0.00; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada	59
Figura 4.27 - Respostas do Sistema para Incrementos de Θ não-linear = 0 à 1.50, θ linear = 0.50; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada	61
Figura 4.28 - Respostas do Sistema para Incrementos de Θ não-linear = 0 à 1.50, θ linear = 1.00; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade	63

Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada

Figura 4.29 - Respostas do Sistema para Incrementos de Θ não-linear = 0 à 1.50, θ linear = 1.50; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada	65
Figura 5. 1 – Retrato de Fase obtido através da aplicação do método da média	72
Figura 5. 2 - Deslocamento Periódico obtido através da aplicação do método da média	73
Figura 5.3 - Motor com relação linear torque-velocidade: em preto retrato de fase da dinâmica do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média	74
Figura 5.4 - Motor com relação linear torque-velocidade: em preto histórico no tempo do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média	74
Figura 5.5 - Motor com relação exponencial torque-velocidade: em preto retrato de fase da dinâmica do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média	75
Figura 5.6 - Motor com relação exponencial torque-velocidade: em preto histórico no tempo do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média	75
Figura 6.1 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle	92
Figura 6.2 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle	93
Figura 6.3 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle	93
Figura 6.4 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle	96
Figura 6.5 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle	96
Figura 6.6 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle	97
Figura 6.7 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle	100
Figura 6.8 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle	101

Figura 6.9 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle	101
Figura 6.10 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle	103
Figura 6.11 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle	104
Figura 6.12 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle	104
Figura 6.13 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle	106
Figura 6.14 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle	107
Figura 6.15 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle	107
Figura 6.16 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle	108
Figura 6.17 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle	109
Figura 6.18 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resultados para θ linear = 0 à 1.50, neste caso Θ não-linear = 0.00	58
Tabela 4.2 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 0.50	60
Tabela 4.3 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 1.00	62
Tabela 4.4 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 1.50	66
Tabela 4.5 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 1.50	66

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

t	Tempo
T	Período
A	Matriz de estado dependente
F	Vetor não-linear
U	Termo de controle
u_f	Controle por pré-alimentação
U	Controle de realimentação
B	Vetor bidimennsional
$P(x)$	Função de Riccati
Q, R	Matrizes LQR
X, x	Posição
$\dot{X}, \dot{x}$	Velocidade
$\ddot{X}, \ddot{x}$	Aceleração
M	Massa total
m_1	Massa viga
m_0	Massa desbalanceada
I	Momento de Inércia em Relação ao Centro de Rotação
J	Momento de Inércia do Rotor
r	Excentricidade
q	Carga
R	Resistência elétrica
V	Tensão Elétrica
c	Amortecimento
H	Torque resistivo
L	Torque acionamento
K	Rigidez Linear
k_1	Mola linear
k_2	Mola cúbica

C	Capacitância piezoelétrica
i	Corrente elétrica
d	Coeficiente de acoplamento piezoelétrico
P	Potência elétrica
g	Aceleração da gravidade
E	Energia Cinética

LETRAS GREGAS

ω_0	Frequência natural
Ω	Frequência de excitação
τ	Tempo adimensional
φ	Deslocamento angular
$\dot{\varphi}$	Velocidade angular
θ	Acoplamento piezoelétrico linear
Θ	Acoplamento piezoelétrico não-linear
ρ	Constante de tempo elétrica adimensional
μ_1	Parâmetro de controle
μ_2	Parâmetro motor
Υ	Amplitude de excitação
ϕ	Lagrangeana
ϑ	Energia potencial
κ	Parâmetro de controle Tereshko
χ	Parâmetro de controle Tereshko

Iliuk, Itamar, Fenômenos Não-Lineares, Incluindo-se os Não-Ideais, em Captura de Energia Utilizando-se Dispositivos Piezoelétricos. Bauru: Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2011, 143 pp., Dissertação (Mestrado).

RESUMO

Nos últimos anos, a pesquisa sobre captura de energia, tem aumentado substancialmente. Muitos pesquisadores têm concentrado seus esforços em encontrar a melhor configuração para estes sistemas e para otimizar sua potência de saída. No processo de captura de energia, a energia elétrica é obtida através da conversão de energia mecânica, criado por uma fonte de vibração do ambiente através de um transdutor, por exemplo, um fino filme piezocerâmico. Diferentes mecanismos de acoplamento eletromecânico têm sido desenvolvidos para dispositivos de captura, e um interesse particular tem sido dado ao uso de modelos que transformam a vibração mecânica em corrente elétrica utilizando um elemento piezoelétrico. Neste trabalho, foi proposto um modelo de captura de energia de vibrações, incluindo não-linearidades no acoplamento piezoelétrico e uma excitação não-ideal. Demonstrou-se que a potência capturada foi influenciada pelo efeito das não-linearidades do acoplamento piezoelétrico, alterando o comportamento dinâmico do sistema. Com o acoplamento fraco, um comportamento caótico foi encontrado causando instabilidade. Com o aumento do acoplamento ocorreu um aumento da energia capturada até um certo limite onde o aumento da não-linearidade teve um efeito de amortecimento sobre as vibrações não-lineares da estrutura causando a perda de energia. Realizando simulações numéricas o comportamento do modelo foi analisado através dos expoentes de Lyapunov, retratos de fase, históricos de deslocamentos no tempo onde um comportamento caótico também foi observado, causando a perda de energia ao longo do tempo de simulação. Usando uma técnica de perturbação, foi encontrada uma solução analítica aproximada para o sistema não-ideal. Então, aplicou-se três técnicas de controle para manter o sistema proposto em uma condição estável. Tanto o método das equações de Riccati dependente de estado (SDRE), o método (LQR) e o controle de feedback que altera a energia do oscilador foram eficientes no controle do sistema não-ideal.

Palavras-chave: Captura de Energia, Caos, Efeito Sommerfeld, Sistema Não-Ideal, Controle Robusto.

Iliuk, Itamar, Nonlinear Phenomena, Including Non-Ideals, in Energy Harvesting, Using Piezoelectric Devices, Bauru: Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2011, 143 pp., Dissertação (Master Degree).

ABSTRACT

In recent years, research on energy harvesting, has increased substantially. Many researchers have concentrated their efforts on finding the best configuration for these systems and to optimize its power output. In the process of energy harvesting, electric power is obtained by converting mechanical energy created by a vibration source from the environment through a transducer, for example, a thin film piezoceramic. Different mechanisms of electromechanical coupling devices have been developed to harvesting, and a particular interest has been given to the use of models that transform the mechanical vibration into electrical current using a piezoelectric element. In this paper we propose a model to energy harvesting from vibrations, including non-linearities in the piezoelectric coupling and a non-ideal excitation. It was demonstrated that the power captured was influenced by the effect of the nonlinearities of the piezoelectric coupling, modifying the dynamic behavior of the system. With a weak coupling, a chaotic behavior was found causing instability. With the increase of the coupling has occurred an increase in the energy captured until a limit, where the increase of non-linearity has a damping effect on vibrations of the non-linear structure causing the loss of energy. Performing numerical simulations the behavior of the model was analyzed using the Lyapunov exponents, phase portraits, historical displacements in time where a chaotic behavior was also observed, causing the loss of energy throughout the simulation time. Using a perturbation technique, found an approximate analytical solution for the non-ideal system. Then, we applied three control techniques to maintain the proposed system in a stable condition. Both the method of equations of state-dependent Riccati (SDRE), the method (LQR) and the feedback control that alters the energy of the oscillator were efficient in controlling the system non-ideal.

Keywords: Energy Harvesting, Chaos, Sommerfeld Effect, Non-ideal System, Robust Control.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Inicialmente apresentam-se neste capítulo a motivação do trabalho e os objetivos desta dissertação, na sequência descreve-se como o trabalho está organizado e o que será apresentado em seus capítulos.

1.1 Objetivos

Este trabalho teve como principal objetivo propor e analisar um modelo de sistema de captura de energia de vibração piezoelétrico não-linear sendo excitado por uma fonte não-ideal de energia. Para efeito de comparação foi realizada uma análise com uma excitação externa no sistema sendo uma função harmônica (sistema ideal), na sequência o sistema recebeu uma excitação externa do tipo não-ideal, onde um motor elétrico de corrente contínua com potência limitada foi acoplado à massa com a intensão de perturbar o sistema e promover oscilações.

Assim, os principais objetivos desta dissertação resumem-se aos seguintes tópicos:

- Elaboração de um modelo matemático de um sistema de captura de energia não-ideal. O qual consiste de um sistema formado por um motor elétrico de corrente contínua com uma massa desbalanceada e com potência limitada, que é acoplado a uma viga onde são aplicados duas camadas de finos filmes piezocerâmicos (película), tendo uma carga resistiva na sua extremidade fixa. O modelo proposto é novidade na literatura atual.

- Obter uma solução analítica aproximada para o sistema de captura de energia não-ideal.
- Para este fim, utilizou-se uma técnica de perturbação conhecida como o método da média, e assim foi possível realizar um estudo da dinâmica não-linear do sistema.
- Realizar simulações numéricas e apresentar os resultados com o modelo linear já estudado na literatura.
- Estudar numérica e analiticamente o sistema de vibrações não-lineares, e a interação entre a viga e o motor de massa desbalanceada utilizado para excitar o sistema.
- Verificar o efeito das não-linearidades provenientes do acoplamento piezoelétrico sobre a captura de energia.
- Aplicar algumas estratégias de controle que mantenham o dispositivo de captura de energia em uma órbita periódica estável.

1.2 Descrição do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em oito capítulos. Neste capítulo inicial, foram apresentados os principais motivos e objetivos desta dissertação. Finalmente, a descrição sucinta dos capítulos desta dissertação.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica com uma introdução sobre captura de energia, piezoelectricidade e fontes de excitação de uma forma geral, apresentando alguns modelos estudados, assim como um resumo sobre os sistemas de captura de energia de vibrações, uma descrição dos modos de operação dos materiais piezoelétricos e a identificação das não-linearidades dos elementos piezoelétricos.

No capítulo 3, foi realizada a modelagem do modelo não-ideal proposto, onde usando uma abordagem Lagrangeana são definidas as equações do movimento para o sistema.

Na sequência são adimensionalizadas as equações para o modelo não-ideal e definido também o caso ideal do sistema.

No capítulo 4, apresenta-se um estudo da dinâmica do sistema através de simulações numéricas, usando históricos de deslocamento no tempo, retratos de fase, análise dos expoentes de Lyapunov, bem como as respostas das curvas de amplitude em ressonância e de frequência média da velocidade do motor. Pode-se detectar o efeito Sommefeld além de um comportamento caótico do sistema.

No capítulo 5, o Método da Média foi usado para encontrar uma solução analítica periódica para o sistema.

No capítulo 6, são apresentados três métodos de controle diferentes. O controle SDRE assim como o controle LQR levaram o sistema que se encontrava em um movimento caótico até a órbita encontrada com o Método da Média. Também aplicou-se o método de controle proposto por Tereshko (2011) o qual é um controle retroalimentado que altera a energia de oscilação do sistema. Todos os métodos foram eficientes e levaram o sistema a uma condição de estabilidade.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões, e sugestões para futuros trabalhos.

No capítulo 8, são listadas as principais referências bibliográficas utilizadas no decorrer desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica com uma introdução sobre captura de energia, piezoeletricidade e fontes de excitação de uma forma geral, apresentando alguns modelos estudados, serão apresentados alguns dos principais sistemas de captura de energia de vibrações do ambiente, tendo como foco principal os que utilizam elementos piezoelétricos como meio de transdução, demonstrando a importância do efeito das não-linearidades piezoelétricas e uma função matemática aproximada.

2.1 Revisão Bibliográfica

Os avanços da tecnologia estão produzindo dispositivos eletrônicos portáteis cada vez menores e capazes de trabalhar com níveis de consumo de energia muito baixos. Esses dispositivos são na maioria das vezes alimentados por baterias que são fontes de energia finitas. Dessa forma, há a necessidade de trocar ou recarregar essas baterias periodicamente, fato este que pode se tornar um problema em algumas situações. Um exemplo que ilustra a situação descrita anteriormente é o uso de baterias eletroquímicas convencionais para alimentar sensores instalados em lugares pouco acessíveis. Quando a energia da bateria acaba, os sensores devem ser recuperados a fim de recarregar a bateria ou mesmo trocá-las segundo Cottone (2007). Além disso, o tamanho e o peso das baterias são desproporcionais quando comparados aos sistemas eletrônicos que elas alimentam. Sendo assim, o uso dos dispositivos de captura de energia “Energy

Harvesting Devices” permite que as baterias sejam automaticamente recarregadas ou mesmo substituídas em algumas aplicações como um exemplo detalhado destas teorias pode-se citar o trabalho de Priya e Inman (2009).

2.2 Captura de Energia do Ambiente

A captura de energia é descrita como o processo de captura de energia do ambiente e sua conversão em eletricidade, e o interesse como fonte de energia para futuras concepções de dispositivos eletrônicos e tem crescido substancialmente segundo Priya e Inman (2009). Tomando por convenção que a eletricidade é fornecida através de uma usina ou uma bateria, exige uma fiação elétrica e uma consequente substituição das baterias, segundo Fujitsu (2010), nos últimos anos a ideia de utilizar energia ambiente nas formas de luz, calor, vibrações, as ondas de rádio, etc, tornou-se cada vez mais atraente, e muitos métodos para produzir electricidade a partir destes diferentes tipos de fontes de energia têm sido desenvolvidos. Com isso, a substituição das baterias e cabos de alimentação poderia ser eliminada com o uso de dispositivos de captura de energia do ambiente. Um exemplo do processo de captura de energia e suas possíveis fontes e aplicações pode ser visto na fig. 2.1.

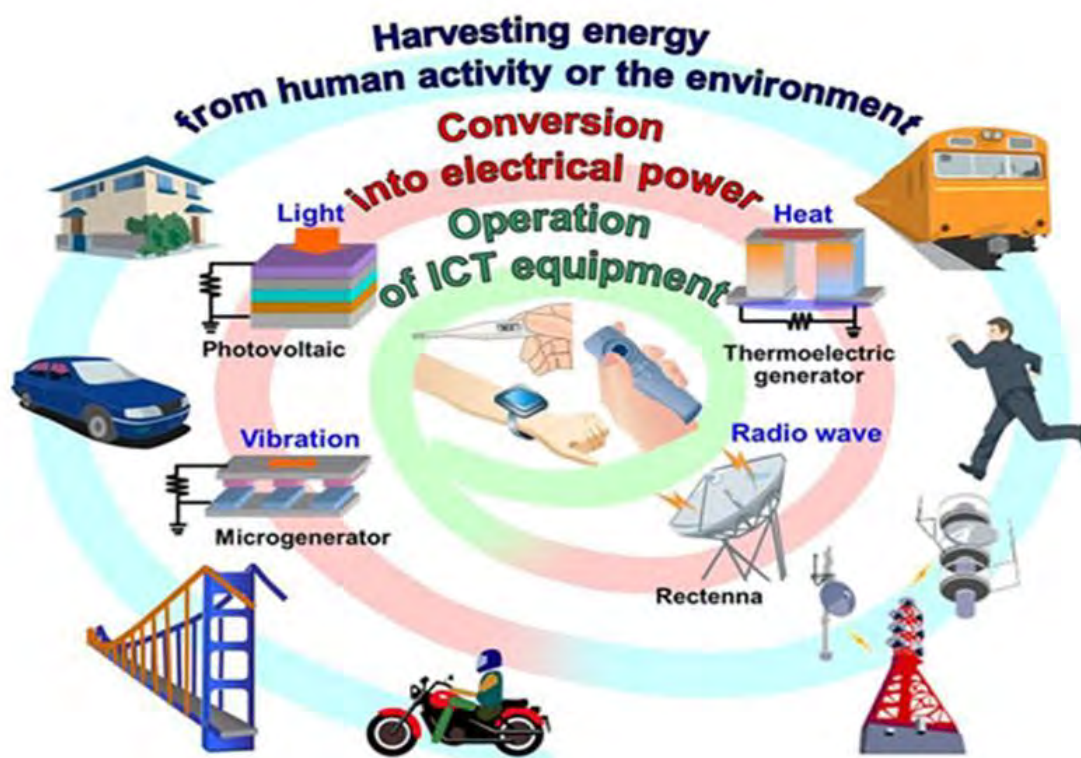


Figura 2.1 – Processo de Captura de Energia do Ambiente (Fujitsu, 2010)¹

Entre as possíveis fontes de energia disponíveis no ambiente, a energia cinética é uma das fontes de energia que encontra-se mais prontamente disponível. O princípio da captura da energia cinética é o movimento ou a deformação de uma estrutura contida dentro do dispositivo de captura de energia. Esse deslocamento ou deformação pode ser convertido em energia elétrica através de três métodos: piezoelectricidade, eletrostática ou indução magnética conforme Cottone (2007). Sendo que a piezoelectricidade é entre os três métodos aquele que alcança o maior nível de eficiência.

¹ **ICT - Information and Communications Technology:** Um termo genérico que cobre computador e rede, hardware e software, telemóveis, etc e as várias aplicações e serviços relacionados com eles.

2.3 Piezoeletricidade

Piezoeletricidade é uma forma de acoplamento entre os comportamentos mecânicos e elétricos de certos materiais. Os materiais exibindo o efeito piezoelétrico são chamados de materiais piezoelétricos. O efeito piezoelétrico é normalmente dividido em duas partes como o direto e o efeito inverso piezoelétrico. Segundo Jalili (2010), em termos mais simples, quando um material piezoelétrico é comprimido (ou seja, mecanicamente tensionado) recolhe uma carga elétrica nos eletrodos localizados em sua superfície, isto é chamado de efeito piezoelétrico direto e foi demonstrado pela primeira vez pelos irmãos Currie em 1880. Se o mesmo material é submetido a uma queda de tensão (ou seja, uma diferença de potencial elétrico aplicado em todos seus eletrodos), ele deforma mecanicamente. Isso é chamado de efeito piezoelétrico inverso e foi deduzida matematicamente (após a descoberta do efeito piezoelétrico direto) a partir dos princípios fundamentais da termodinâmica por Gabriel Lippmann em 1881 e, em seguida, confirmada experimentalmente pelos irmãos Curie. É importante notar que estes dois efeitos normalmente coexistem em um mesmo material piezoelétrico. Portanto, em uma aplicação onde o efeito direto piezoelétrico é do interesse particular (que é o caso da captura de energia) ignorar a presença do efeito piezoelétrico inverso seria termodinamicamente inconsistente segundo Erturk (2009).

Segundo Silva et al, (2009) a Piezoeletricidade (direta) é a capacidade de certos materiais que ao serem submetidos a um esforço mecânico, apresentam um momento elétrico, com intensidade proporcional ao esforço aplicado. Dependendo do tipo de esforço mecânico, tração ou compressão aplicado ao material piezoelétrico, o sentido da polarização resultante é inversamente à aplicação de um campo elétrico a um cristal, em resultado da tensão que aquele campo ocasiona. Assim o efeito piezoeletrico inverso

apresenta uma deformação do cristal que é tanto maior quanto maior for o campo elétrico exercido e depende do sentido desse campo. Ainda conforme Silva et al, (2009), nas direções onde ocorrem uma extensão positiva do cristal, passa-se a verificar uma extensão negativa, e vice versa, quando se modifica o sentido do campo atuante.

Na fig. 2.2 tem-se um exemplo de como ocorrem os efeitos piezoelétricos nos materiais.

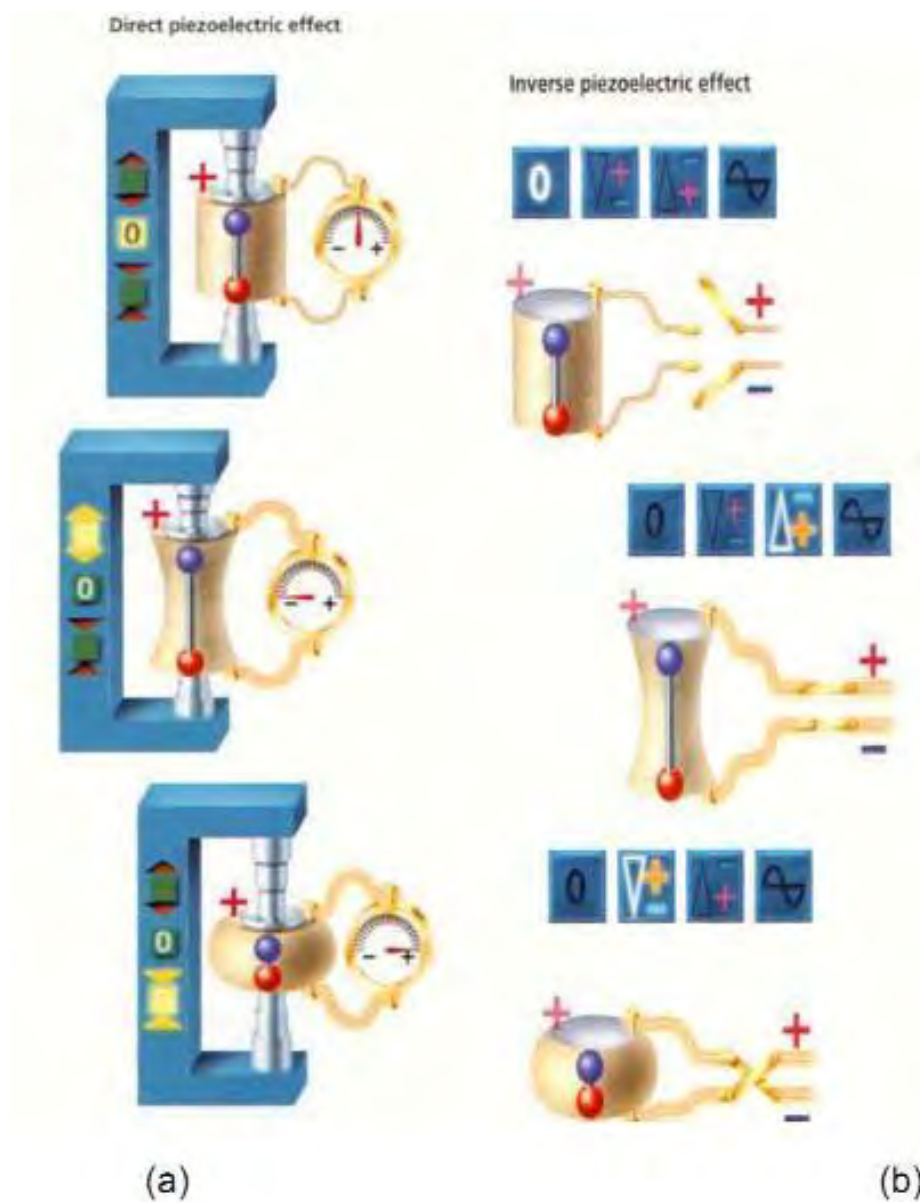


Figura 2.2 – a) Efeito Piezoelétrico Direto; b) Efeito Piezoelétrico Inverso (Silva et al, 2009)

Segundo Cottone (2007), os materiais que mostram piezoeletricidade estão amplamente disponíveis em muitas formas, podendo ser naturais ou artificialmente produzidas, como um exemplo podemos citar: cristal de quartzo, cana de açúcar, sal de Rochelle. Também os materiais que mostram piezoeletricidade são os materiais piezocerâmicos, como por exemplo o titanato zirconato de chumbo PZT, PbTiO_3 , compósitos como BaTiO_3 , as películas finas produzidas através de um processo de pulverização de óxido de zinco ZnO sobre uma tela para impressão de filmes finos baseados em pós piezocerâmicos, assim como os polímeros tais como polyvinylidene fluoride (PVDF) e material nanoestruturado. Uma concisa descrição sobre as propriedades dos materiais piezoelétricos pode ser encontrada em Priya e Inman (2009), Jalili (2010), (Heywang, Lubitz, e Wersing, 2008) sem desmerecer outros.

2.4 Modelos Matemáticos

Na literatura atual vários diferentes modelos de dispositivos para captura de energia utilizando elementos piezoelétricos tem sido desenvolvidos. A seguir, alguns modelos são demonstrados, e servem como base para formulação desse trabalho.

2.4.1 Modelo Proposto por duToit e Wardle (2007)

Neste modelo proposto por duToit e Wardle (2007), representado na fig. 2.3, mostra-se uma configuração do tipo *bimorph* onde os elementos piezoelétricos estão aplicados nos dois lados da viga e conectados em uma configuração do tipo série.

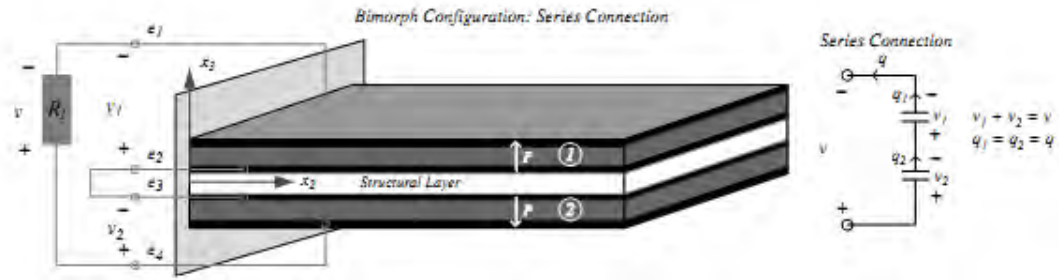


Figura 2.3 – Configuração do tipo bimorph com conexão em série duToit e Wardle (2007)

As equações do movimento para esse modelo são:

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr - \theta_1 v = -B_f \ddot{\theta}_B \quad (1.1)$$

$$\theta_1 \dot{r} + \frac{1}{2} C_{p,1} \dot{v} + \frac{1}{R_l} v = 0$$

Esse modelo é referencia nos estudos sobre captura de energia, sendo base do modelo ideal estudado neste trabalho.

2.4.2 Modelo Proposto por Erturk (2009)

O modelo proposto por Erturk (2009), está representado na fig. 2.4, e refere-se a uma alteração no modelo proposto por Moon e Holmes (1987), pela adição de elementos magnéticos na estrutura para causar um aumento da não-linearidade e melhorar a geração de energia.

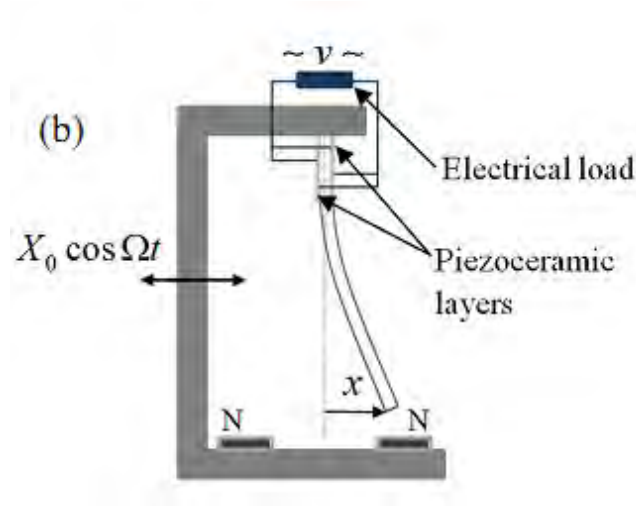


Figura 2.4 – Modelo piezoelétrico estudado por Erturk (2009)

$$\ddot{x} + 2\zeta\dot{x} - \frac{1}{2}x(1-x^2) - \chi v = f \cos \Omega t$$

$$\dot{v} + \lambda v + \kappa \dot{x} = 0$$
(1.2)

As equações (1.2) são modeladas para serem equivalentes a um oscilador Duffing forçado.

2.4.3 Modelo Proposto por Triplett e Quinn (2009)

O modelo proposto por Triplett e Quinn (2009), foi o modelo base para a modelagem do sistema não-ideal objeto de estudo desta dissertação. Toma-se como referência a forma ideal de excitação deste modelo em contraste com o modelo excitado por uma fonte não-ideal de energia. Na fig. 2.5 é demonstrado o esquema do modelo ideal de captura de energia.

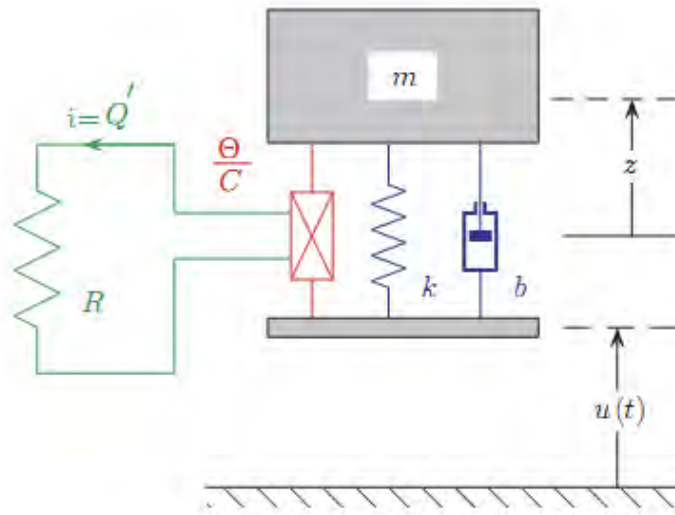


Figura 2.5 – Modelo proposto por Triplett e Quinn (2009)

2.4.4 Modelo Proposto por Von Wagner e Hagedorn (2001)

Os efeitos da Histerése foram analisados no Modelo proposto por Von Wagner e Hagedorn (2001), onde os autores analisaram a relação entre o módulo de Young e o fator piezoelétrico $d31$. Esse estudo é uma base para a modelagem dos efeitos das não-linearidades dos materiais piezoelétricos.

Na fig. 2.6 é demonstrado o modelo estudado pelos autores.

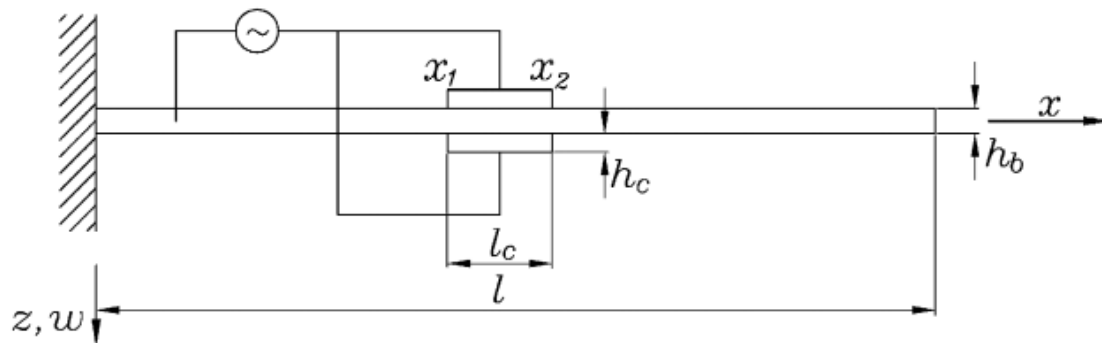


Figura 2.6 – Modelo proposto por Von Wagner e Hagedorn (2001)

2.5 Característica da Fonte de Energia

Segundo Rafikova (2006) a característica de uma fonte de energia é a relação entre os seus parâmetros. Estando a mesma ligada à representação das suas propriedades essenciais. Um circuito elétrico descreve a característica para um motor movido à eletricidade, no caso de um motor à vapor verificam-se os processos termodinâmicos, para baterias e acumuladores tem relevância as reações eletroquímicas. Desta forma representa-se cada fonte de energia com parâmetros específicos. Por exemplo, a tensão elétrica e a corrente para um motor elétrico, o torque e a velocidade angular ou a força e a velocidade linear para uma fonte mecânica. Assim, denomina-se a curva característica da fonte como sendo o seu atributo mais importante da mesma, sendo definida através da relação entre os parâmetros escolhidos para a representação da fonte de energia. Como um exemplo é demonstrado na fig. 2.7.

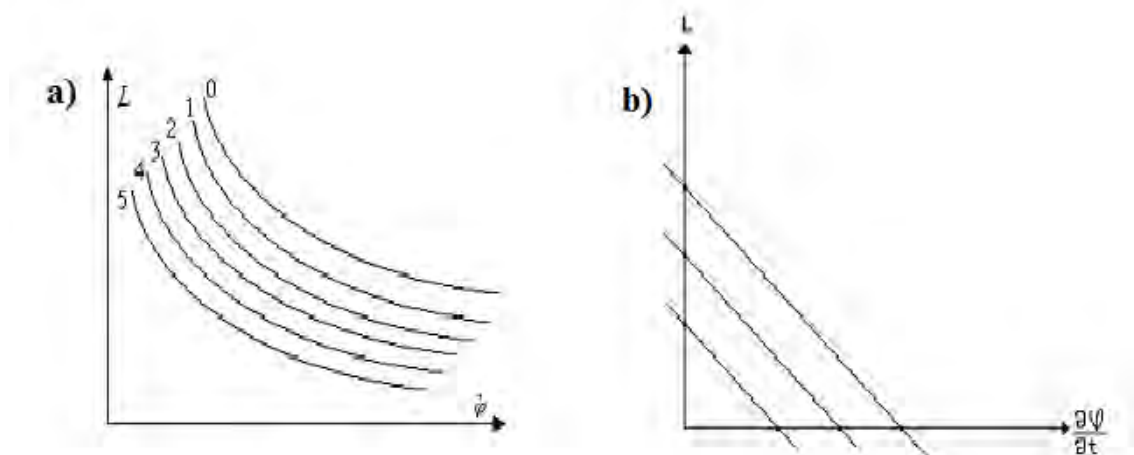


Figura 2.7 – Representação das curvas características de um motor elétrico
a) Exponencial $ae^{-b\dot{\varphi}}$, b) Linear $a - b\dot{\varphi}$ (Rafikova, 2006)

De maneira geral todo motor possui uma família de curvas características reais já definidas, sendo as mesmas fornecidas pelo fabricante junto com o motor nas hora da

sua aquisição ou estão disponíveis no site do fabricante. Essas curvas características podem ser obtidas experimentalmente para cada motor fabricado. A relação entre o torque líquido e a velocidade de rotação do motor $d\varphi/dt$ determina a fonte de energia para o sistema mecânico. Conforme descrito por Rafikova (2006), um atributo importante nesse sentido é o gradiente da curva característica $N = dL/d\dot{\varphi}$. As chamadas fontes de energia suaves (soft energy sources) possuem um gradiente pequeno, já as que têm o gradiente grande são denominadas fontes rígidas (hard energy sources). Sendo assim, para um grande valor de N tem-se uma maior inclinação, podendo se aproximar da uma posição quase vertical o que caracterizaria o sistema ideal. A área de instabilidade da curva de resposta em frequência é determinada pelo tipo de fonte, tendo grande significância nos sistemas com equações do movimento com não-linearidades cúbicas em razão das forças de restauração não-lineares.

2.6 Tipos de Sistemas de Captura de Energia de Vibrações

Os dispositivos para captura de energia de vibrações são identificados por seu meio de transdução de três modos sendo eles: o dispositivos de captura eletrostático, o dispositivo de captura eletromagnético e o que foi abordado neste trabalho, o dispositivo de captura piezoelétrico.

2.6.1 Dispositivo de Captura de Energia Eletrostático

Este método de captura se baseia na utilização de um capacitor variável. O sistema simplesmente consiste em duas placas, que são eletricamente isoladas umas das outras por um dielétrico (tipicamente ar, vácuo ou um isolador). Ao contrário do capacitor fixo simples as placas metálicas do capacitor variável podem estar em movimento, a fim de variar a sua capacitância. À medida que a separação entre as placas (tipicamente nanométrica ou micrométrica para um MEMS) varia, a energia armazenada no capacitor carregado se altera devido ao trabalho feito por uma força externa de vibração. Dentre os vários modelos de geradores eletrostáticos podemos exemplificar três desses modelos como vistos na fig. 2.8 onde ambos são baseados em carga limitada e tensão. Variação de sobreposição no plano, diminuição da distância no plano e diminuição da distância fora do plano.

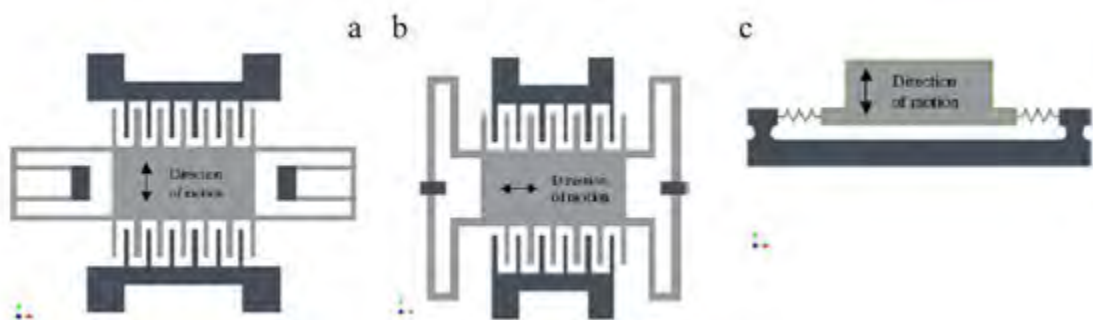


Figura 2.8 – a) Variação de sobreposição no plano, b) diminuição da distância no plano, c) diminuição da distância fora do plano, (Cottone, 2007)

Na topologia de variação de sobreposição no plano a capacitância muda pela mudança na área de sobreposição das aletas interdigitadas que implementa o capacitor multi-placas. Enquanto que para os outros dois tipos as alterações de capacitância ocorre pela diminuição da distância entre as aletas ou placas grandes.

2.6.2 Dispositivo de Captura de Energia Eletromagnético

Uma possível representação de geradores eletromagnéticos é demonstrado por Cottone (2007) que apresenta um dispositivo de captura de energia que exploram o movimento relativo de um condutor elétrico em um campo magnético produzido por um ímã permanente. O dispositivo consiste simplesmente em uma massa “ m ” ligada a uma mola com constante elástica “ k ” que está ligada a uma cápsula rígida como pode ser observado na fig. 2.9. A vibração do ambiente excita a cápsula que transmite o deslocamento mecânico para o corpo inercial. A variação consequente de fluxo magnético através da bobina gera uma corrente induzida de acordo com a lei de Faraday. Desta forma, a parte da energia cinética armazenada no movimento do sistema massa-mola é convertida em corrente induzida (fig. 2.9a).

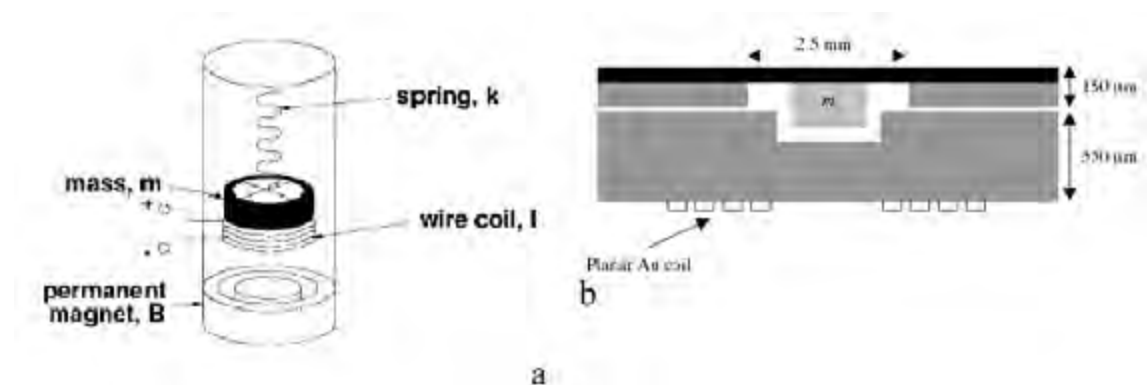


Figura 2.9 - a) Desenho de um gerador de indução, b) Seção do gerador eletromagnético em escala de *wafer* ou lâmina² (Cottone, 2007)

Também podem ser encontradas muitas outras configurações dependendo das preferências ou aplicação por exemplo, com os ímãs conectados a uma viga em balanço (*cantilever beam*) atuando como massa inercial como demonstrado na fig. 2.9b.

² Uma referência à fabricação de circuitos integrados (CIs) com um número tão grande de componentes que, em cada *wafer* ou lâmina, somente é possível colocar um circuito integrado.

2.6.3 Dispositivo de Captura de Energia Piezoelétrico

A viga em balanço é uma das estruturas preferidas para a conversão de energia cinética em energia elétrica. Na conversão por piezoelectricidade, a viga tem uma ou as duas superfícies cobertas por uma película de material piezoelétrico.

Na fig. 2.10a pode ser observado o esquema de um gerador piezoelétrico. A estrutura é planejada de forma a ser flexionada com a vibração do ambiente, a película de material piezoelétrico será comprimida e ocorrerá a geração de energia.

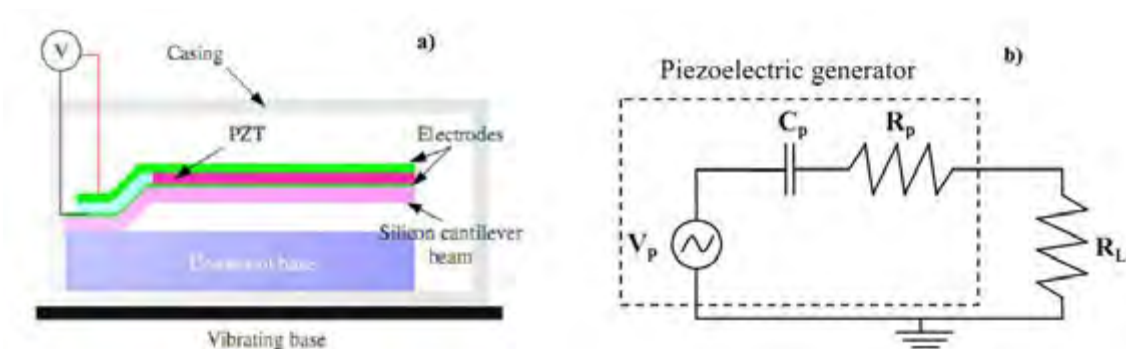


Figura 2.10 – a) Modelo conceitual gerador piezoelétrico, b) Circuito equivalente de um gerador piezoelétrico (Cottone, 2007)

A maior potência de saída ocorrerá quando a estrutura vibrar na sua frequência de ressonância o que explica a escolha pela viga uma vez que essa possui menores frequências de ressonância e podem ser reduzidas ainda mais pela adição de uma massa na sua extremidade livre. Na representação apresentada por Cottone (2007), como visto na fig. 2.10b a fonte de tensão representa a tensão que se desenvolve devido ao excesso de carga na superfície sobre o cristal.

Onde:

C_p é um capacitor em série e representa a capacitância da camada piezoelétrica que é proporcional à permissividade do filme e área que é inversamente proporcional à

espessura do filme.

R_p representa a resistência do elemento piezoelétrico interno,

R_L represente uma carga puramente resistiva.

Essa configuração do tipo *bimorph* é uma das mais estudadas na literatura atual. Para uma detalhada análise sobre dispositivos de captura piezoelétrico podemos citar as obras de Priya e Inman (2009), Jalili (2010), (Heywang, Lubitz, e Wersing, 2008), Erturk (2009), Erturk e Inman (2011), sem desmerecer outros.

2.7 Modos de Operação do Transdutor Piezoelétrico

Conforme descrito por Priya e Inman (2009), existem dois modos mais comuns que são utilizados para captura de energia piezoelétrica. São eles o modo d_{33} para o uso em atuadores do tipo pilha de elementos piezoelétricos e o modo d_{31} que são comumente utilizados na concepção de dispositivos baseados em vigas em balanço. Quando o elemento piezoelétrico é aplicado em ambos os lados da viga temos uma configuração conhecida como *bimorphs*. No modo d_{33} , a direção da tensão mecânica aplicada (força) e da tensão elétrica gerada é a mesma. Já no modo de operação d_{31} a tensão mecânica é aplicada na direção axial, mas a tensão elétrica é obtida a partir de direção perpendicular, como é demonstrado na fig. 2.11.

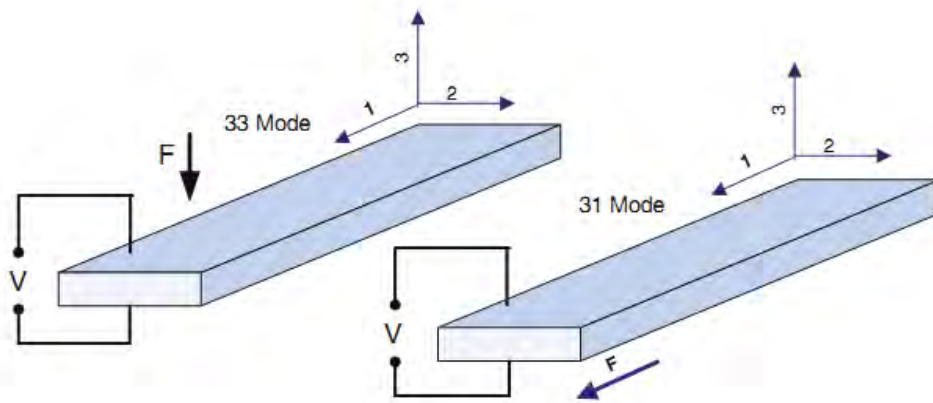


Figura 2.11 – Modos de Operação do Transdutor Piezoelétrico (Priya e Inman, 2009)

Na fig. 2.12a um modelo de dispositivo de captura de energia que utiliza o modo d_{31} , na fig. 2.12b temos um modelo de sistema de captura de energia que usa multiplas camadas de elementos piezoelétricos, essa é uma configuração que utiliza o modo d_{33} . Pode-se ver na fig. 2.12c uma representação de um sistema massa-mola de parâmetros concentrados que é o modelo matemático mais comum utilizado para representação de dispositivos de captura de energia.

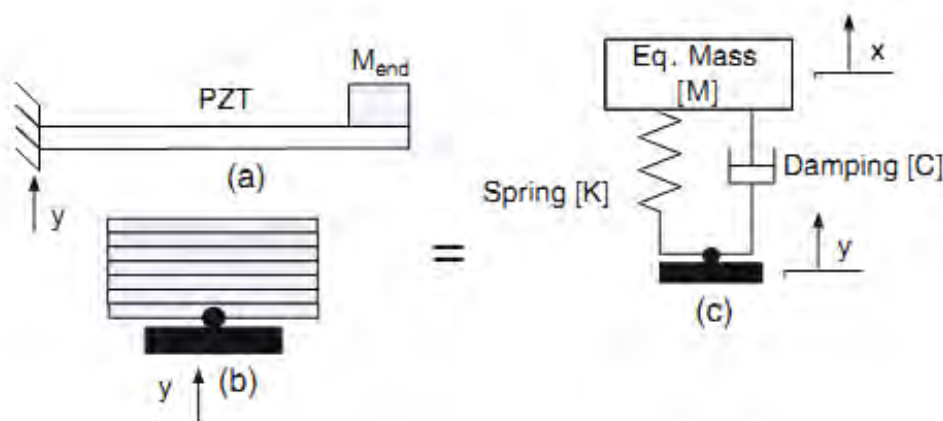


Figura 2.12 – (a) Viga em balanço com massa na extremidade livre, (b) PZT multicamadas submetido a vibração transversal excitando a base, e (c) Sistema massa-mola de parâmetros concentrados equivalente de um corpo rígido em vibração (Priya e Inman, 2009)

2.8 Não-linearidade Piezoelétrica

Segundo Jalili (2010) pode-se identificar na prática que os materiais piezoelétricos exibem característica não-linear, incluindo ainda a não-linearidade mais importante, a histerese. Em diferentes áreas da ciência encontra-se o fenômeno de histerese, não apenas em materiais piezoelétricos. A histerese encontra-se em materiais e sistemas que incluem ligas com memória de forma, materiais viscoelásticos e polímeros eléto-ativos, materiais magnetostritivos, fluídos eléto/magneto-reológico, entre outros. A fig. 2.13 mostra exemplos típicos de não-linearidade histerese em três diferentes materiais.

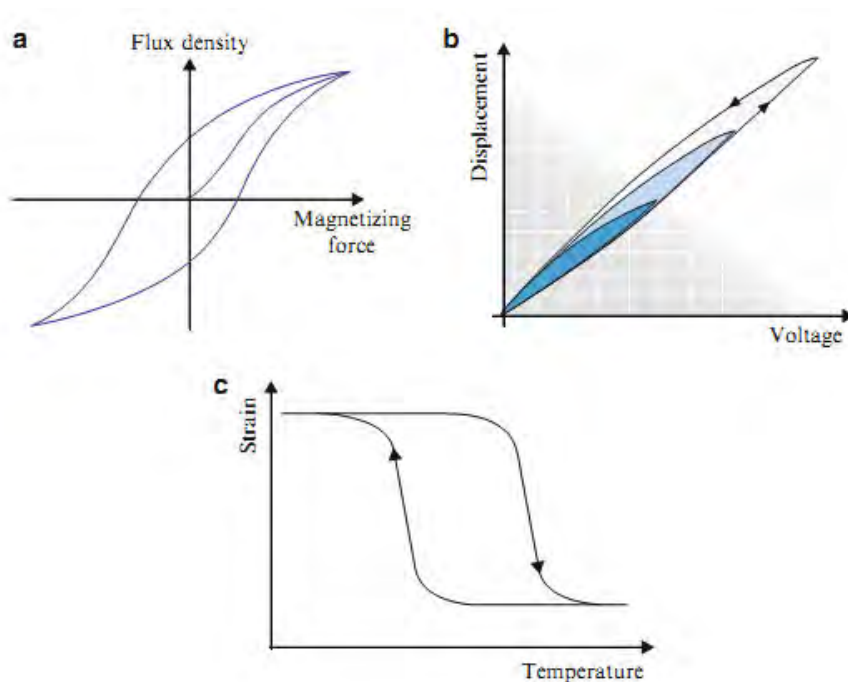


Figura 2.13 - Não-linearidade Histerese em (a) Os materiais magnéticos, (b) Os materiais piezoelétricos, e (c) ligas com memória de forma (Jalili, 2010)

Ainda segundo Jalili (2010), a histerese, ainda é objeto de muitas pesquisas e investigações em diferentes campos. Devido principalmente à sua estrutura ubíqua³ e

³ Que está ou pode estar em toda parte ao mesmo tempo; onipresente.

complexa. Pode-se adotar uma representação matemática como demonstrada aqui para esse fenômeno. Descreve-se o operador histerese para ser referido como um multi-ramo (*multi-branch*) na relação de entrada / saída não-linear, onde o valor futuro de saída depende não só os valores instantâneos da entrada, mas também sobre a história (passado ou memória) do seu funcionamento, especialmente os valores de extremo, como pode ser visto na fig. 2.13. Assim, o operador de histerese pertence a uma família mais geral dos operadores de valores múltiplos não-lineares. (Jalili, 2010).

Von Wagner e Hagedorn (2001), em seu trabalho identificaram os efeitos da histerese piezoelétrica através do seu modelo de viga piezoelétrica excitada por uma tensão alternada em modo d_{31} . Onde os autores analisaram a relação entre o módulo de Young e o fator piezoelétrico d_{31} . Suas observações de efeitos não-lineares no sistema viga piezoelétrica submetido a fracos campos elétricos pode ser contrastado com o comportamento não-linear de cerâmicas na presença de campos elétricos fortes. Histerese dielétrica e histerese borboleta são exemplos típicos encontrados também sendo observados usando atuadores piezoelétricos de pilha em modo d_{33} . O comportamento não-linear de cerâmicas submetidas a campo um elétrico fraco até então não havia sido descrito em detalhes, sendo mencionado por Crawley e de Luis (1987), que atribuíram o efeito a não-linearidades de amortecimento. O trabalho de Von Wagner e Hagedorn (2001), é uma referência sobre os efeitos das não-linearidades piezoelétricas sobre a captura de energia. Triplett e Quinn (2009) estudaram em seu artigo analiticamente os efeitos da não-linearidade no acoplamento eletromecânico bem como sua influência sobre a captura de energia, em contraste com o sistema de captura linear de energia. Esta não-linearidade foi atribuída às leis constitutivas dos materiais piezoelétricos, especificamente sobre a relação não-linear entre a tensão (esforço mecânico) e o campo elétrico no material piezocerâmico (du Toit e Wardle, 2007;

Twiefel et al, 2008). O campo elétrico aplicado na direção “i” pode estar relacionado com a tensão na direção “j” pela constante d_{ij} . A fig. 2.14, demonstra graficamente os valores experimentais obtidos por Crawley e Anderson (1990), representando a constante piezoelétrica no sentido “3”, contra a tensão aplicada na direção “1”.

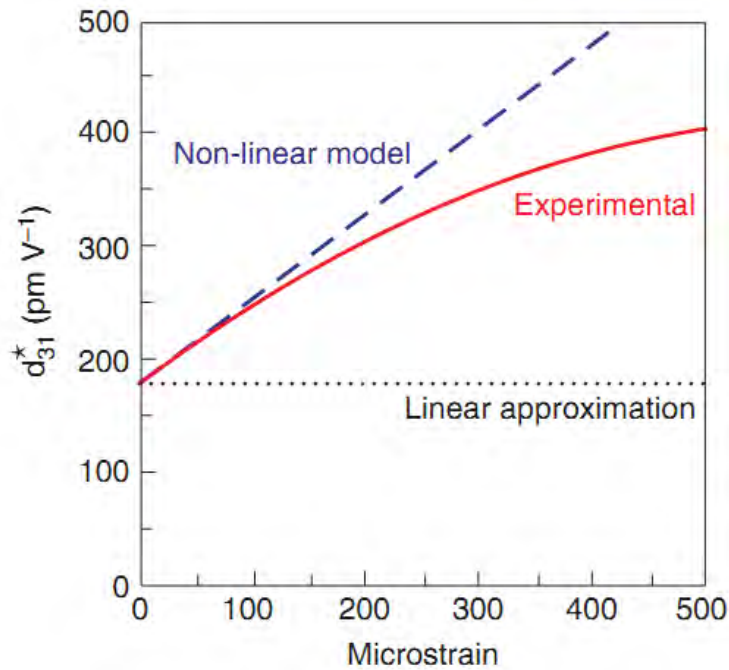


Figura 2.14 - Dependência de d_{31}^* sobre a tensão induzida. A curva experimental representação de Crawley e Anderson (1990).

Pode-se identificar que a constante piezoelétrica d_{31} exibiu uma dependência significativa sobre a tensão induzida no material. Esta dependência da tensão apresenta um comportamento não-linear no acoplamento eletromecânico. Devido a grande influência do papel das não-linearidades no acoplamento piezoelétrico sobre a resposta do sistema de captura de energia, e com a finalidade de analisar o efeito da não-linearidade no acoplamento piezoelétrico, Triplett e Quinn (2009) aproximaram os coeficientes de acoplamento piezoelétricos linear e não-linear através da função representada na Figura 2.15, com base nos resultados de Crawley e Anderson (1990) (veja: fig. 2.14). Foram aproximados o coeficiente de acoplamento dimensional

piezoelétrico $d(x)$ como: $d(x) = d_{lin}(1 + d_{nlin}|x|)$ tendo a contraparte adimensional definida como: $\hat{d}(x) = \theta(1 + \Theta|x|)$ onde θ representa a parte linear e a parte não-linear é representada por Θ , detalhes do processo de adimensionalização são demonstrados no capítulo 3. Essa função impõe uma não-linearidade fraca no componente mecânico, mas uma não-linearidade forte no circuito elétrico. Utilizou-se essa função no presente trabalho para concepção do modelo de captura de energia não-linear excitado por uma fonte não-ideal de energia.

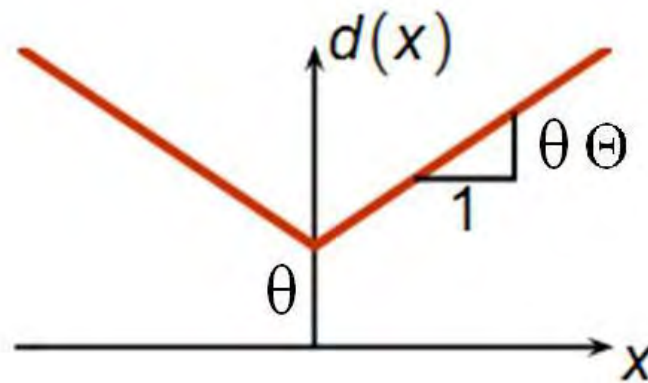


Figura 2.15 – Função de Aproximação da não-linearidade piezoelétrica definida por Triplett e Quinn (2009)

CAPÍTULO 3

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA

3.1. Considerações Gerais

O modelo não-ideal proposto neste trabalho foi baseado no modelo ideal estudado por Triplett and Quinn (2009). Neste modelo, usou-se o método das equações de Lagrange para se obter as equações do movimento do sistema mecânico. O termo do acoplamento piezoelétrico foi o mesmo definido por Triplett and Quinn (2009), com a finalidade de se efetuar uma comparação entre um modelo ideal com o modelo não-ideal proposto no presente trabalho. Em seguida adimensionaliza-se as equações para que se possa trabalhar com números puros. Reescritas na forma de estados as equações podem ser simuladas numericamente e seus resultados avaliados.

3.2. Modelagem Matemática do Sistema de Captura de Energia Não-Ideal (SCENI)

O modelo proposto de um sistema de captura de energia não-ideal (SCENI) no presente trabalho, consiste de uma viga em balanço com camadas de elementos piezoelétricos (piezocerâmicos) aplicadas em ambos os lados da viga em uma configuração conhecida como *bi-morph* (du Toit e Wardle, 2007), na extremidade livre foi anexado um motor elétrico de corrente contínua com uma massa desbalanceada e na extremidade engastada os elementos piezoelétricos são conectados através de eletrodos a uma carga elétrica, um resistor por exemplo.

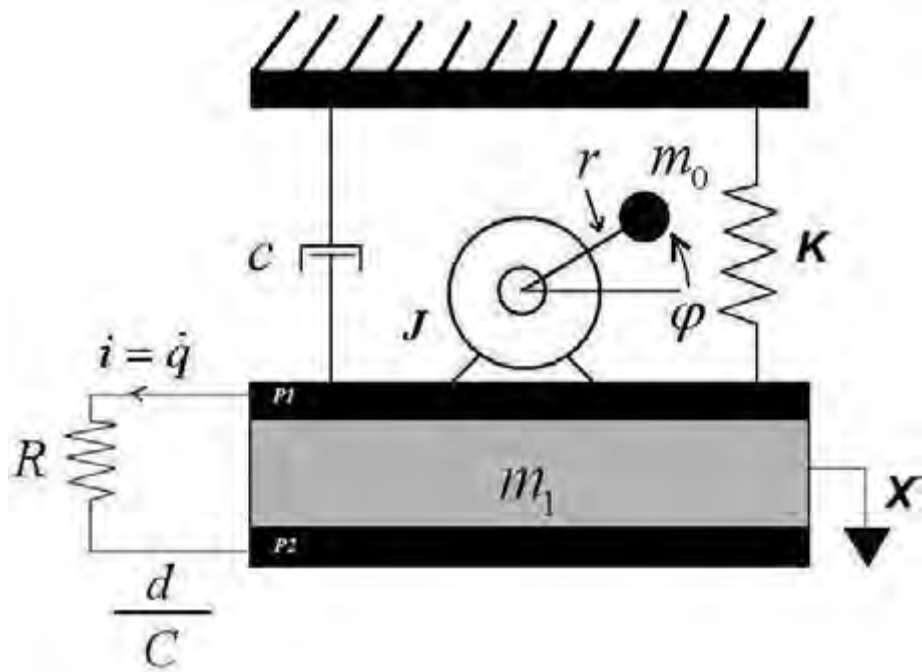


Figura 3.1 – Modelo Proposto do Sistema de Captura de Energia Não-Ideal (SCENI)

O modelo matemático, conforme descrito na fig. 3.1 representa o (SCENI) apresenta os parâmetros físicos:

$M = m_1 + m_0$ é a massa total do sistema,

m_0 é a massa do eixo desbalanceado do motor elétrico,

m_1 é a massa da viga,

X é o deslocamento vertical do sistema,

c é o coeficiente de amortecimento linear,

$K = -k_1 X - k_2 X^3$ representa a rigidez do sistema,

k_1 é o coeficiente da mola linear,

k_2 é o coeficiente da mola não-linear (mola cúbica),

φ é o deslocamento angular do rotor,

r é a excentricidade,

$I = J + m_0 r^2$ momento de inercia em relação ao centro de rotação,

J é o momento de inércia do rotor.

Os torques do motor foram modelados conforme definidos por (Balthazar *et al*, 2003).

Onde:

A função $H(\dot{\phi})$ é o torque resistivo aplicada ao motor e a função $L(\dot{\phi})$ é o torque de acionamento da fonte de energia (motor).

$P1$ e $P2$ são as camadas de filme piezoelétrico aplicadas nas duas faces da viga.

De acordo com Triplett and Quinn (2009), o termo $\frac{d(X)}{C}q$ representa o acoplamento piezoelétrico para o componente mecânico.

Onde:

q é a carga elétrica desenvolvida através do circuito acoplado,

$d(X)$ é um coeficiente de acoplamento dependente da tensão (esforço mecânico) aplicada.

V é tensão elétrica através do material piezoelétrico e tem a forma:

$$V = -\frac{d(X)}{C}X + \frac{q}{C} \quad (3.1)$$

Onde:

C representa a capacitância piezoelétrica.

Desta forma pode-se assim reescrever a tensão elétrica como $V = -R\dot{q}$.

R é a resistência elétrica,

$i = \dot{q}$ é a corrente elétrica.

3.2.1.Obtenção das Equações do Movimento

Por várias vezes se faz necessário a utilização da representação dos sistemas dinâmicos na forma de modelos matemáticos de equações diferenciais. Com isso busca-se facilitar o equacionamento sem perder, desta forma, as características dinâmicas principais do sistema estudado. Para se obter essas equações pode-se considerar as energias do sistema e aplicando as equações de Lagrange. Desta forma, temos:

Energia cinética é dada por:

$$E = \frac{1}{2} M \dot{X}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_0 [\dot{X} - r \dot{\phi} \sin \phi]^2 + \frac{1}{2} m_0 [r \dot{\phi} \cos \phi]^2 \quad (3.2)$$

Energia potencial:

$$\mathcal{G} = \frac{1}{2} k_1 X^2 + \frac{1}{4} X^4 + m_0 g r \sin \phi \quad (3.3)$$

Equação de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \phi}{\partial q_i} = N_i \quad (3.4)$$

onde $\phi = E - \mathcal{G}$ e $i = 1, 2$.

Assim, temos:

Para $i = 1$.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{X}} = M \dot{X} + m_0 r \dot{\phi} \cos \phi$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \dot{X}} \right) = M \ddot{X} - m_0 r (\dot{\phi}^2 \sin \phi - \ddot{\phi} \cos \phi)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = -k_1 X - k_2 X^3$$

$$N_1 = -c\dot{X} + \frac{d(X)}{C}q \quad (3.5)$$

Para $i = 2$.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{\phi}} = J\dot{\phi} + m_0 r^2 \dot{\phi} + m_0 r \dot{X} \cos \varphi$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \dot{\phi}} \right) = I\ddot{\phi} - m_0 r (-\ddot{X} \cos \varphi + \dot{X} \dot{\phi} \sin \varphi)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \varphi} = m_0 r \dot{X} \dot{\phi} \sin \varphi$$

$$N_2 = L(\dot{\phi}) - H(\dot{\phi}) \quad (3.6)$$

Utilizando as equações de Lagrange (3.4) e (3.5), obtem-se as equações do movimento para o **(SCENI)**:

$$M\ddot{X} + c\dot{X} + k_1 X + k_2 X^3 = m_0 r (\ddot{\phi} \cos \varphi - \dot{\phi}^2 \sin \varphi) + \frac{d(X)}{C}q \quad (3.7)$$

$$I\ddot{\phi} = m_0 r \ddot{X} \cos \varphi + L(\dot{\phi}) - H(\dot{\phi}) \quad (3.8)$$

$$R\dot{q} - \frac{d(X)}{C}X + \frac{q}{C} = 0 \quad (3.9)$$

A função que define a fonte de energia não-ideal pode ser definida como uma função exponencial ou como uma função linear, as quais representam as curvas características da relação entre o torque *versus* velocidade do motor de corrente contínua. Então pode-se considerar a função exponencial como sendo:

$$L(\dot{\phi}) - H(\dot{\phi}) = V_1 e^{-V_2 \dot{\phi}}$$

A função linear tem a seguinte forma:

$$L(\dot{\phi}) - H(\dot{\phi}) = V_1 - V_2 \dot{\phi}.$$

Onde:

V_1 está relacionado com a tensão elétrica aplicada através da armadura do motor DC, este é um possível parâmetro de controle do problema,

V_2 é uma constante para cada modelo de motor de corrente contínua considerado.

3.2.2. Adimensionalização do Sistema

Utilizando um sistema com variáveis adimensionais pode-se trabalhar nele com números puros, sem considerar a dimensão de suas variáveis.

É possível tornar as equações (3.7), (3.8), (3.9) em uma forma adimensional introduzindo os seguintes parametros adimensionais:

$$\begin{aligned}
 \omega_0 &= \sqrt{k_1 / M} & \tau &= \omega_0 t & x &= \frac{X}{r} & v &= \frac{q}{q_0} \\
 \mu_1 &= \frac{V_1}{I \omega_0^2} & \mu_2 &= \frac{V_2}{I \omega_0} & \gamma &= \frac{m_0 r^2}{I} & \rho &= RC \omega_0 \\
 \alpha &= \frac{c}{M \omega_0} & b &= \frac{k_2 r^2}{M \omega_0^2} & \delta_1 &= \frac{m_0}{M} & \delta_2 &= \frac{m_0 \omega_0^2}{M} \\
 \varepsilon &= (q_0 / r)^2 / (Ck) & \hat{d}(x) &= \left(\frac{r}{q_0} \right) d(r) & \theta &= \left(\frac{r}{q_0} \right) d_{lin} & \Theta &= r d_{nlin}
 \end{aligned}$$

O coeficiente de acoplamento piezoelétrico adimensional utilizado no presente trabalho

foi aproximado por Triplett e Quinn(2009) como sendo $\hat{d}(x) = \theta(1 + \Theta|x|)$

Onde:

θ representa a parte linear do acoplamento piezoelétrico,

Θ representa a parte não-linear do acoplamento piezoelétrico.

As funções que representam a fonte de excitação não-ideal (motor de corrente contínua) foram definidas como:

$\Gamma(\varphi') = \mu_1 e^{-\mu_2 \dot{\varphi}}$ representa um motor com uma relação exponencial torque-velocidade,

$\Gamma(\varphi') = \mu_1 - \mu_2 \dot{\varphi}$ representa um motor com uma relação linear torque-velocidade.

Desta maneira as equações que governam o movimento do (SCENI) se reduzem à:

$$\begin{aligned} x'' + x &= \varepsilon(\delta_1 \varphi'' \cos \varphi - \delta_2 \varphi'^2 \sin \varphi - \alpha x' - b x^3 + \theta(1 + \Theta|x|)v) \\ \varphi'' &= \varepsilon(\gamma x'' \cos \varphi + \Gamma(\varphi')) \\ v' &= (\theta(1 + \Theta|x|)x - v) / \rho \end{aligned} \quad (3.10)$$

Usando novas variáveis: $x_1 = x$, $x_2 = x'$, $x_3 = \varphi$, $x_4 = \varphi'$, $x_5 = v$, reescreve-se as equações em uma representação do sistema em espaço de estados de ordem 5 como:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= \varepsilon(-\alpha x_2 - b x_1^3 + \theta(1 + \Theta|x_1|)x_5 - \delta_1 x_4' \cos x_3 + \delta_2 x_4'^2 \sin x_3) - x_1 \\ x_3' &= x_4 \\ x_4' &= \varepsilon(\gamma x_2' \cos x_3 + \Gamma(x_4)) \\ x_5' &= (\theta(1 + \Theta|x_1|)x_1 - x_5) / \rho \end{aligned} \quad (3.11)$$

A potência capturada através do componente mecânico é V^2 / R , assim a potência elétrica adimensional capturada do sistema foi identificada por du Toit e Wardle (2007) bem como por Triplett e Quinn (2009) como sendo:

$$P = \rho v'^2 \quad (3.12)$$

3.3. Equações do Modelo Ideal

No caso particular em que a velocidade angular do motor é considerada constante pode-se obter a seguinte relação:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega & \varphi &= \omega t & \ddot{\varphi} &= 0 \\ \varphi' &= \frac{\omega}{\omega_0} = \Omega & \varphi &= \Omega \tau & \varphi'' &= 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Utilizando a relação (3.13), pode-se reescrever o sistema (3.10) na forma ideal como:

$$\begin{aligned} x'' + x &= \varepsilon(-\alpha x' - bx^3 + \theta(1 + \Theta|x|)v + Y \sin(\Omega \tau)) \\ v' &= (\theta(1 + \Theta|x|)x - v) / \rho \end{aligned} \quad (3.14)$$

Onde Y é a amplitude da excitação.

Assim reescrevendo as equações em uma representação do sistema em espaço de estados de ordem 3 obtém-se:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= \varepsilon(-\alpha x_2 - bx_1^3 + \theta(1 + \Theta|x_1|)x_3 + Y \sin(\Omega \tau)) - x_1 \\ x_3' &= (\theta(1 + \Theta|x_1|)x_1 - x_3) / \rho \end{aligned} \quad (3.15)$$

CAPÍTULO 4

4. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Foram realizadas simulações numéricas utilizando o software Matlab®, utilizando como algoritmo de integração o método Runge Kutta 4ª ordem (integrador ODE45), com o passo de integração variável. Por meio destas simulações foi possível efetuar uma análise da estabilidade do sistema ideal representado pela equação (3.15), assim como do sistema não-ideal representado pela equação (3.11). Com a análise dos gráficos gerados pelas simulações foram obtidas conclusões sobre o comportamento dinâmico de ambos os sistemas, onde o sistema não-ideal apresentou um comportamento caótico tanto para o motor de massa desbalanceada com relação linear torque-velocidade, quanto para o motor com relação exponencial torque-velocidade. Também foi possível identificar o efeito Sommerfeld que ocorreu no modelo não-ideal através da variação do valor do parâmetro de controle (tensão elétrica no motor CC). Verificou-se ainda a influência da variação no valor dos parâmetros de acoplamento piezoelétrico linear e não-linear em ambos os modelos.

4.1. Análise do Modelo de Captação de Energia Ideal

Para as simulações numéricas manteve-se as condições iniciais nulas:

$$x_1(0) = 0, \quad x_2(0) = 0, \quad x_3(0) = 0$$

As simulações foram efetuadas durante o intervalo de tempo adimensional $0 \leq \tau \leq 100$.

Os valores dos parâmetros adimensionais usados inicialmente foram os mesmos utilizados no trabalho de Triplett e Quinn (2009):

$$\varepsilon = 0.10 \quad b = 0.25 \quad \alpha = 0.25 \quad \Omega = 1.00 \quad \Upsilon = 2.00 \quad \rho = 1.00$$

Foram abordados dois casos nas simulações do modelo ideal. No caso linear o coeficiente de acoplamento piezoelétrico linear θ variou ao longo do tempo e o coeficiente de acoplamento piezoelétrico não-linear Θ é igual à zero. No caso não-linear o valor do coeficiente de acoplamento piezoelétrico linear θ foi escolhido e teve seu valor fixado, já o coeficiente de acoplamento piezoelétrico não-ideal Θ variou ao longo do tempo.

4.1.1. Caso Linear

No caso linear não foi considerada a influência das não-linearidades constitutivas dos materiais piezoelétricos, assim utilizou-se o coeficiente de acoplamento piezoelétrico não-linear $\Theta = 0.00$. Sistemas modelados desta forma são considerados sistemas de captura de energia com acoplamento piezoelétrico linear. Para este caso o valor do coeficiente de acoplamento linear $\theta = 1.00$ está de acordo com o valor de θ próximo do ideal encontrado no trabalho de Triplett e Quinn (2009).

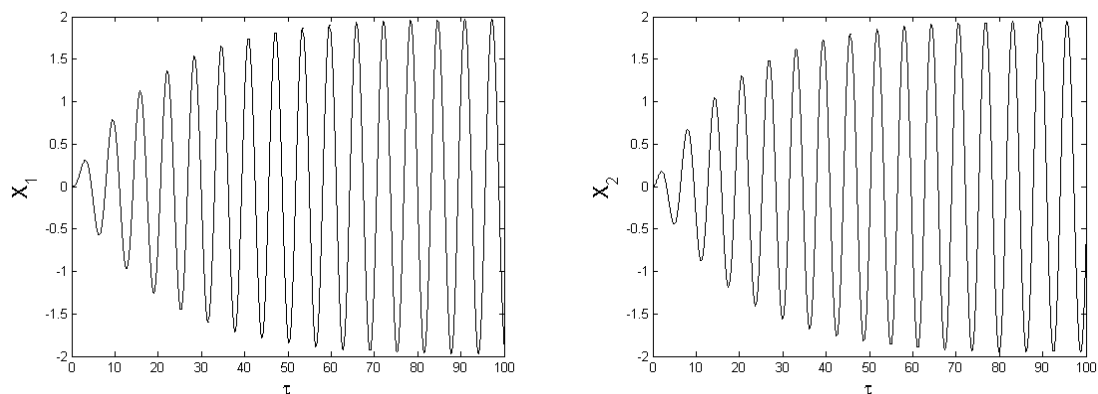


Figura 4.1 - Históricos no tempo, Deslocamento (à esquerda) e Velocidade (à direita).

Na fig. 4.1 apresentam-se os históricos no tempo para o deslocamento da massa do sistema e para a velocidade do sistema onde pode-se notar o movimento periódico do modelo ideal.

Os retratos de fase em duas e três dimensões do sistema são representados na fig. 4.2 verificou-se que o sistema atingiu o deslocamento com amplitude máxima e manteve-se estável nesta condição.

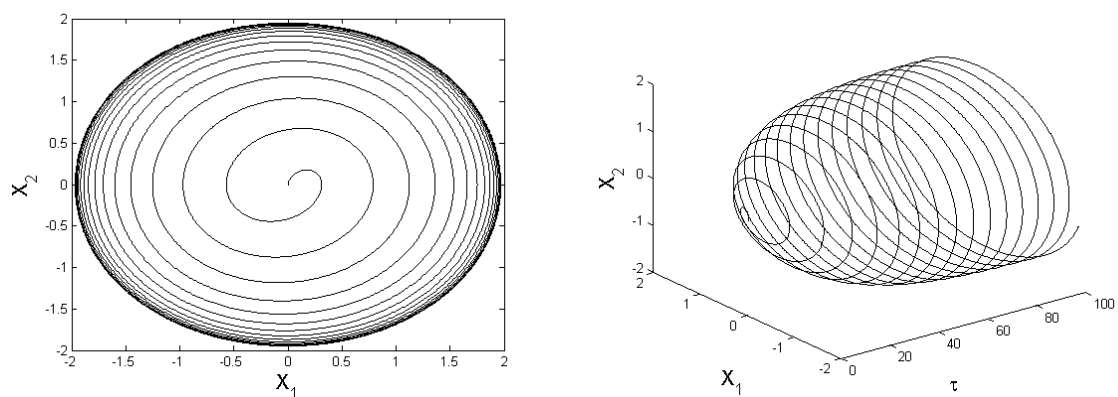


Figura 4.2 - Retrato de Fase no plano x-y (à esquerda) e Retrato de Fase em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).

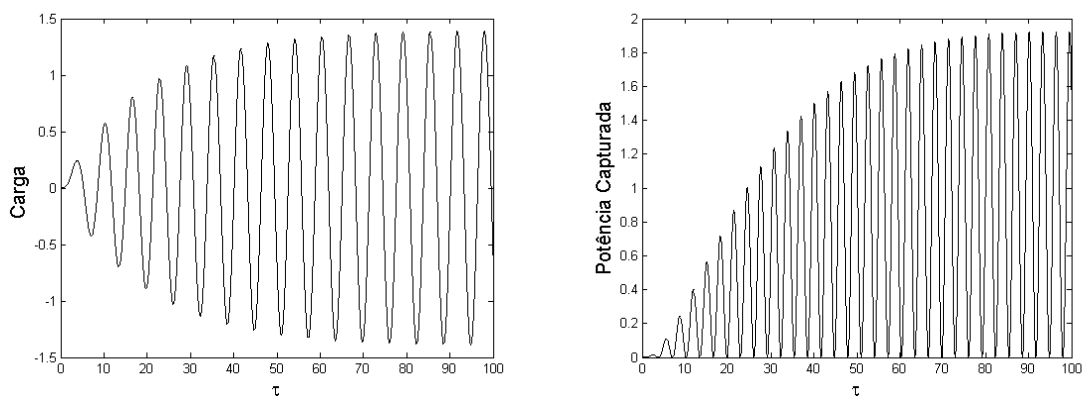


Figura 4.3 - Históricos no tempo: da Carga Elétrica (à esquerda) e da Potência Máxima de Capturada (à direita).

O histórico no tempo para o deslocamento da carga e a potência máxima adimensional capturada pelo dispositivo eletromecânico são demonstrados na fig. 4.3, onde a potência

máxima capturada é dependente da amplitude de excitação e da frequência imposta ao sistema ideal.

Na fig. 4.4 apresentam-se as Seções de Poincaré para o sistema no caso linear, assim pode-se comprovar a resposta periódica do sistema para a força de excitação aplicada.

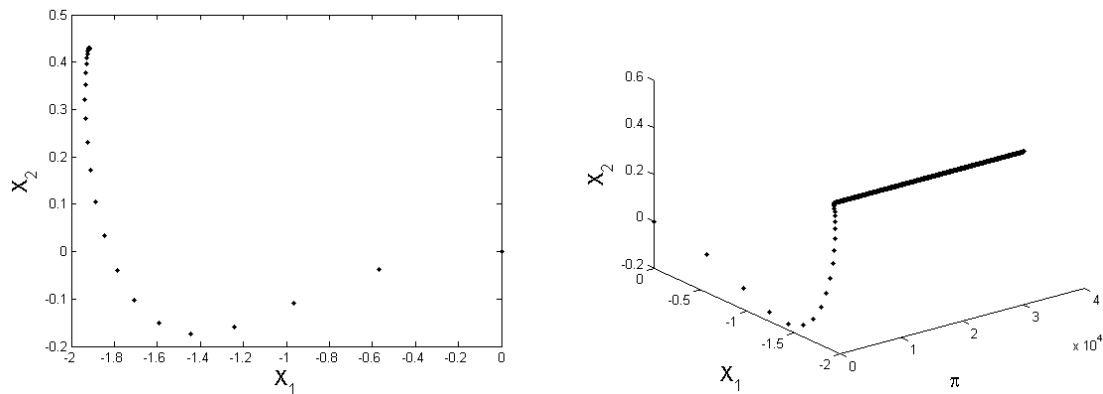


Figura 4.4 - Seção de Poincaré no plano x-y (à esquerda) e Seção de Poincaré em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).

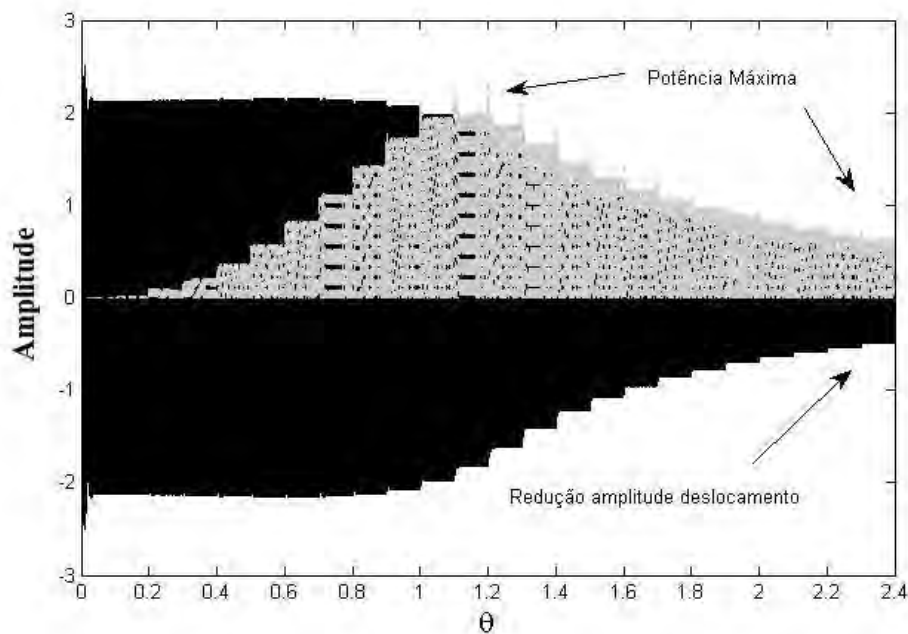


Figura 4.5 - Caso linear com coeficiente de acoplamento não-linear $\Theta=0$, e com a variação do valor do coeficiente de acoplamento linear θ ; preto: Deslocamento do Sistema, cinza: Potência Máxima Capturada.

Analisando a fig. 4.5 foi possível concluir que a medida que o acoplamento entre a estrutura do dispositivo de captura de energia e o material piezoelétrico tornaram-se maiores, houve um aumento da energia capturada. Porém isso ocorreu até um certo limite, a partir do qual, aumentar o coeficiente de acoplamento resultou em uma diminuição da amplitude de deslocamento e uma consequente queda na potência capturada pelo sistema.

4.1.2.Caso Não-Linear

No caso não-linear utilizou-se os valores dos coeficientes de acoplamento piezoelétrico linear $\theta = 1.00$ e do coeficiente de acoplamento piezoelétrico não-linear $\Theta = 1.00$ sendo que ambos estão próximos dos melhores valores definidos no trabalho de Triplett e Quinn (2009). Este sistema é um sistema de captura de energia com acoplamento piezoelétrico não-linear. Com o aumento do valor de Θ , o efeito das não-linearidades dos elementos piezoelétricos passam a influenciar no sistema. Esse efeito atua como mais um amortecimento na resposta vibratória do sistema, causando a redução na captura de energia.

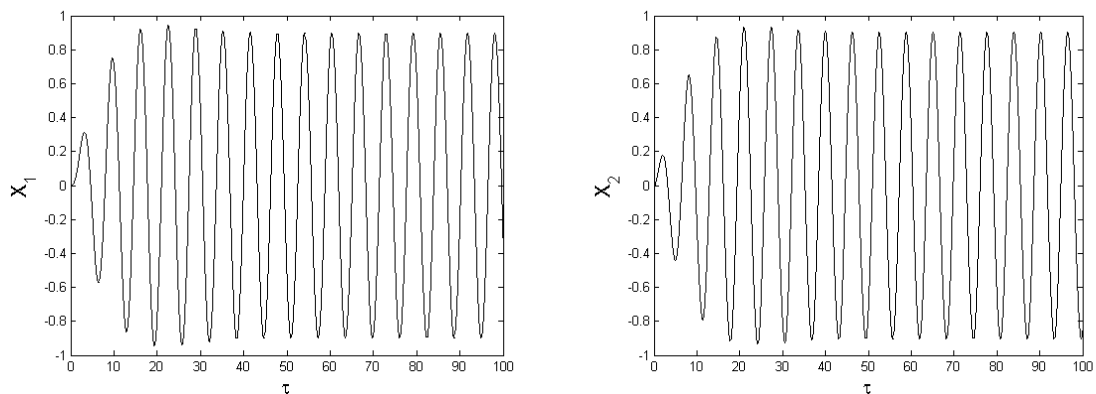


Figura 4.6 - Históricos no tempo, Deslocamento (à esquerda) e Velocidade (à direita).

As simulações apresentam os históricos no tempo para o deslocamento do sistema, para a velocidade do sistema na fig. 4.6, aqui pode-se verificar que devido a inclusão da não-linearidade, a amplitude e vibração foi menor que no caso linear.

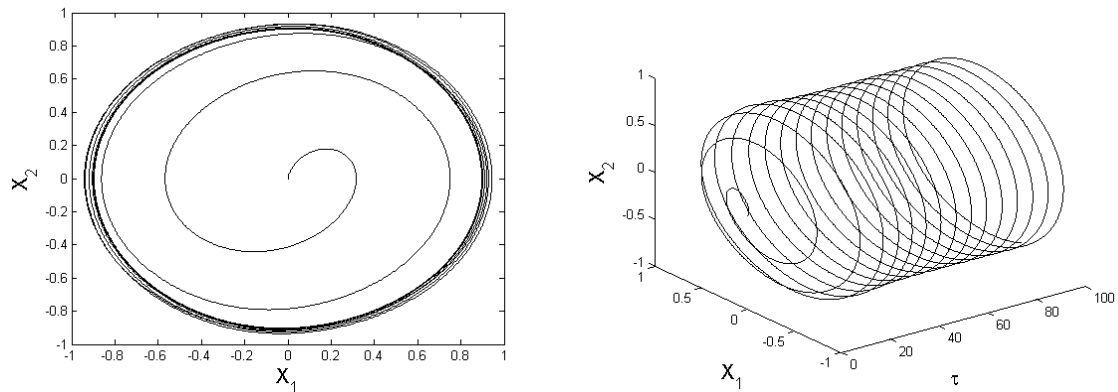


Figura 4.7 - Retrato de Fase no plano x-y (à esquerda) e Retrato de Fase em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).

Os retratos de fase em duas e três dimensões do sistema apresentados na fig. 4.7 mostram que o com o acoplamento não-linear o sistema atingiu a amplitude máxima de deslocamento em menos tempo que no caso linear.

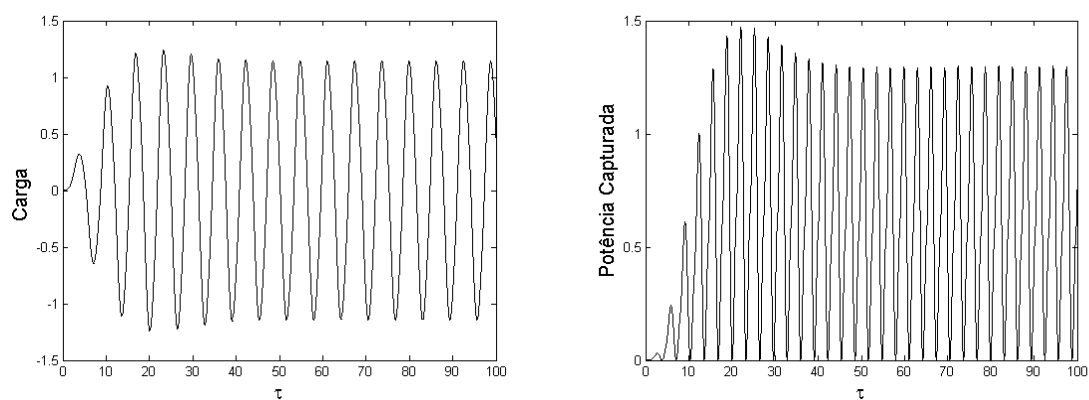


Figura 4.8 - Históricos no tempo: da Carga Elétrica (à esquerda) e da Potência Máxima Capturada (à direita).

O histórico no tempo para o deslocamento da carga adimensional e a potência máxima

adimensional capturada pelo dispositivo eletromecânico são representados na fig. 4.8 onde conclui-se que existe redução da energia capturada pelo dispositivo devido as não-linearidades piezoelétricas, contudo a energia capturada atingiu o regime permanente mais rápido que no caso linear.

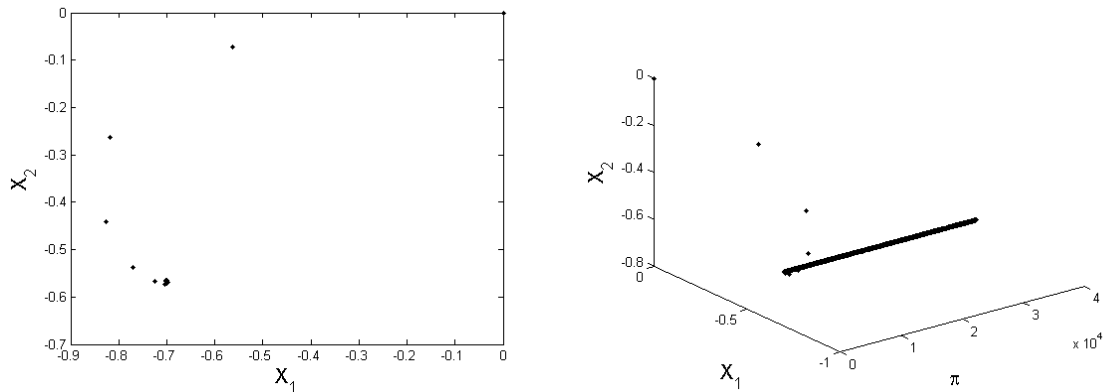


Figura 4.9 - Seção de Poincaré no plano x-y (à esquerda) e Seção de Poincaré em 3 dimensões superfície x-y-z (à direita).

Na fig. 4.9 analisando as Seções de Poincaré para o sistema no caso não-linear, verificou-se a mudança dos pontos onde os planos de coordenadas são marcados, contudo a resposta do sistema para a força de excitação aplicada continua sendo periódica.

Com a inclusão da não-linearidade piezoelétrica no sistema representada aqui pelo coeficiente $\Theta = 1.00$, verificou-se que para uma determinada faixa de valores de acoplamento linear θ entre (0.3 à 0.8), houve um ganho na potência capturada pelo dispositivo. Porém com aumento do coeficiente Θ , a interação desta não-linearidade com a estrutura torna-se mais forte, causando significativas perdas de potência quando o valor do acoplamento linear θ foi incrementado, pois agiu como um amortecimento sobre a resposta vibratória do sistema. Esse efeito é representado na fig. 4.10.

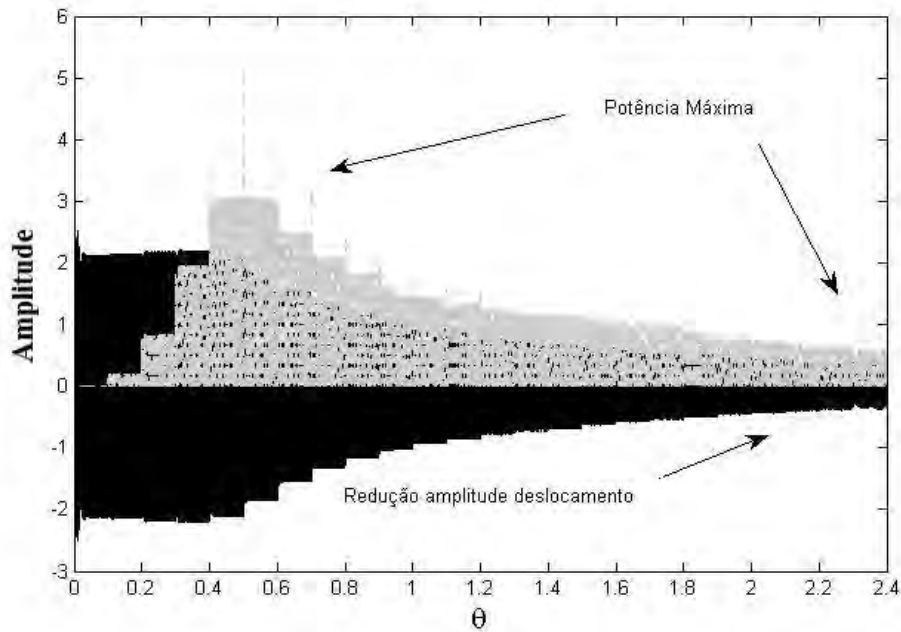


Figura 4.10 - Caso não-linear com coeficiente de acoplamento não-linear $\Theta=1.00$, e com a variação do valor do coeficiente de acoplamento linear θ ; preto: Deslocamento do Sistema, cinza: Potência Máxima Capturada.

Na fig. 4.11 nota-se a redução da amplitude de deslocamento do sistema devido a acréscimos do valor do coeficiente de acoplamento não-linear. Quanto maior o valor de Θ , maior é o amortecimento da estrutura e consequentemente a potência capturada tende a reduzir significativamente.

Pode-se concluir após essa análise que a definição dos melhores valores para os coeficientes de acoplamento piezoelétrico linear e não-linear influenciam na quantidade de energia capturada pelo dispositivo eletromecânico projetado. Tal comportamento atribui-se as não-linearidades que se encontram presentes nos materiais com propriedades piezolétricas, como a histerese, seus efeitos sobre a resposta dinâmica do sistema de captura de energia não podem então serem desprezados no momento em que se está projetando estes dispositivos.

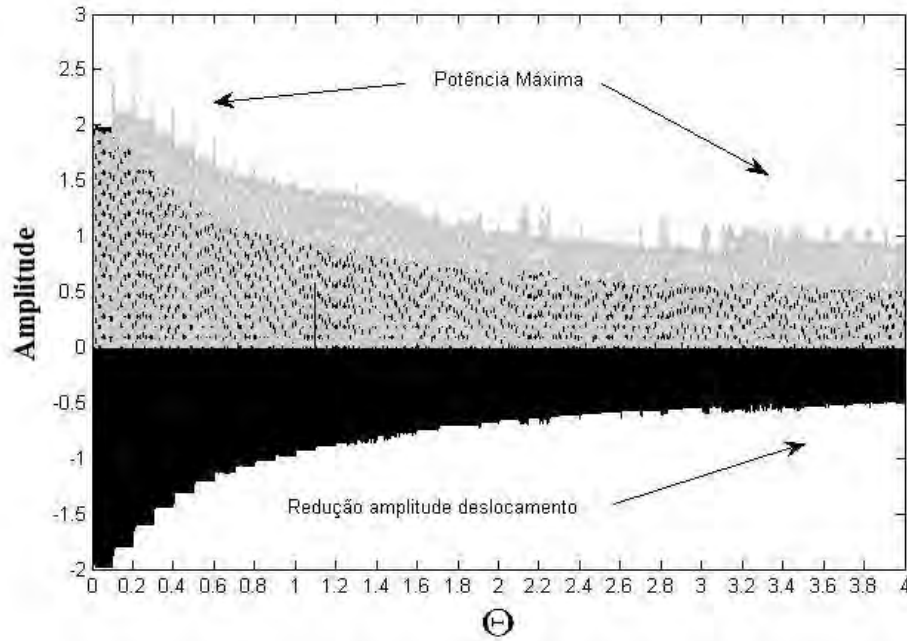


Figura 4.11 - Potência máxima alcançada com coeficiente de acoplamento linear $\theta=1.00$, e com a variação do valor do coeficiente de acoplamento não-linear Θ ; preto: Deslocamento do Sistema, cinza: Potência Máxima Capturada.

Os valores para os coeficientes de acoplamento podem ser encontrados por experimentos físicos e utilizados em simulações computacionais, levando-se sempre em consideração que tais valores dependem das dimensões do modelo e das propriedades de cada material piezoelétrico escolhido.

4.2. Análise do Sistema de Captura de Energia Não-Ideal

Para as simulações numéricas do sistema não-ideal utilizou-se os seguintes valores para os parâmetros adimensionais:

$$\alpha = 0.01 \quad b = 0.25 \quad \rho = 1.00 \quad \varepsilon = 0.10 \quad \delta_1 = 0.40$$

$$\delta_2 = 0.40 \quad \gamma = 0.60 \quad \mu_2 = 1.50$$

$$x_1(0) = 0, \quad x_2(0) = 0, \quad x_3(0) = 0, \quad x_4(0) = 0, \quad x_5(0) = 0$$

De uma forma semelhante como na seção anterior, dividiu-se em alguns casos específicos as simulações numéricas do sistema não-ideal. Uma comparação entre os casos onde o torque do motor de corrente contínua foi tomado como sendo uma função linear e em outra uma função exponencial para representar a relação torque *versus* velocidade angular do motor. Com isso buscou-se verificar a influência do tipo de torque usado na resposta dinâmica do modelo. Outro caso analisou-se a influência da variação dos valores dos parametros de acoplamento piezoelétrico linear e não-linear. Assim pode-se verificar a influência das não-linearidades sobre a resposta do sistema dinâmico verificando assim a potência máxima capturada pelo dispositivo não-ideal. Uma análise do efeito Sommerfeld é realizada para verificar sua influência sobre o comportamento dinâmico do sistema. Analisou-se o sistema através de históricos de deslocamento do tempo, retratos de fase, expoentes de Lyapunov. As curvas de amplitude em ressonância, curvas de frequência de excitação em ressonância, foram obtidos como segue: para cada valor do parâmetro controle μI (tensão elétrica aplicada no motor de corrente contínua) foram capturadas as amplitudes máximas das oscilações do sistema e as velocidades angulares médias do motor.

4.2.1. Resposta Dinâmica do Sistema Excitado por um Motor com Relação Linear Torque-Velocidade

Com base na resposta da curva de amplitude em ressonância, encontrou-se o valores de μI onde a região de ressonância é alcançada e a amplitude de vibração do sistema alcança seu valor máximo de deslocamento para a massa concentrada.

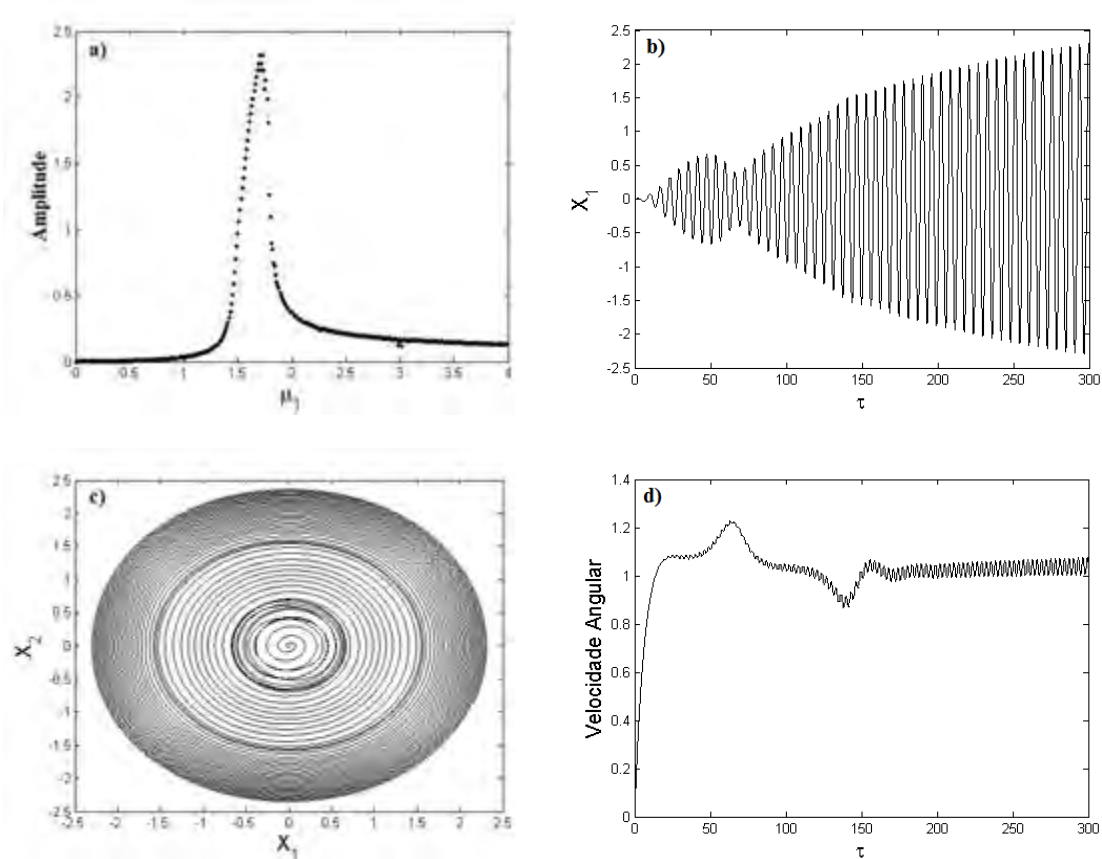


Figura 4.12 – Com $\theta = 0.00$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

Inicialmente demonstra-se a resposta do sistema sem captura de energia, onde o parâmetro acoplamento linear piezoelétrico $\theta = 0.00$ e parâmetro acoplamento não-linear piezoelétrico também é $\Theta = 0.00$. Na fig. 4.12a, pode-se ver o ponto onde o efeito Sommerfeld ocorreu com o valor do parâmetro controle ($\mu l = 1.730$), nota-se a dinâmica do modelo na fig. 4.12b através dos gráficos de histórico de deslocamento no tempo, na fig. 4.12c apresenta-se o retrato de fase e na fig. 4.12d é demonstrada velocidade angular do motor de corrente contínua.

4.2.1.1. Captura de Energia Linear

Inicialmente, mostra-se a resposta do sistema quando o acoplamento piezoelétrico é apenas linear, com os valor do parâmetro de acoplamento linear piezoelétrico $\theta = 0.50$ e

o parâmetro de acoplamento não-linear piezoelétrico $\Theta = 0.00$. Com o valor do parâmetro de controle ($\mu I = 1.690$) identificado através da fig. 4.13a, o sistema atinge a região de ressonância onde obteve-se o deslocamento máximo da estrutura, e nesta condição foi atingida a potência máxima capturada. De modo a avaliar a influência do valor do parâmetro de controle sobre a captura de energia, efetuou-se uma análise de sensibilidade através da variação do valor nominal de μI em $\pm 20\%$. Com o decremento em -20% no valor nominal de μI encontra-se a região de pré-ressonância e com o incremento de $+20\%$ ao valor de μI atinge-se a região de pós-ressonância, verificando assim o comportamento do sistema e a energia máxima capturada. Em todos os casos posteriores foi mantida esta mesma metodologia sobre o valor do parâmetro de controle.

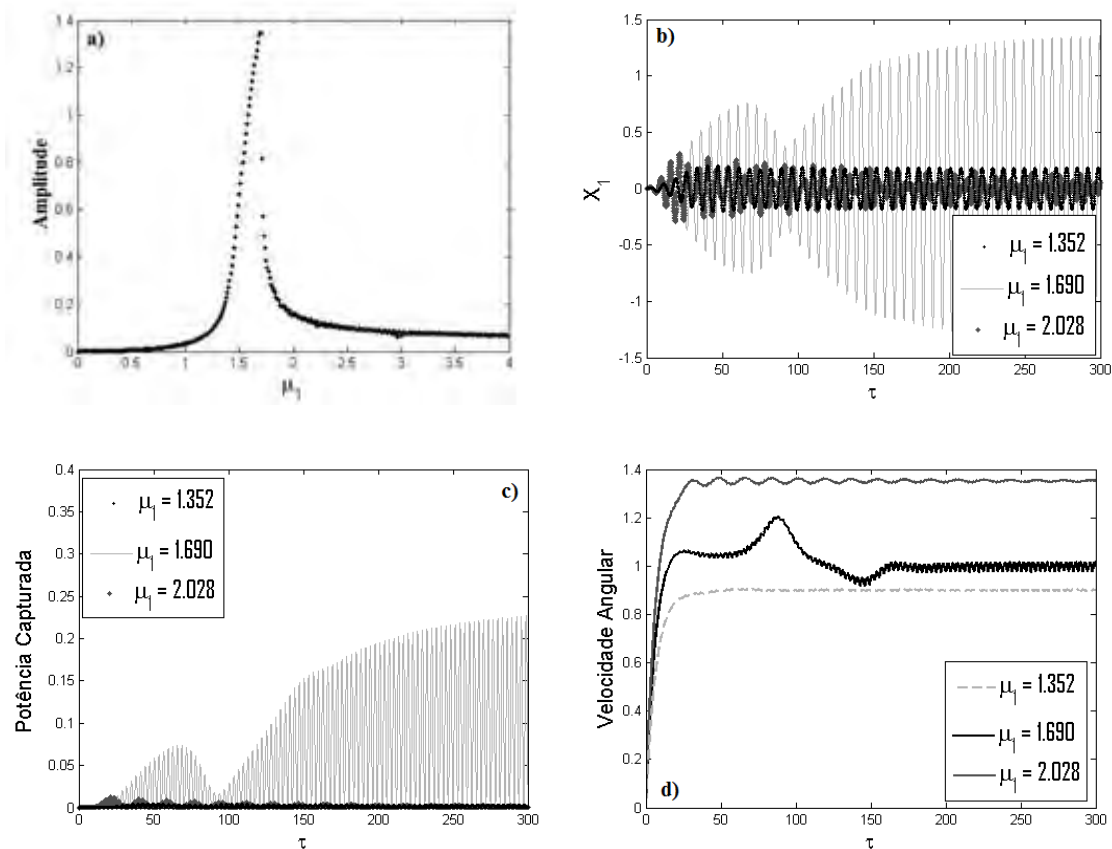


Figura 4.13 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

A fig. 4.13b apresenta a amplitude de deslocamento nas regiões de ressonância, pré-ressonância e pós-ressonância onde pode-se identificar que a amplitude de deslocamento nas regiões de pré-ressonância e pós-ressonância são visivelmente menores o que demonstra que a variação no parâmetro de controle μI influenciou na eficiência do dispositivo de captura de energia. A potência máxima capturada alcançada nas regiões de pré-ressonância e pós-ressonância são também muito inferiores a potência máxima capturada na região de ressonância como mostrado na fig. 4.13c. Na fig. 4.13d temos um comparativo das velocidades angulares alcançadas, onde nota-se a captura pela ressonância para $\mu I = 1.690$.

4.2.1.2. Captura de Energia Não-Linear

Para as respostas do sistema não-linear, fixou-se o valor do parâmetro de acoplamento linear piezoelétrico em $\theta = 0.50$. Então, escolheu-se os valores do parâmetro de acoplamento não-linear piezoelétrico como sendo: $\Theta = 0.50$, $\Theta = 1.00$ e $\Theta = 1.50$.

Quando efetuado o aumento no valor do parâmetro de acoplamento piezoelétrico não-linear, pode-se notar que a amplitude de vibração diminuiu e a potência capturada teve um aumento quando o sistema estava operando na região de ressonância. Porém com a alteração do valor do parâmetro de controle μI para -20% ou para +20% do valor nominal encontrado através das curvas de amplitude em ressonância, o mesmo comportamento ocorrido no caso linear foi encontrado e nas regiões de pré-ressonância e pós-ressonância, ocorrendo uma diminuição significativa da amplitude de deslocamento do sistema e a consequente redução na potência capturada.

Conclui-se que o aumento no valor da não-linearidade fez o sistema capturar mais energia quando operando em modo de ressonância. A região de ressonância foi atingida

antes com o aumento da não-linearidade no acoplamento o que indicou que uma tensão elétrica menor foi exigida para o motor passar pela região de ressonância e atingir seu regime permanente. Notou-se que o aumento do valor no parâmetro de acoplamento não-linear piezoelétrico teve influência sobre a amplitude de deslocamento, pois agiu como um coeficiente de amortecimento.

As fig. 4.14, fig.4.15 e fig.4.16, respectivamente mostram as respostas do sistema de captura de energia não-ideal.

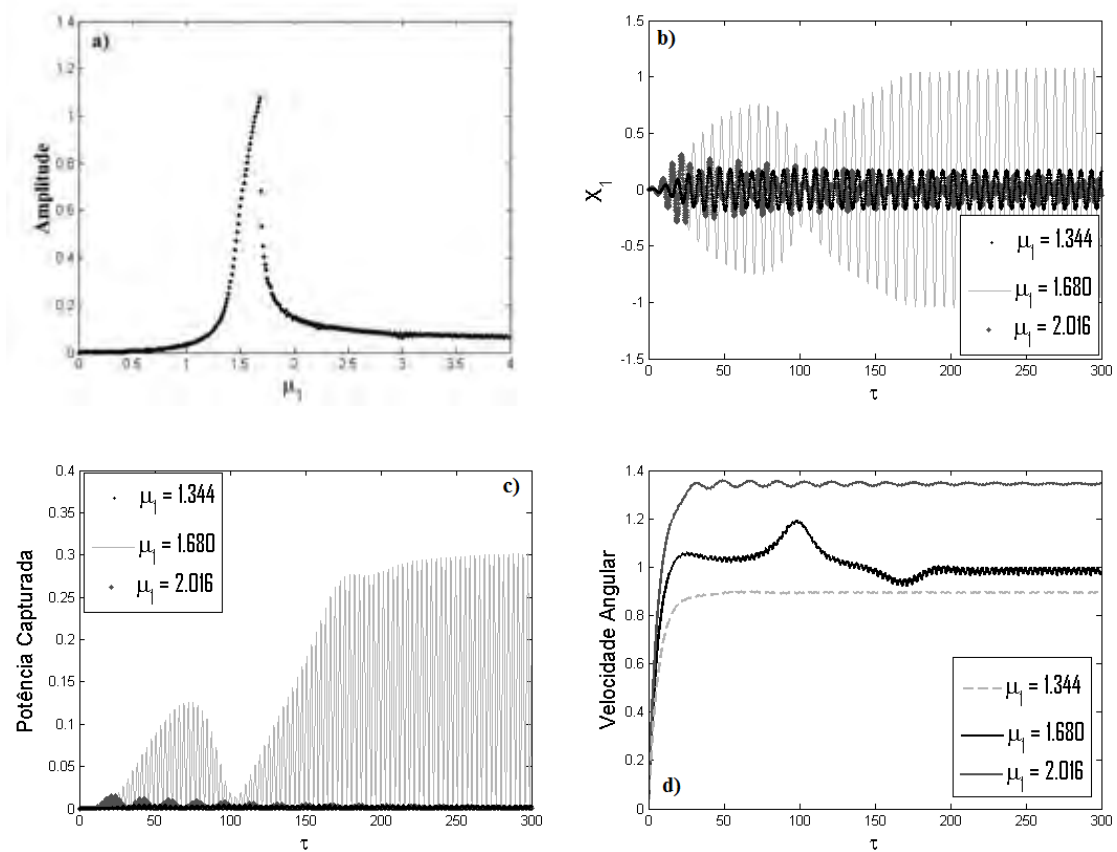


Figura 4.14 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

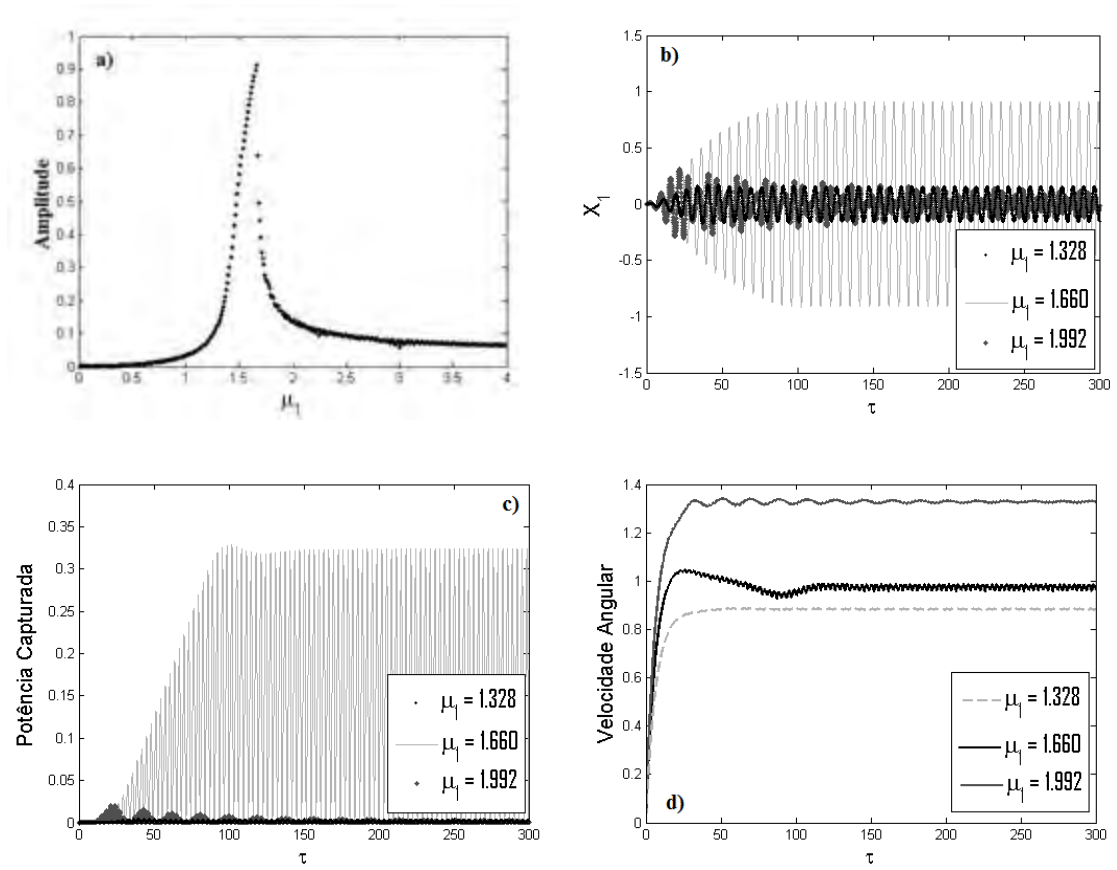
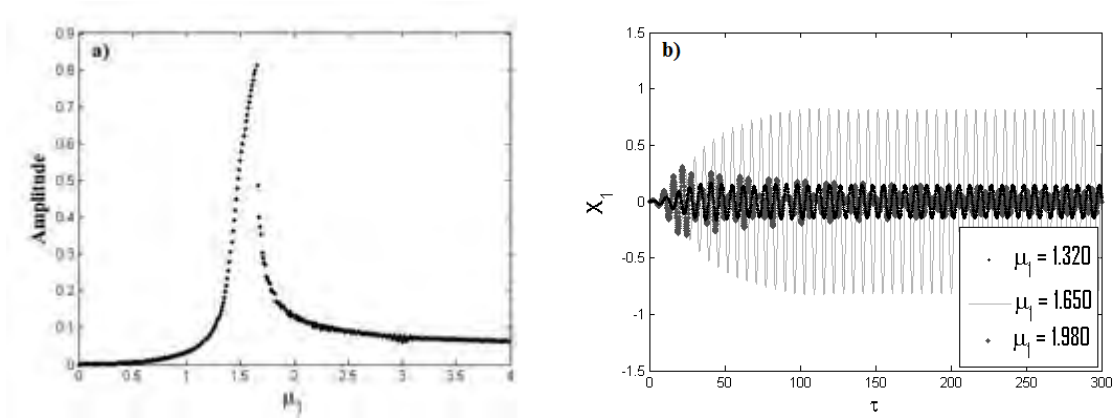


Figura 4.15 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor



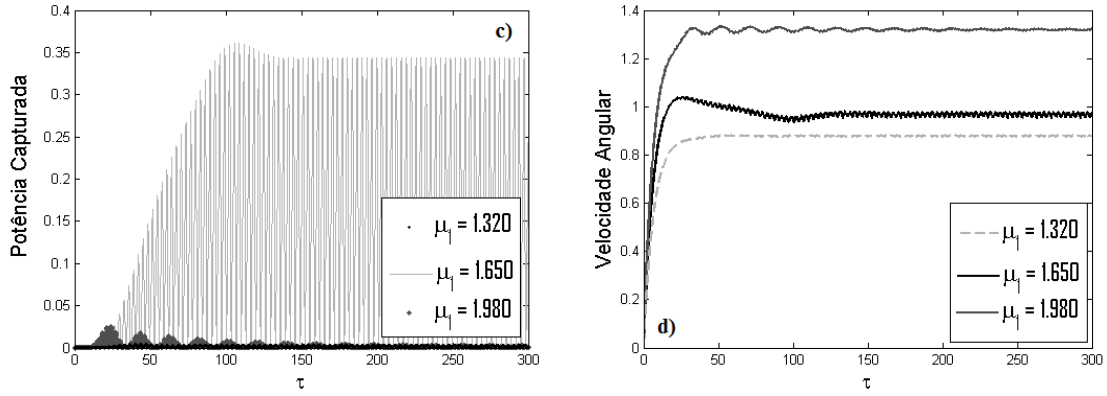


Figura 4.16 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

4.2.1.3. Comportamento Caótico do Sistema

Levando-se em consideração o valor numérico do parâmetro de acoplamento piezoelétrico linear $\theta = 0.10$ e o valor do parâmetro de acoplamento piezoelétrico não-linear $\Theta = 0.50$, escolheu-se o valor do parâmetro de controle do motor $\mu_I = 2.50$ e por meio das simulações numéricas realizadas, um comportamento caótico foi encontrado. Analisando o retrato de fase e histórico de deslocamento no tempo, pode-se notar que o comportamento caótico ocorreu no sistema e que o mesmo pode ser atribuído à interação entre a fonte de energia não-ideal e a estrutura do dispositivo.

Na fig. 4.17a tem-se o retrato de fase do sistema oscilando entre os pontos de equilíbrio, na fig. 4.17b o histórico de deslocamento no tempo para o sistema em regime permanente, na fig. 4.17c demonstra-se a potência máxima capturada pelo sistema em regime estacionário. Nota-se que a potência capturada ao longo do tempo tende a oscilar, diminuindo devido ao movimento caótico do dispositivo.

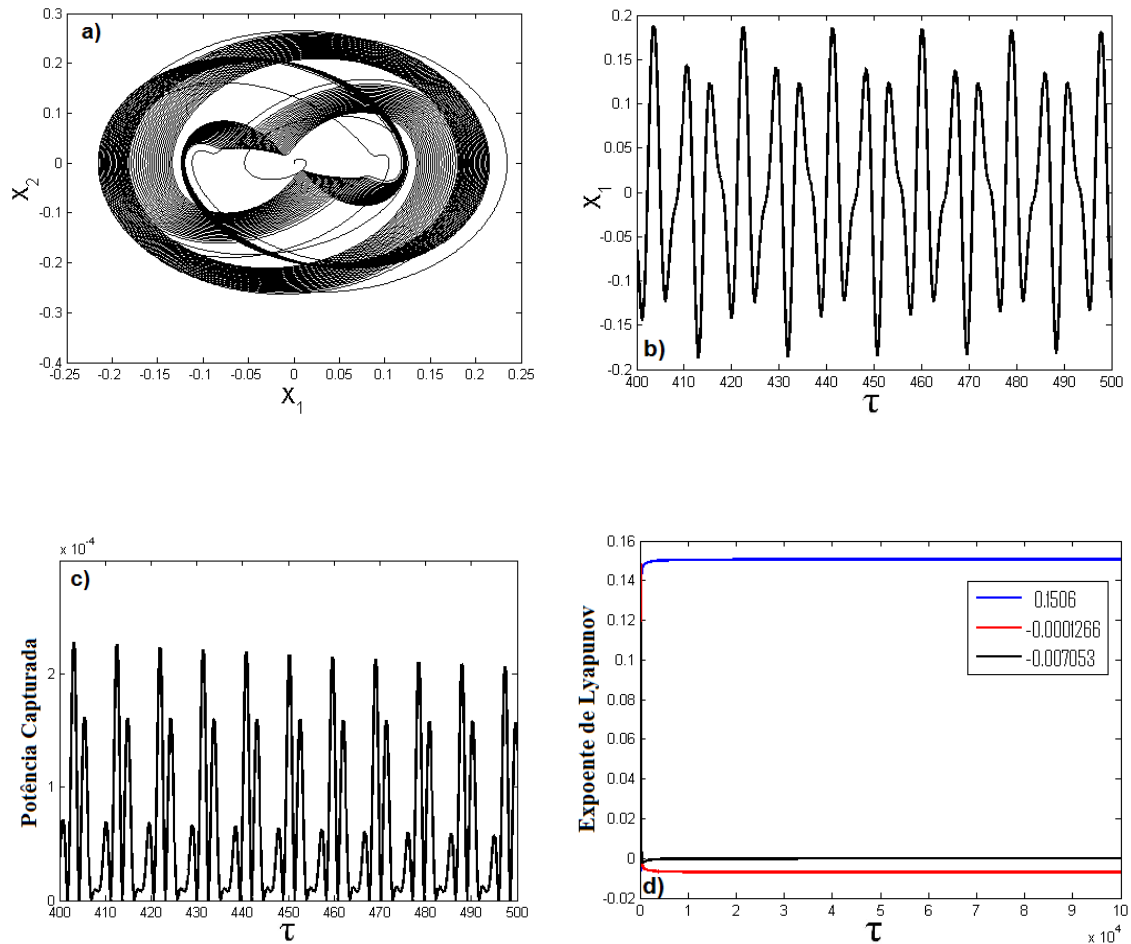


Figura 4.17 – Com $\theta = 0.10$ e $\Theta = 0.50$: Comportamento C otico do Sistema: em (a)Retrato de Fase; (b) Histórico de Deslocamento no Tempo; (c) Potência Máxima Capturada; (d) em azul Maior Expoente de Lyapunov

Nota-se que na fig. 4.17d a presença de um expoente de Lyapunov positivo, o que é um bom indicador para a confirmação da presença de caos no sistema.

Sendo assim, nesta condição caótica o sistema   instável e então a potência máxima capturada tende a sofrer oscilações ao longo do tempo.

Com incrementos do valor do parametro de controle μ_I (tensão do motor) ao longo do tempo pode-se notar a dinâmica do sistema e verificar os pontos onde o efeito Sommerfeld ocorre bem como a região de instabilidade do sistema. A partir de certos valores de μ_I um comportamento caótico é observado como observado na fig. 4.18.

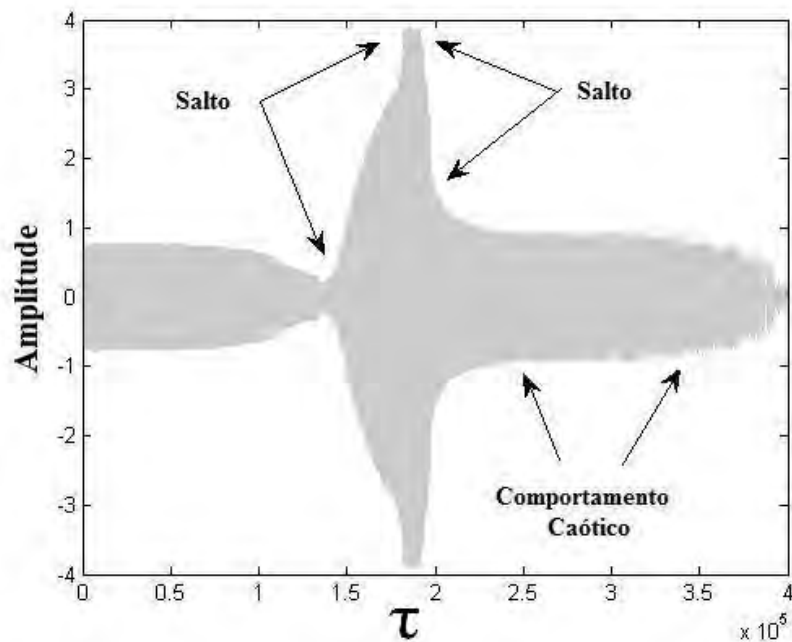


Figura 4.18 – Efeito Sommerfeld e Comportamento Caótico

4.2.2. Resposta Dinâmica do Sistema Excitado por um Motor com Relação Exponencial Torque-Velocidade

A análise da resposta do sistema neste caso foi realizada de modo semelhante que na seção anterior. Utilizou-se os mesmos valores de parâmetros na simulação numérica, e utilizando uma função exponencial para expressar a relação torque-velocidade do motor, pode-se notar que a amplitude de vibração do modelo diminuiu e o fenômeno do salto ocorreu para valores menores do parâmetro de controle μl . Comparando-se a fig. 4.12a com a fig. 4.19a pode-se perceber a nítida diferença no ponto onde ocorreu o efeito Sommerfeld. Verifica-se também uma pequena diminuição na amplitude de deslocamento em relação ao modelo excitado por uma função linear. Com o valor do parâmetro de controle ($\mu l = 0.690$), o sistema alcançou a amplitude máxima de deslocamento com o sistema vibrando em sua frequência de ressonância, em

comparação como sistema excitado pela função linear que só chegou a região de ressonância com ($\mu l = 1.730$).

A fig. 4.19 apresenta o comportamento do sistema inicialmente sem captura de energia.

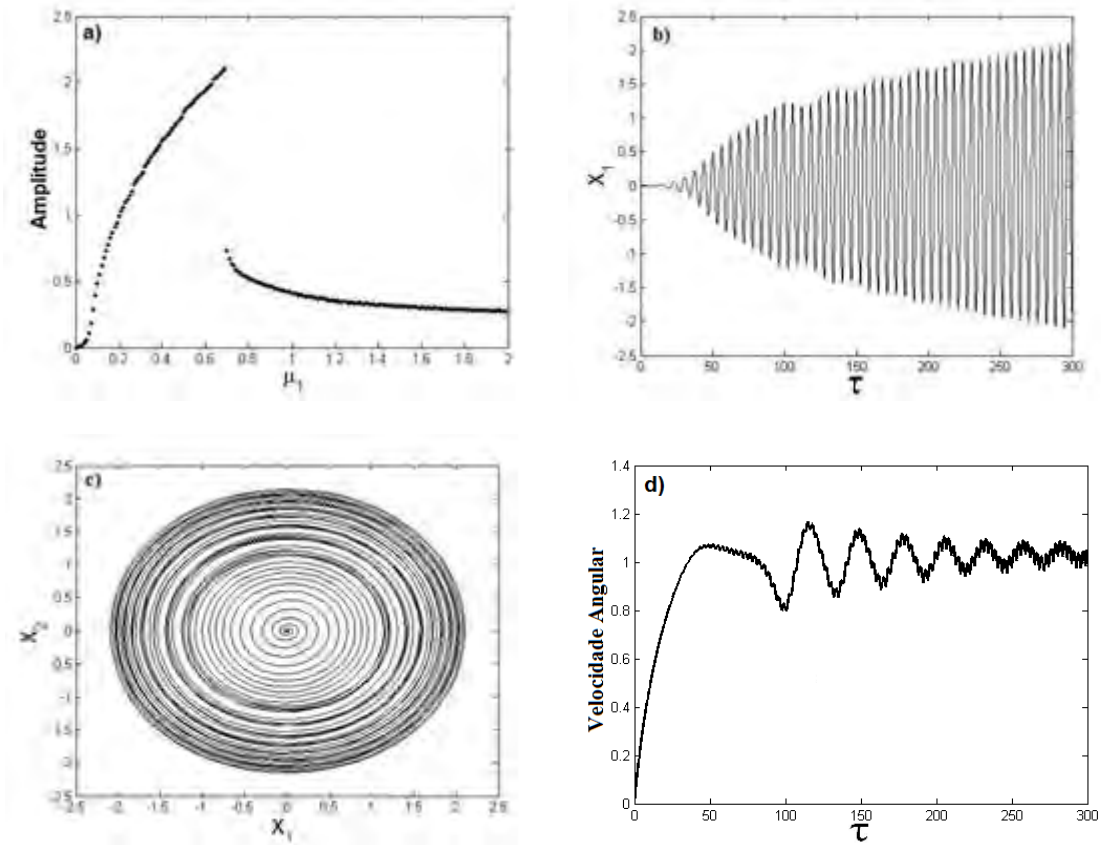


Figura 4.19 – Com $\theta = 0.00$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

4.2.2.1. Captura de Energia Linear

Na fig. 4.20, com o valor do parâmetro de controle ($\mu l = 0.640$) a região de ressonância foi alcançada e o sistema teve sua amplitude máxima de deslocamento, onde a potência capturada atinge o seu ponto de máximo. Com o valor do parâmetro de controle ($\mu l = 0.512$) a resposta é estável na região de pré-ressonância com uma potência capturada ligeiramente inferior a capturada na região de ressonância. Quando ($\mu l = 0.768$) a

resposta do sistema na região pós-ressonância tem uma pequena amplitude de vibração e conseqüentemente uma considerável redução na potência capturada, demonstrando que nesta região o sistema começa a perder a estabilidade.

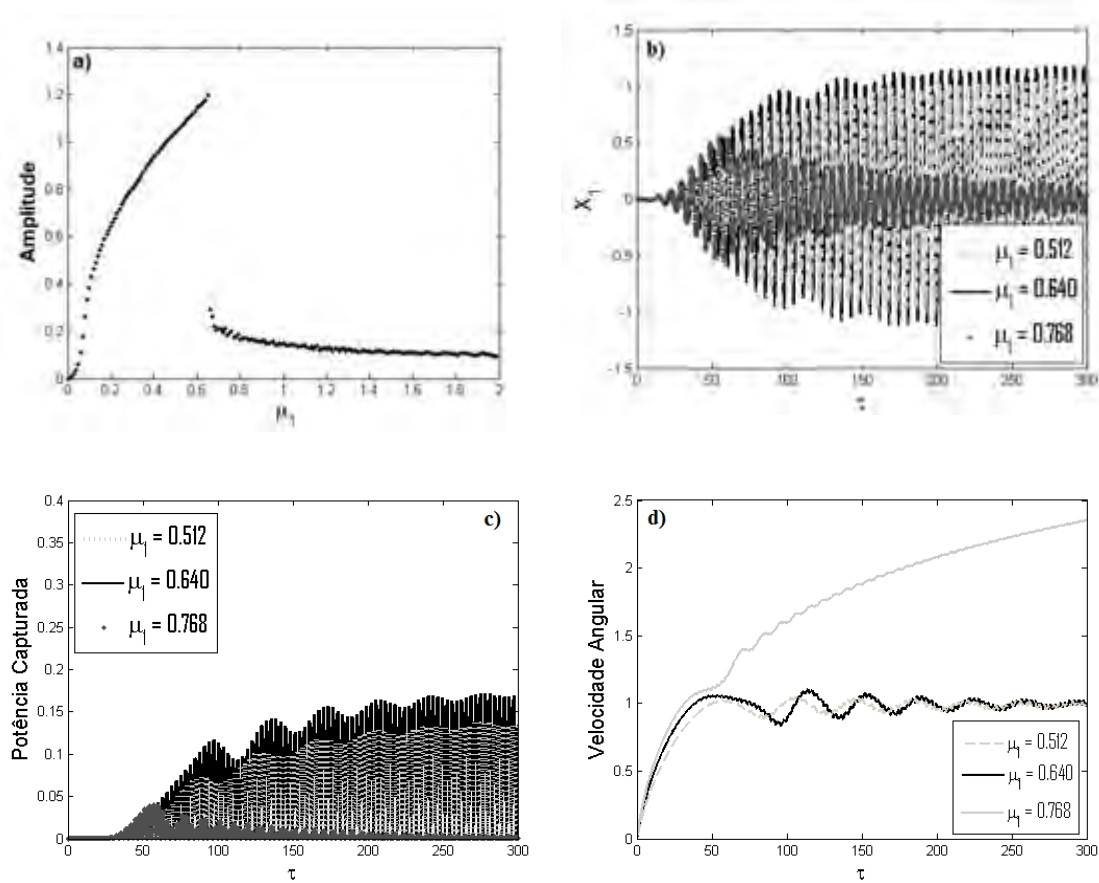


Figura 4.20 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

4.2.2.2. Captura de Energia Não-Linear

Quando a função que representa a relação torque-velocidade do motor de corrente contínua é exponencial, as respostas do sistema novamente demonstraram resultados relevantes. O aumento do valor do parâmetro de acoplamento não-linear piezoelétrico resultou no aumento da potência máxima capturada, com o comportamento do sistema se mantendo estável, tanto na região de pré-ressonância quanto na região de

ressonância. Obteve-se a maior potência capturada quando o parâmetro de acoplamento não-linear piezoelétrico foi $\Theta = 1.50$, onde novamente a região de ressonância foi alcançada para um menor valor do parâmetro e controle μI . Após a passagem pela região de ressonância o sistema tornou a apresentar uma grande diminuição na amplitude de vibração para todos os valores de Θ simulados e com isso houve a consequente redução da potência capturada .

As respostas do sistema podem ser verificadas por meio das fig. 4.21, fig. 4.22 e fig. 4.23, respectivamente.

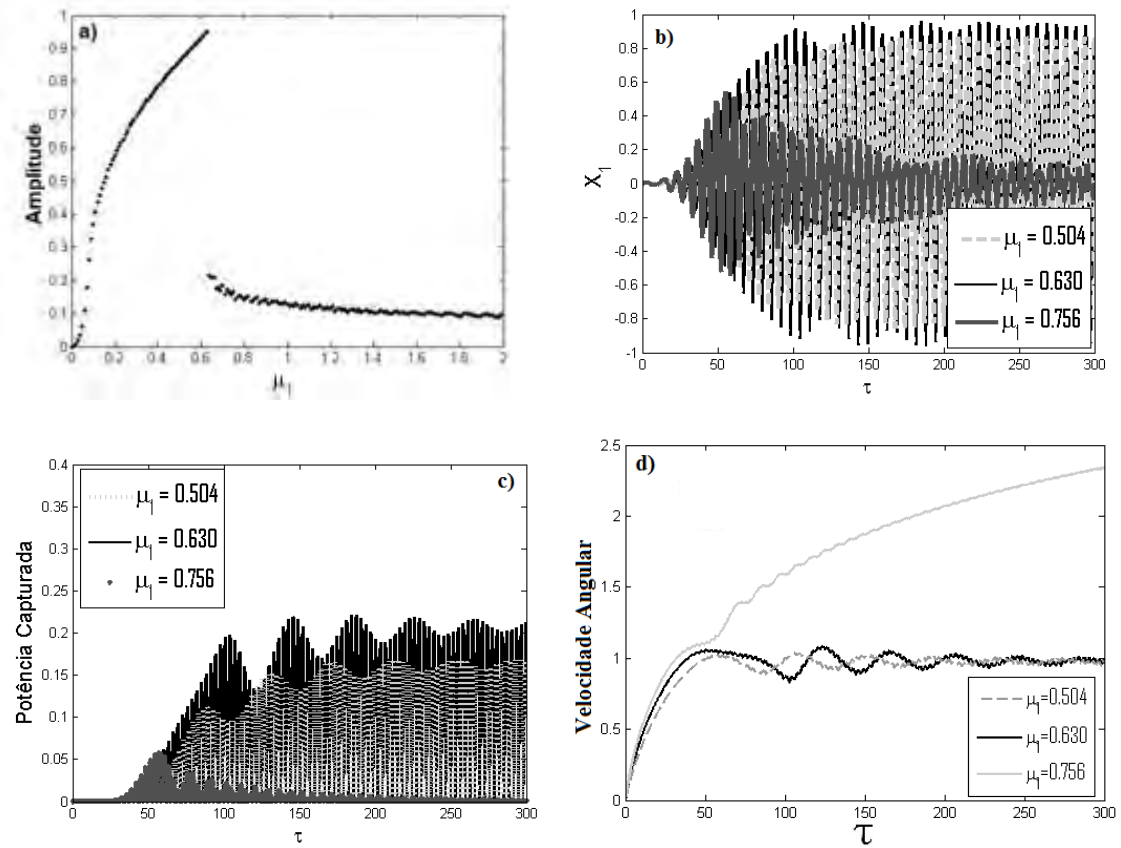


Figura 4.21 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 0.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

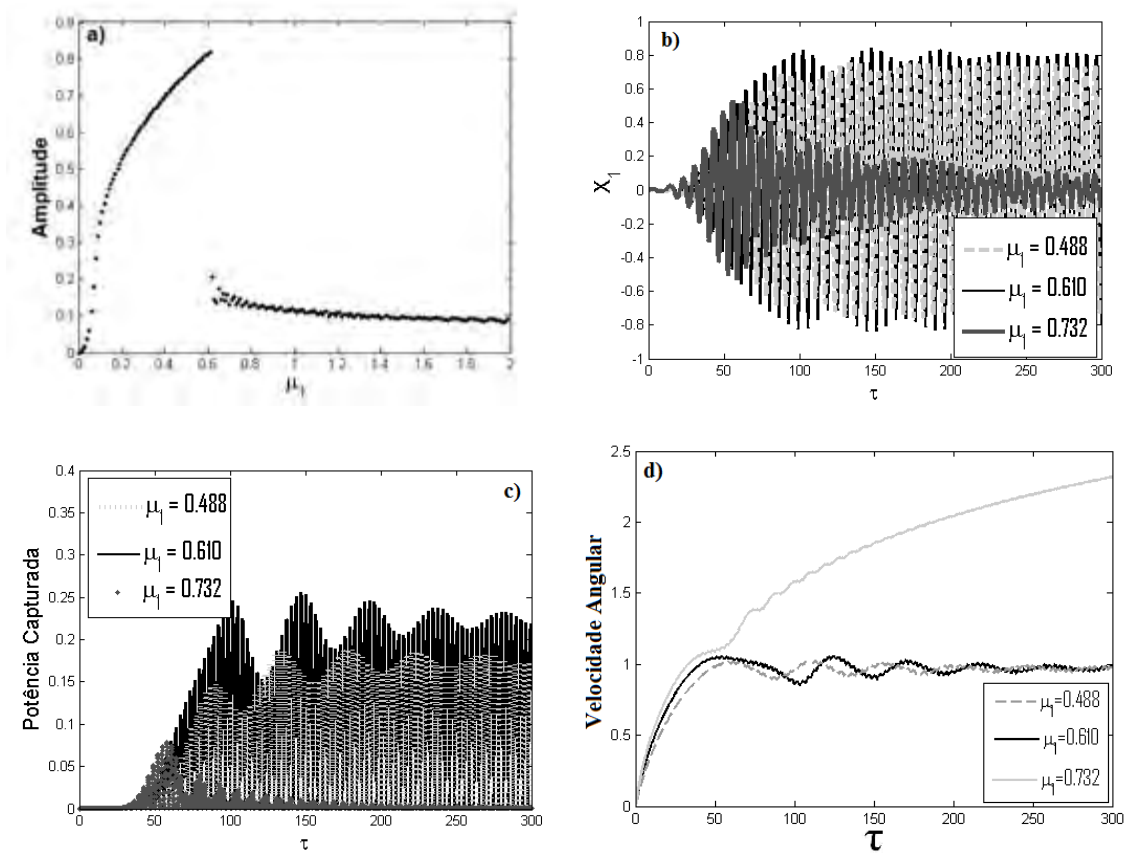
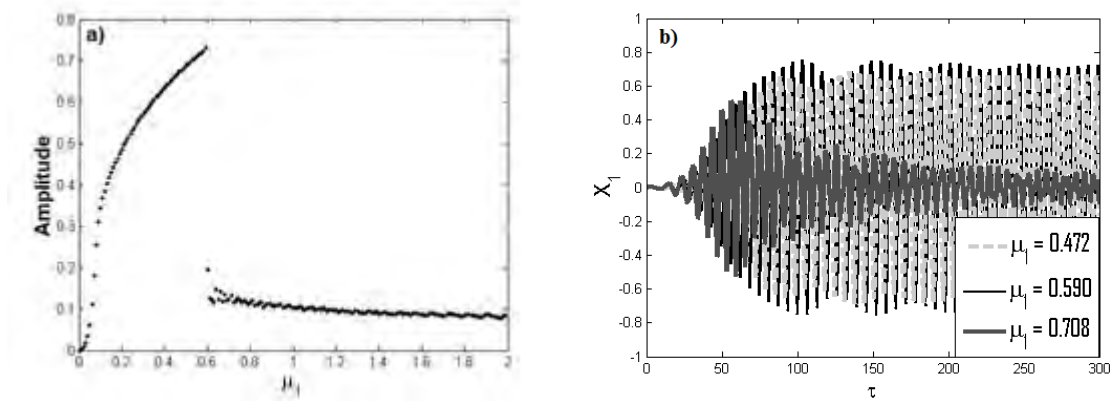


Figura 4.22 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.00$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor



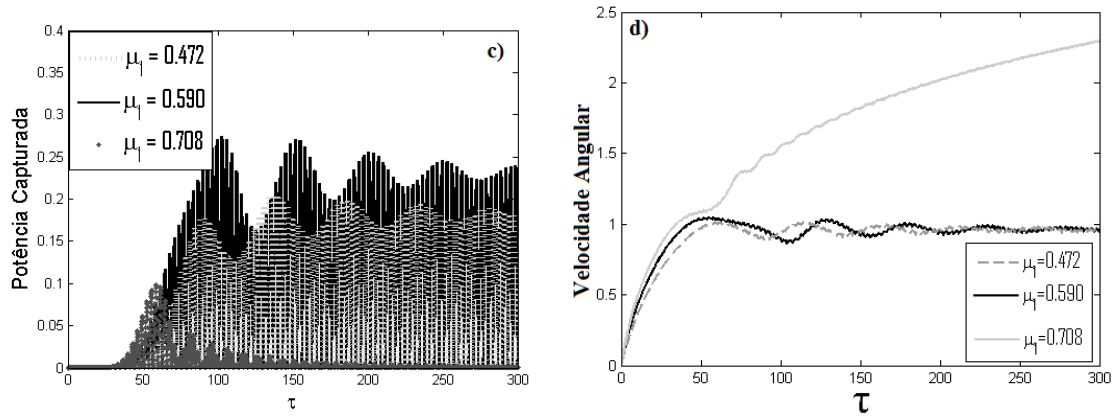


Figura 4.23 - Com $\theta = 0.50$ e $\Theta = 1.50$: (a) Curva de Amplitude em Ressonância; (b) Histórico no Tempo; (c) Retrato de Fase; (d) Velocidade Angular do Motor

Pode-se concluir que a utilização de uma função exponencial que representa a relação torque-velocidade para excitar o modelo de captura de energia não-ideal, apresentou como resultado uma potência máxima capturada ligeiramente inferior ao sistema excitado pela função linear. Contudo comparando as duas respostas dinâmicas, pode-se concluir que no caso da função linear, apenas na região de ressonância o sistema alcançou uma potência capturada satisfatória, por outro lado no caso em que a excitação foi a função exponencial o sistema apresentou uma boa resposta também na região de pré-ressonância. Levando em consideração que a família de curvas em motores reais são melhor aproximadas por uma função exponencial, chega-se a conclusão de que está é a melhor função para realizar as simulações numéricas e prever a potência máxima capturada pelo dispositivo não-ideal.

4.2.2.3. Comportamento Caótico do Sistema

Fazendo uma análise da resposta dinâmica do sistema semelhante a realizada na seção onde a relação torque-velocidade do motor foi aproximada por uma função linear, agora utilizando uma relação torque-velocidade exponencial, notou-se que o comportamento

caótico ocorreu no sistema mais rapidamente no sistema. Tal comportamento pode ser verificado analisando a fig. 4.24.

Na fig. 4.24a é demonstrado o retrato de fase apresentando a densidade da órbita realizada pelo sistema oscilante. Na fig. 4.24b pode-se verificar através do histórico de deslocamento no tempo a ausência de períodos fixos de oscilação. A potência máxima capturada pelo sistema não-ideal pode ser vista na fig. 4.24c. Igualmente ao sistema excitado por uma função linear a potência capturada ao longo do tempo não é estável devido ao movimento caótico do dispositivo.

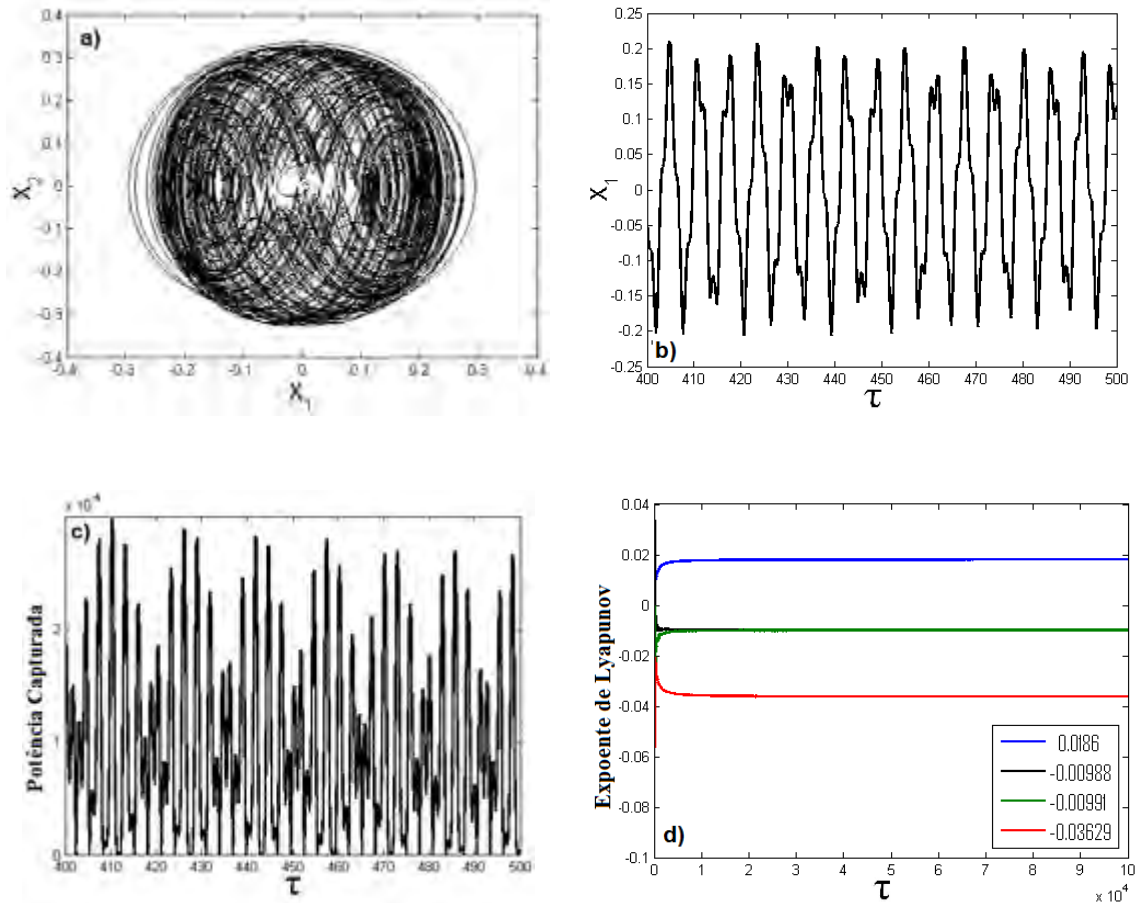


Figura 4.24 - Com $\theta = 0.10$ e $\Theta = 0.50$: Comportamento C otico do Sistema: em (a)Retrato de Fase; (b) Histórico de Deslocamento no Tempo; (c) Potência Máxima Capturada; (d) em azul Maior Expoente de Lyapunov

Os expoentes de Lyapunov são apresentados na fig. 4.24d onde em azul encontra-se o maior expoente que possui valor positivo.

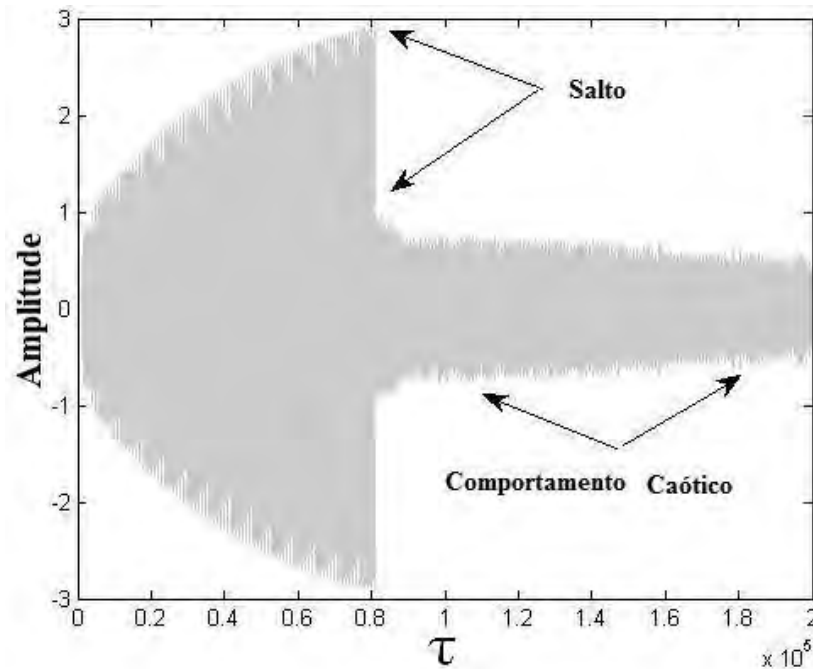


Figura 4.25 - Efeito Sommerfeld e Comportamento Caótico

Na fig. 4.25 pode-se também verificar os pontos onde o efeito Sommerfeld ocorreu para o sistema não-ideal assim como a região de instabilidade. A medida que houveram incrementos no valor do parâmetro de controle μ_I um comportamento caótico foi observado ao longo do tempo de simulação. Isso comprova que a utilização da uma relação torque-velocidade exponencial tende a levar o sistema mais rapidamente a apresentar um regime caótico.

4.3. Análise da Influência do Efeito Sommerfeld

O objetivo desta seção foi investigar o efeito Sommerfeld sobre o modelo não-linear excitado pela fonte de energia não-ideal, e analisar a variação do parâmetro de

acoplamento piezoelétrico linear e do parâmetro de acoplamento piezoelétrico não-linear, demonstrando suas influências na captura de energia. Aqui optou-se por utilizar a função exponencial que representa relação torque-velocidade do motor uma vez que essa tende a levar ao movimento caótico mais rapidamente.

Para todas as simulações numéricas realizadas, considerou-se o intervalo de tempo adimensional utilizado na faixa de $0 \leq \tau \leq 250$ e foi considerado que o regime permanente é a parte que resta após a remoção de dois terços iniciais das respostas numéricas das simulações.

O parâmetro de controle μl teve incrementos na faixa de $0.0 \leq \mu l \leq 2.0$ e para os parâmetros de acoplamento piezoelétrico linear e não-linear os valores foram escolhidos para cada caso abordado.

No primeiro caso, θ linear assume os valores (0.00, 0.50, 1.00 e 1.50) e Θ não-linear foi mantido com o valor 0.00.

No segundo caso, θ linear assume os valores (0.50, 1.00 e 1.50), para cada valor de Θ não-linear, que assume os valores (0.00, 0.50, 1.00 e 1.50).

Os resultados das simulações numéricas são apresentados em tabelas onde as colunas mostram os valores do parâmetro de acoplamento, o valor do parâmetro de controle no ponto onde ocorreu o salto, a amplitude máxima atingida antes do salto, a velocidade angular do motor, e potencia máxima capturada. Nas figuras pode-se comparar a dinâmica do sistema devido a variação do parâmetro de controle.

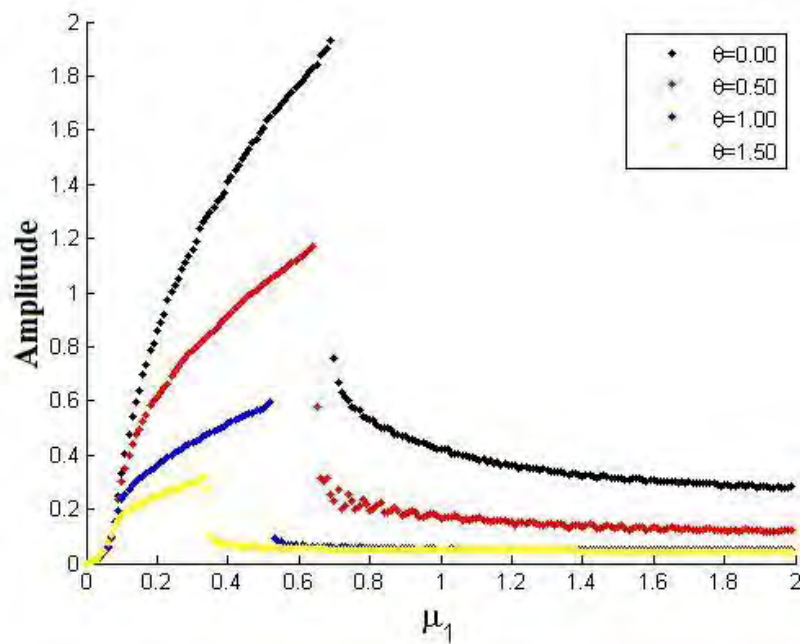
4.3.1. Primeiro Caso: Captura de Energia Linear

Os resultados apresentados na Tabela 1, mostram os valores da resposta dinâmica para a captura de energia linear. A fig. 4.26 mostra que o aumento no parâmetro de acoplamento linear provoca a diminuição da amplitude de vibração e o efeito

Sommerfeld ocorre para valores menores do parâmetro de controle μl . Como neste caso a potência máxima ocorre no ponto de maior deslocamento do sistema, com o aumento do parâmetro de acoplamento e a conseqüente redução da amplitude de vibração a potência máxima também é reduzida.

Tabela 4.1 – Resultados para θ linear = 0 à 1.50, neste caso Θ não-linear = 0.00

θ	μ_1	X_1	φ'	Power
0.00	0.69	1.934	1.021	0.00
0.50	0.64	1.171	0.9863	0.1691
1.00	0.52	0.5974	0.9524	0.1801
1.50	0.33	0.3119	0.9363	0.1033



a)

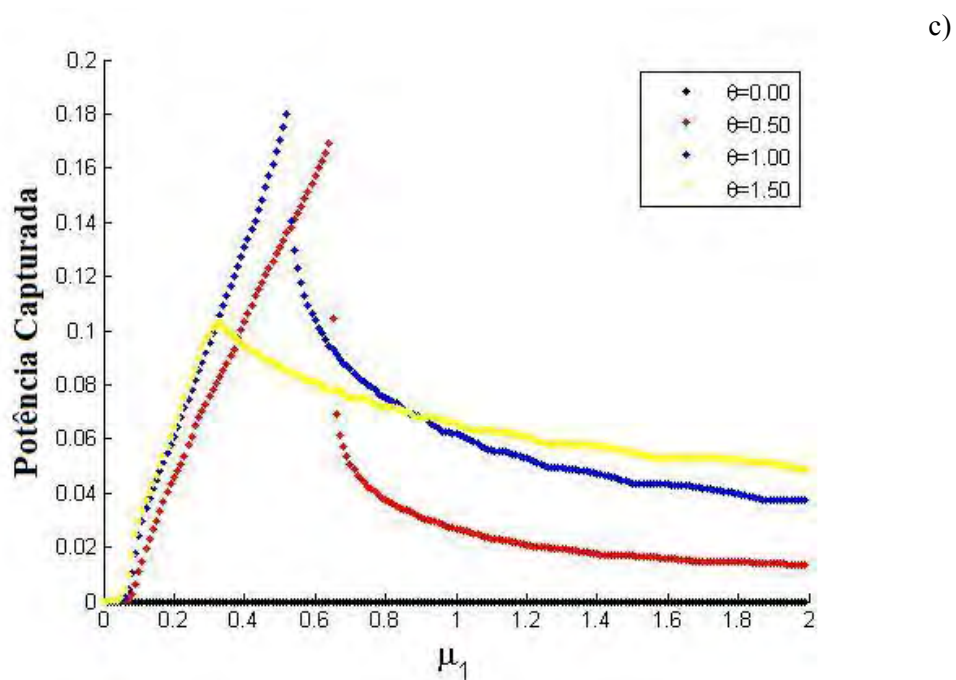
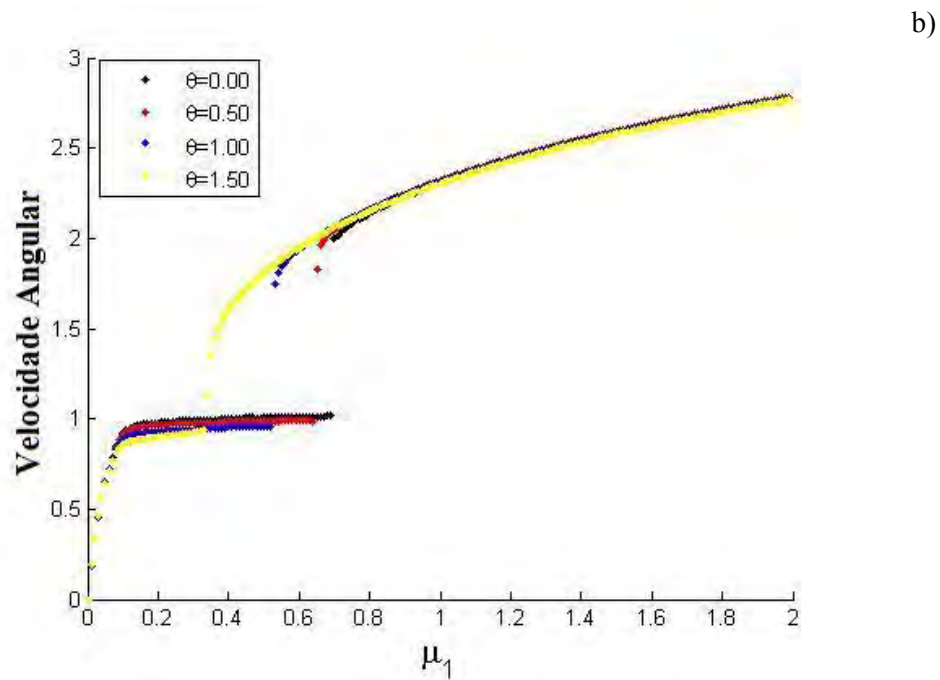


Figura 4.26 - Respostas do Sistema para Incrementos de θ linear = 0 à 1.50, Θ não-linear = 0.00; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada

4.3.2.Segundo Caso: Captura de Energia Não-Linear

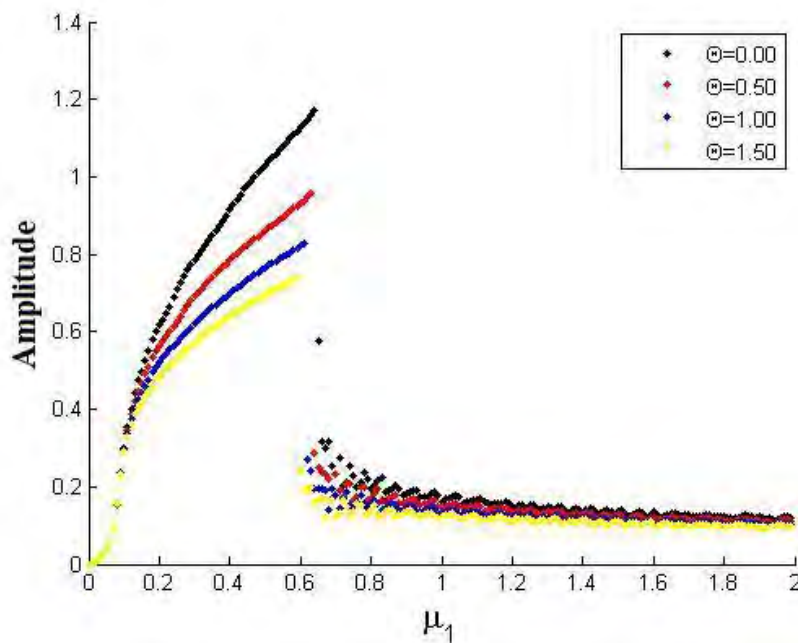
No segundo caso a Tabela 4.2 mostra os resultados para os valores de Θ não-linear,

quando o parâmetro de acoplamento piezoelétrico θ linear foi mantido fixo em 0.50, observou-se que com o aumento do parâmetro de acoplamento não-linear a potência capturada também aumentou e a amplitude de vibração permaneceu mais estável na região antes do fenômeno do salto, esse comportamento pode ser observado na fig. 4.27.

Tabela 4.2 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 0.50

Θ	μ_1	X1	φ'	Power
0.00	0.64	1.171	0.9863	0.1691
0.50	0.63	0.9574	0.9778	0.2213
1.00	0.61	0.8295	0.9701	0.2552
1.50	0.59	0.7386	0.9677	0.2744

a)



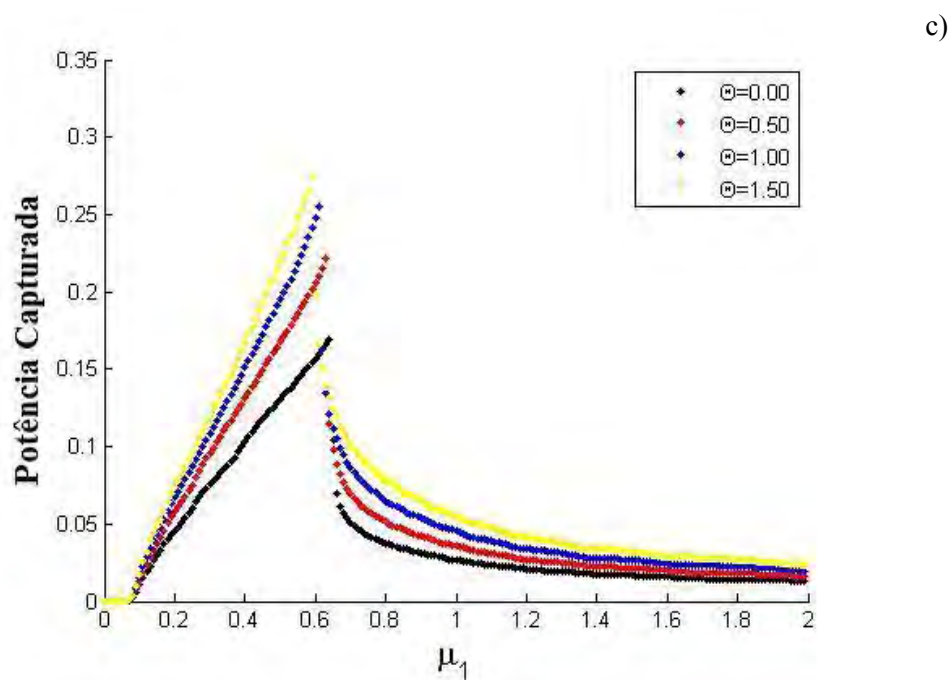
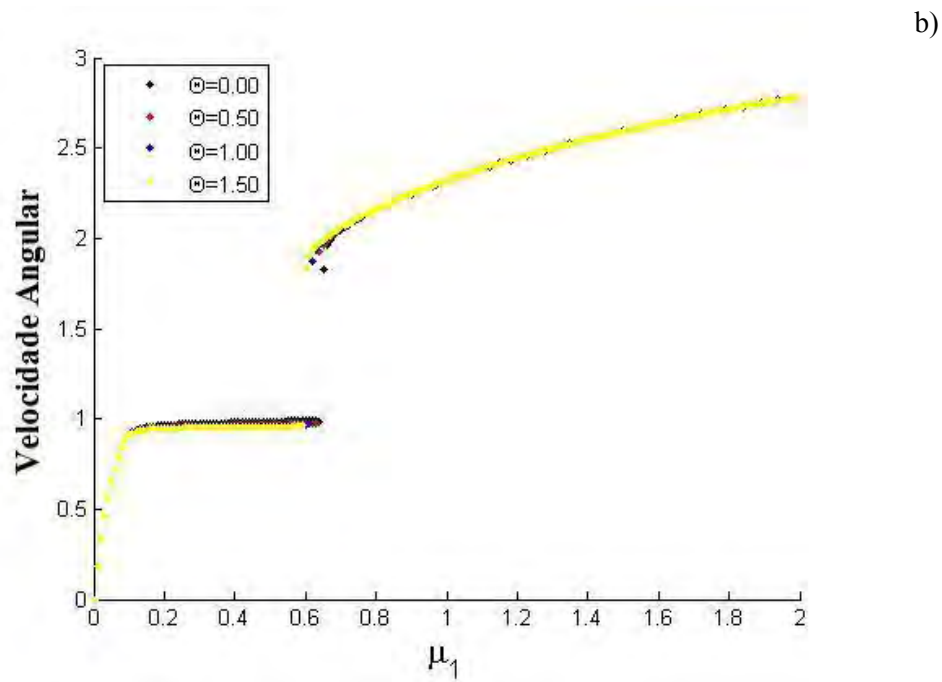


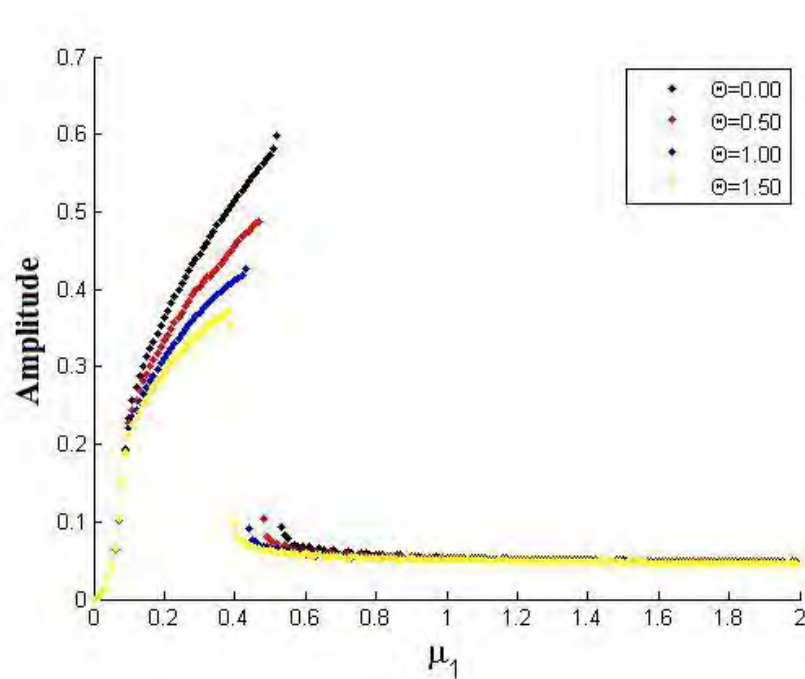
Figura 4.27 - Respostas do Sistema para Incrementos de Θ não-linear = 0 à 1.50, θ linear = 0.50; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada

Na Tabela 4.3 são demonstrados os resultados para os valores de Θ não-linear, quando o parâmetro de acoplamento piezoelétrico θ linear foi mantido fixo em 1.00, observou-se que com o aumento do parâmetro de acoplamento não-linear a potência capturada

diminuiu e a amplitude de vibração também foi fortemente reduzida. O fenômeno do salto passou a ocorrer com valores menores ainda de tensão elétrica aplicada no motor, esse comportamento pode ser observado na fig. 4.28.

Tabela 4.3 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 1.00

Θ	μ_1	X1	φ'	Power
0.00	0.52	0.5974	0.9524	0.1801
0.50	0.47	0.488	0.9462	0.175
1.00	0.43	0.4258	0.9368	0.1609
1.50	0.37	0.3671	0.9313	0.1467



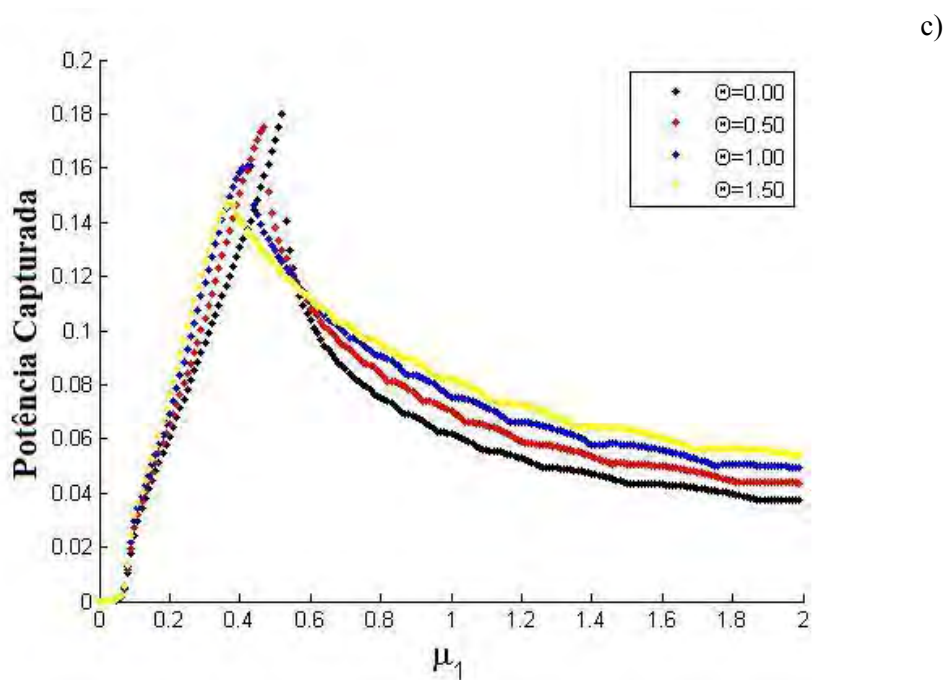
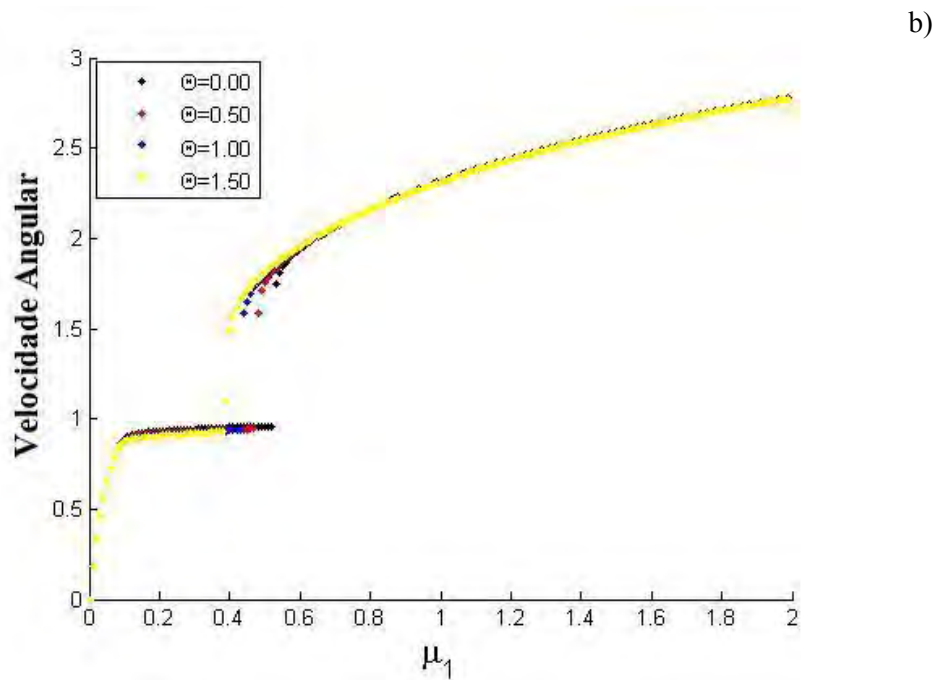
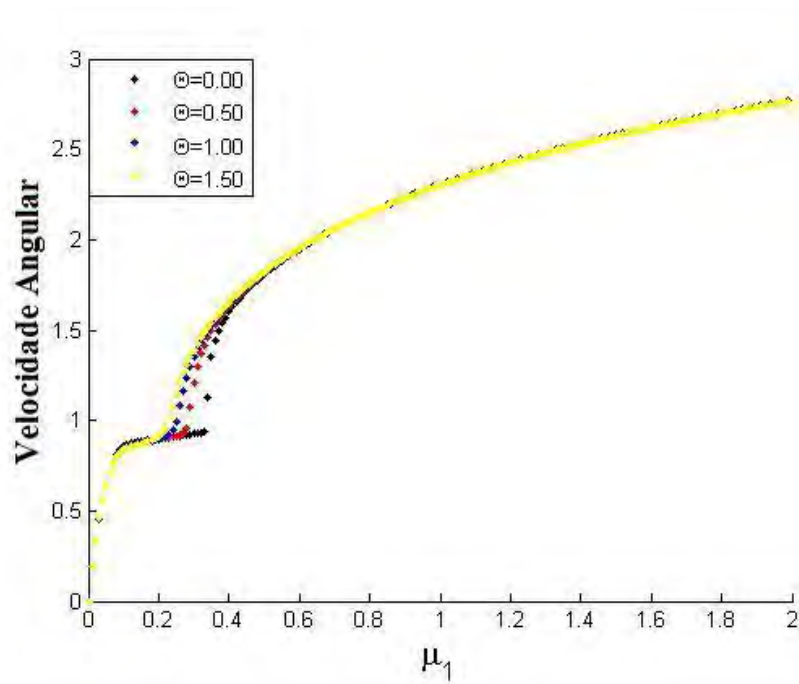
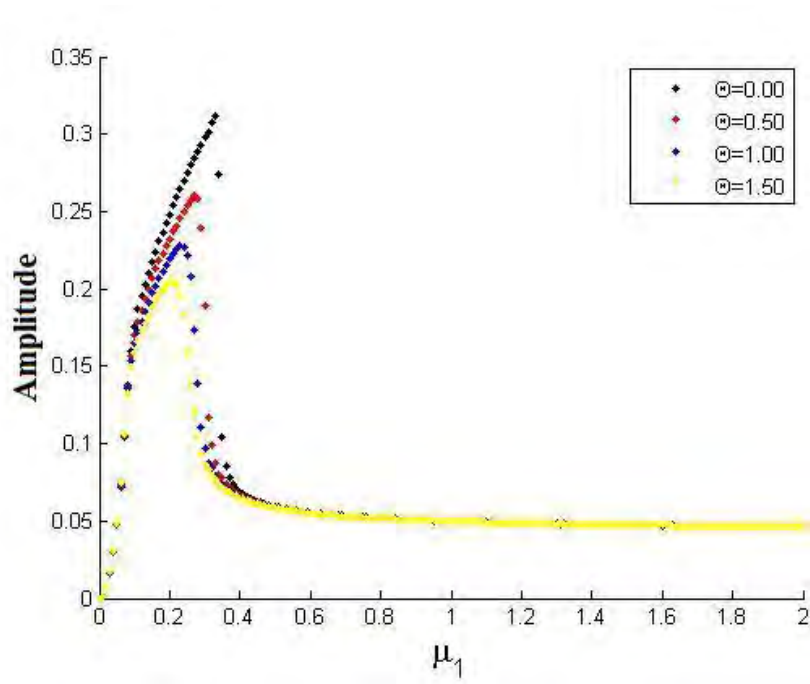


Figura 4.28 - Respostas do Sistema para Incrementos de Θ não-linear = 0 à 1.50, θ linear = 1.00; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada

Efetuada uma análise das respostas apresentadas na fig. 4.29, foram encontrados e em seguida colocados os valores dos parâmetros nas Tabelas 4.4 e 4.5 respectivamente.

Na fig. 4.29c pode-se verificar que a potência capturada é bem inferior em relação a potência capturada para um valor menor de acoplamento piezoelétrico não-linear. Isso demonstra que o efeito de um forte acoplamento piezoelétrico tende a diminuir a energia capturada.



c)

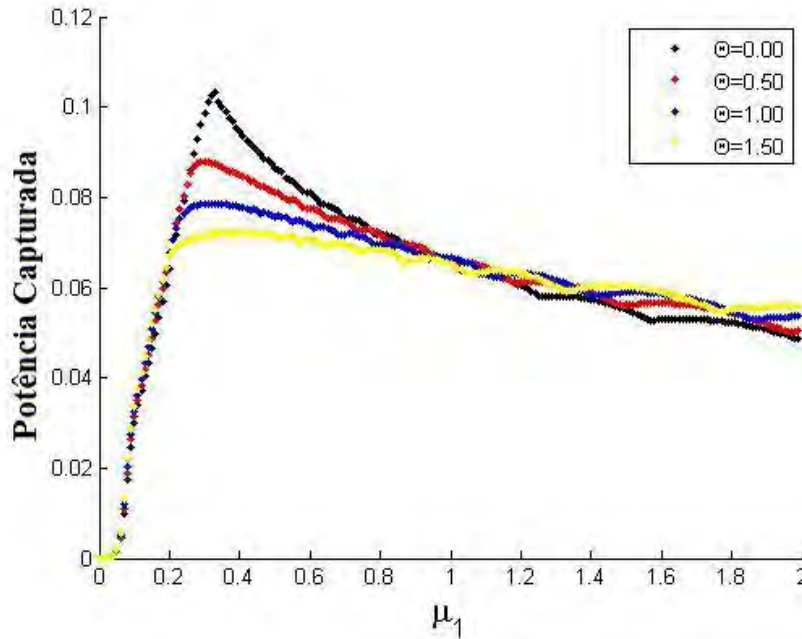


Figura 4.29 - Respostas do Sistema para Incrementos de Θ não-linear = 0 à 1.50, θ linear = 1.50; em a) Deslocamento Máximo da Estrutura; b) Velocidade Angular Média do Motor, c) Potência Máxima Capturada

Com base nos resultados das tabelas 4.4 e 4.5, pode-se inferir que, quando o valor do acoplamento linear $\theta = 1.50$ e efetuando-se o incremento do valor do acoplamento piezoelétrico não-linear $\Theta = 0.50$ à 1.50 a potência máxima capturada não foi atingida no ponto com a maior amplitude de vibração, mas sim em um ponto além da região de ressonância, onde a velocidade angular do motor foi maior do que 1.00 e ainda com a amplitude de vibração sendo bem inferior. Isso se deve ao fato de que a equação elétrica do modelo possui dependência da primeira derivada que está relacionada com a velocidade de deslocamento da carga adimensional.

Tabela 4.4 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 1.50

Θ	μ_1	X1	φ'	Power
0.00	0.33	0.3119	0.9363	0.1033
0.50	0.27	0.2601	0.9309	0.08683
1.00	0.23	0.2275	0.9237	0.07527
1.50	0.21	0.2047	0.9312	0.06825

Tabela 4.5 – Resultados para Θ não-linear = 0 à 1.50, neste caso θ linear = 1.50

Θ	μ_1	X1	φ'	Power
0.00	0.33	0.3119	0.9363	0.1033
0.50	0.30	0.1892	1.208	0.08795
1.00	0.33	0.07886	1.418	0.07859
1.50	0.38	0.06695	1.61	0.07216

CAPÍTULO 5

5. BUSCA POR UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA APROXIMADA PARA O MODELO NÃO-IDEAL

Devido a dificuldade em se determinar de forma exata o comportamento dinâmico de sistemas não-lineares, utiliza-se como uma das alternativas métodos de perturbação para a obtenção de uma solução analítica aproximada. Tais técnicas consistem basicamente em conhecer completamente as soluções de um dado sistema homogêneo e analisar pequenas perturbações próximas a elas (Piccirillo (2007)).

Neste capítulo buscou-se encontrar uma solução analítica aproximada para o sistema de captura de energia não-ideal, utilizando o método da média, procurando por uma solução aproximada que deve ser uniformemente válida para o pequeno parâmetro ε como explicado em detalhes por Nayfeh e Mook (1979). Para se aplicar o método da média no problema não-ideal é necessário considerar que o coeficiente de amortecimento deve aparecer na mesma ordem em que as não-linearidades e a excitação do sistema.

Relembrando que o sistema de equações que descrevem a dinâmica não-linear do sistema é dado por:

$$\begin{aligned}x_1' &= x_2 \\x_2' &= \varepsilon(-\alpha x_2 - b x_1^3 + \theta(1 + \Theta |x_1|)x_5 - \delta_1 x_4' \cos x_3 + \delta_2 x_4'^2 \sin x_3) - x_1 \\x_3' &= x_4 \\x_4' &= \varepsilon(\gamma x_2' \cos x_3 + \Gamma(x_4)) \\x_5' &= (\theta(1 + \Theta |x_1|)x_1 - x_5) / \rho\end{aligned}\tag{5.1}$$

5.1. Busca de uma Solução Analítica Aproximada para o Modelo Não-Ideal na Região Próxima a Ressonância

Assim considera-se o caso da ressonância primária onde a velocidade angular do motor de corrente contínua varia perto da frequência natural do sistema, isto é, $\omega_0 \approx \varphi'$.

Partindo do sistema de equações eq(5.1), tomam-se as equações dependentes do pequeno parâmetro ε , e busca-se uma solução da forma:

$$x = a \cos(\varphi + \beta); \quad (5.2)$$

Introduzindo o parâmetro de sintonia Δ , como a seguir:

$$\varphi' = 1 + \Delta; \quad (5.3)$$

Usando o método da variação dos parâmetros, tem-se que:

$$a' \cos(\varphi + \beta) - a(\Delta + \beta') \sin(\varphi + \beta) = 0 \quad (5.4)$$

Assim como:

$$x' = -a \sin(\varphi + \beta); \quad (5.5)$$

Seguinte:

$$x'' = -a' \sin(\varphi + \beta) - a(1 + \Delta + \beta') \cos(\varphi + \beta) \quad (5.6)$$

Substituindo (5.2), (5.3), (5.5) e (5.6) em (5.1) leva à:

$$\begin{aligned} -a' \sin(\varphi + \beta) - a(\Delta + \beta') \cos(\varphi + \beta) = \\ \varepsilon(\delta_1 \Delta' \cos \varphi - \delta_2 (1 + \Delta)^2 \sin \varphi + \alpha a \sin(\varphi + \beta) - \\ ba^3 \cos^3(\varphi + \beta) + \theta(1 + \Theta |a \cos(\varphi + \beta)|)v) \sin(\varphi + \beta) \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\Delta' = \varepsilon(-\gamma[a' \sin(\varphi + \beta) + a(1 + \Delta + \beta') \cos(\varphi + \beta)] \cos \varphi + \Gamma(1 + \Delta)) \quad (5.8)$$

Resolvendo (5.4) e (5.7) para a' e β' obtem-se:

$$\begin{aligned} a' = -\varepsilon[\delta_1 \Delta' \cos \varphi - \delta_2 (1 + \Delta)^2 \sin \varphi + \alpha a \sin(\varphi + \beta) - \\ ba^3 \cos^3(\varphi + \beta) + \theta(1 + \Theta |a \cos(\varphi + \beta)|)v] \sin(\varphi + \beta) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} \beta' = -\Delta - \varepsilon/a[\delta_1 \Delta' \cos \varphi - \delta_2 (1 + \Delta)^2 \sin \varphi + \alpha a \sin(\varphi + \beta) - \\ ba^3 \cos^3(\varphi + \beta) + \theta(1 + \Theta |a \cos(\varphi + \beta)|)v] \cos(\varphi + \beta) \end{aligned} \quad (5.10)$$

As equações (5.8) à (5.10) são equivalentes ao sistema (5.1).

Agora reescreve-se:

$$\Delta = \varepsilon \sigma; \quad (5.11)$$

E como uma primeira simplificação negligencia-se todos os termos de ordem $O(\varepsilon^2)$, que aparecem de (5.8) à (5.10) e assim obtem-se:

$$a' = \varepsilon[\delta_2 \sin \varphi - \alpha a \sin(\varphi + \beta) + ba^3 \cos^3(\varphi + \beta) - \theta(1 + \Theta|a \cos(\varphi + \beta)|)v] \sin(\varphi + \beta) \quad (5.12)$$

$$\beta' = -\varepsilon[\sigma + \frac{1}{a}(-\delta_2 \sin \varphi + \alpha a \sin(\varphi + \beta) - ba^3 \cos^3(\varphi + \beta) + \theta(1 + \Theta|a \cos(\varphi + \beta)|)v) \cos(\varphi + \beta)] \quad (5.13)$$

$$\Delta' = \varepsilon[\Gamma - \gamma a \cos(\varphi + \beta) \cos \varphi] \quad (5.14)$$

Como uma segunda simplificação, pode-se considerar que a , β e σ são constantes sobre um ciclo e então integrando (média) as equações sobre um ciclo.

O resultado obtido é:

$$a' = \varepsilon\left[\frac{1}{2}\delta_2 \cos \beta - \frac{1}{2}\alpha a\right] \quad (5.15)$$

$$\beta' = -\varepsilon\left[\sigma + \frac{1}{2}\frac{\delta_2 \sin \beta}{a} - \frac{3}{8}a^2 b\right] \quad (5.16)$$

$$\Delta' = \varepsilon\left[\Gamma - \frac{1}{2}\gamma a \cos \beta\right] \quad (5.17)$$

Para respostas em regime estacionário, Δ' , a' e β' são zero. Assim combinando (5.15) e (5.16) através do uso de identidades trigonométricas obtém-se:

$$\begin{aligned}
a = & -\frac{1}{3}(\beta_1(-64\sigma^3 - 144\sigma\alpha^2 + 81\delta_2^2\beta_1 + 3\sqrt{3}(1024\sigma^4\alpha^2 \\
& + 512\sigma^2\alpha^4 + 64\alpha^6 - 384\sigma^3\delta_2^2\beta_1 - 864\sigma\alpha^2\delta_2^2\beta_1 \\
& + 243\delta_2^4\beta_1^2)^{1/2})^{1/3}(16\sigma(-64\sigma^3 - 144\sigma\alpha^2 + 81\delta_2^2\beta_1 \\
& + 3\sqrt{3}(1024\sigma^4\alpha^2 + 512\sigma^2\alpha^4 + 64\alpha^6 - 384\sigma^3\delta_2^2\beta_1 \\
& - 864\sigma\alpha^2\delta_2^2\beta_1 + 243\delta_2^4\beta_1^2)^{1/2})^{1/3} - (-64\sigma^3 - 144\sigma\alpha^2 \\
& + 81\delta_2^2\beta_1 + 3\sqrt{3}(1024\sigma^4\alpha^2 + 512\sigma^2\alpha^4 + 64\alpha^6 \\
& - 384\sigma^3\delta_2^2\beta_1 - 864\sigma\alpha^2\delta_2^2\beta_1 + 243\delta_2^4\beta_1^2)^{1/2})^{1/3} - 16\sigma^2 + 12\alpha^2 \\
& + I\sqrt{3}(-64\sigma^3 - 144\sigma\alpha^2 + 81\delta_2^2\beta_1 + 3\sqrt{3}(1024\sigma^4\alpha^2 \\
& + 512\sigma^2\alpha^4 + 64\alpha^6 - 384\sigma^3\delta_2^2\beta_1 - 864\sigma\alpha^2\delta_2^2\beta_1 \\
& + 243\delta_2^4\beta_1^2)^{1/2})^{2/3} - 16I\sqrt{3}\sigma^2 + 12I\sqrt{3}\alpha^2))^{1/2} / (\beta_1(-64\sigma^3 \\
& - 144\sigma\alpha^2 + 81\delta_2^2\beta_1 + 3\sqrt{3}(1024\sigma^4\alpha^2 + 512\sigma^2\alpha^4 + 64\alpha^6 \\
& - 384\sigma^3\delta_2^2\beta_1 - 864\sigma\alpha^2\delta_2^2\beta_1 + 243\delta_2^4\beta_1^2)^{1/2})^{1/3})
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Assim combinando (5.15) e (5.17) leva à:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \frac{\alpha a^2 \gamma}{\delta_2} \tag{5.19}$$

O ângulo de fase é dado por:

$$b = \arccos\left(\frac{\alpha a}{\delta_2}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{4} \frac{a(-8\sigma + 3a^2\beta_1)}{\delta_2}\right) \tag{5.20}$$

Resolvendo o sistema numericamente encontra-se o valor da raiz para a , e o valor de b .

Lembrando que a solução procurada tem a forma de (5.2).

Assim tem-se a solução do sistema obtida através do método da média.

$$\begin{aligned}X_1 &= -0.2007560184 \cdot \cos(t+1.565777358); \\X_2 &= 0.2007560184 \cdot \sin(t+1.565777358);\end{aligned}\tag{5.21}$$

Na sequência são demonstrados através das seguintes figuras a representação da solução analítica encontrada pela aplicação do método da média no sistema não-ideal proposto.

O retrato de fase periódico é apresentado na fig. 5.1.

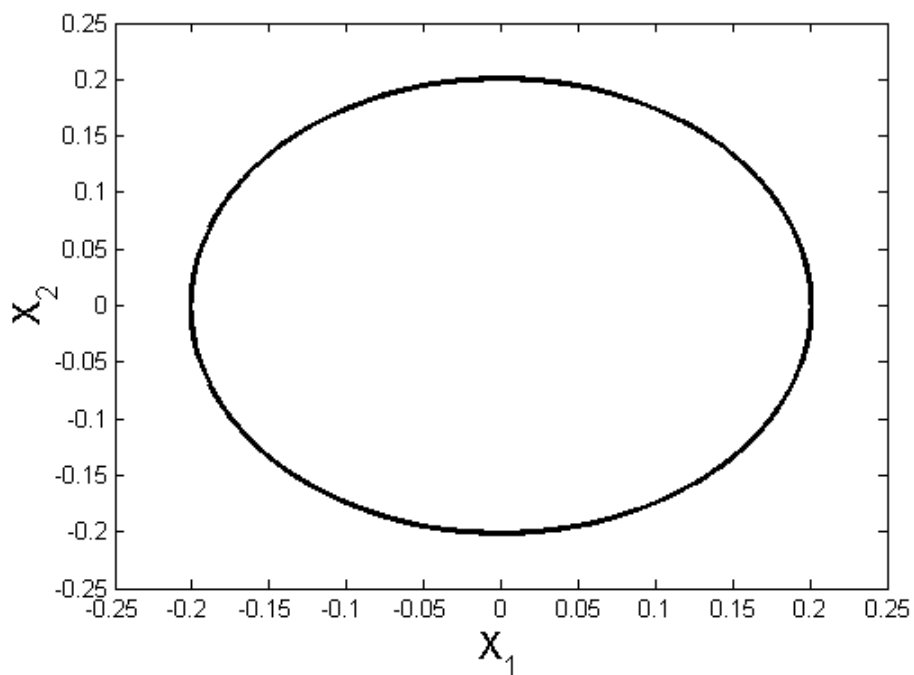


Figura 5.1 – Retrato de Fase obtido através da aplicação do método da média

O histórico no tempo para o deslocamento do sistema é demonstrado a seguir na fig. 5.2.

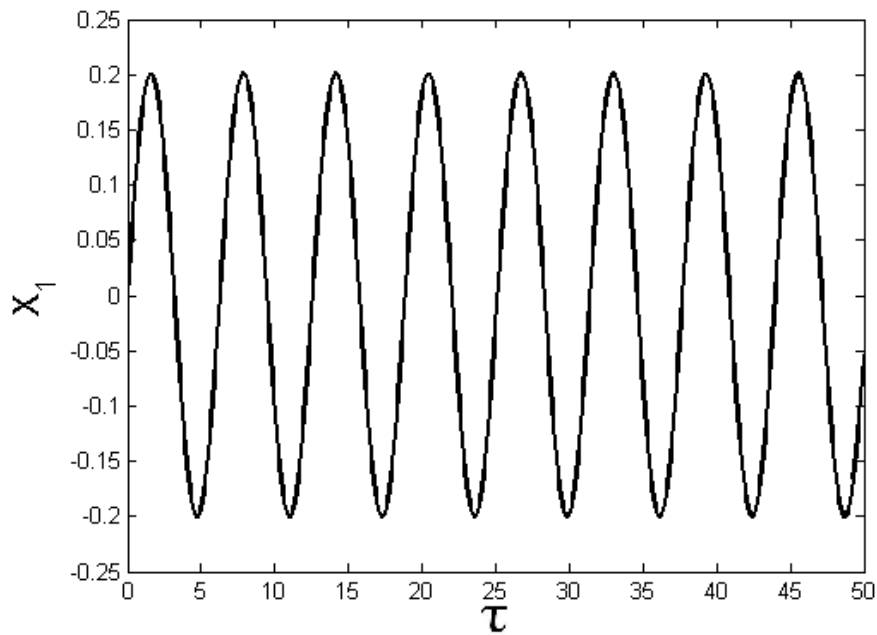


Figura 5.2 - Deslocamento Periódico obtido através da aplicação do método da média

5.2. Solução Analítica Sobre a Dinâmica do Sistema

Com base na seção anterior utilizou-se a órbita periódica que se encontra na amplitude desejada para se estabilizar o sistema não-ideal quando este apresenta o comportamento caótico.

Assim demonstra-se na sequência através dos gráficos nas fig. 5.3, fig.5.4, fig. 5.5 e fig. 5.6, a dinâmica caótica do sistema tanto para o motor com relação linear torque-velocidade como para o motor com relação exponencial torque-velocidade em preto, sendo sobreposta pela solução analítica encontrada em vermelho. Pode-se notar que a solução encontrada está contida no espaço solução do sistema dinâmico o que válida a aplicação do método da média.

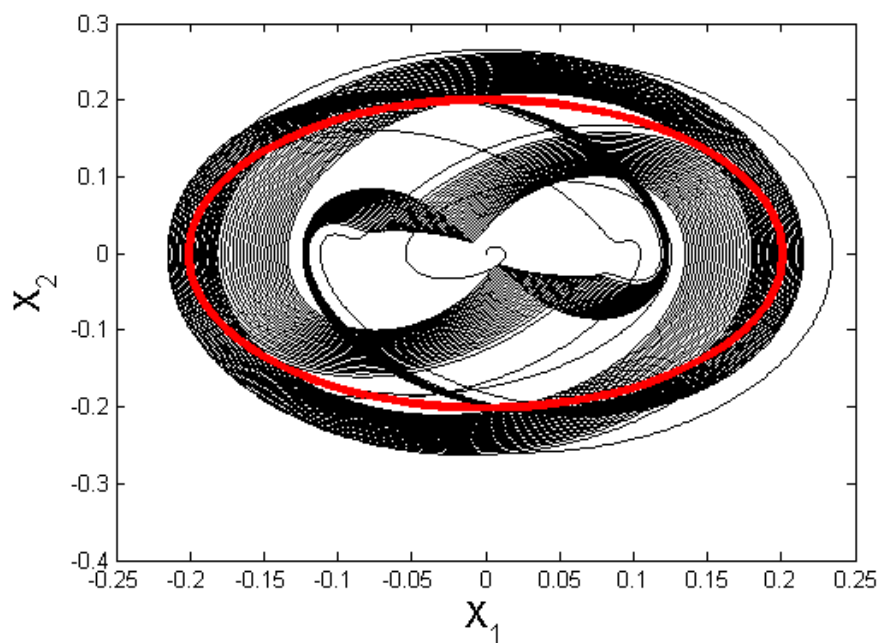


Figura 5.3 - Motor com relação linear torque-velocidade: em preto retrato de fase da dinâmica do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média

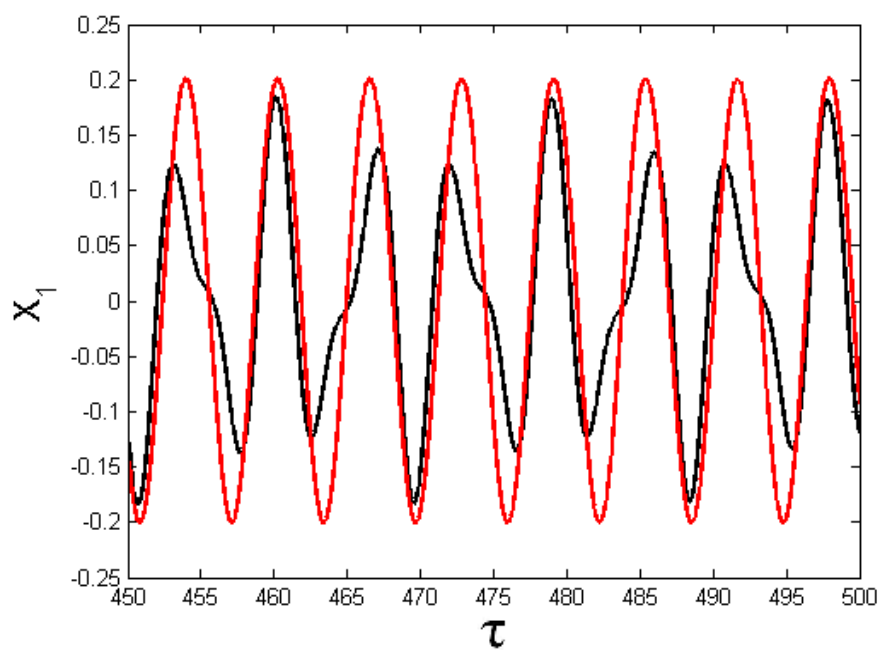


Figura 5.4 - Motor com relação linear torque-velocidade: em preto histórico no tempo do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média

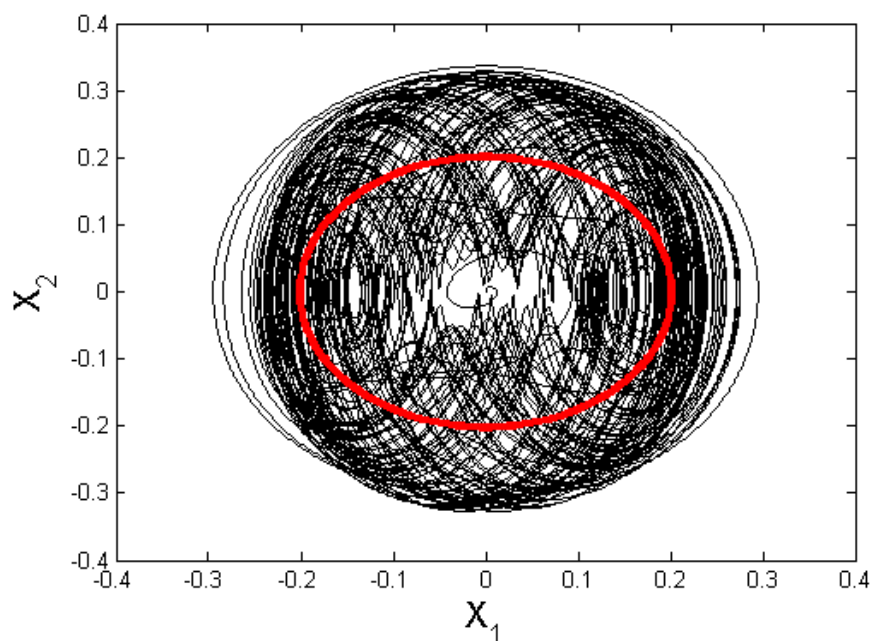


Figura 5.5 - Motor com relação exponencial torque-velocidade: em preto retrato de fase da dinâmica do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média

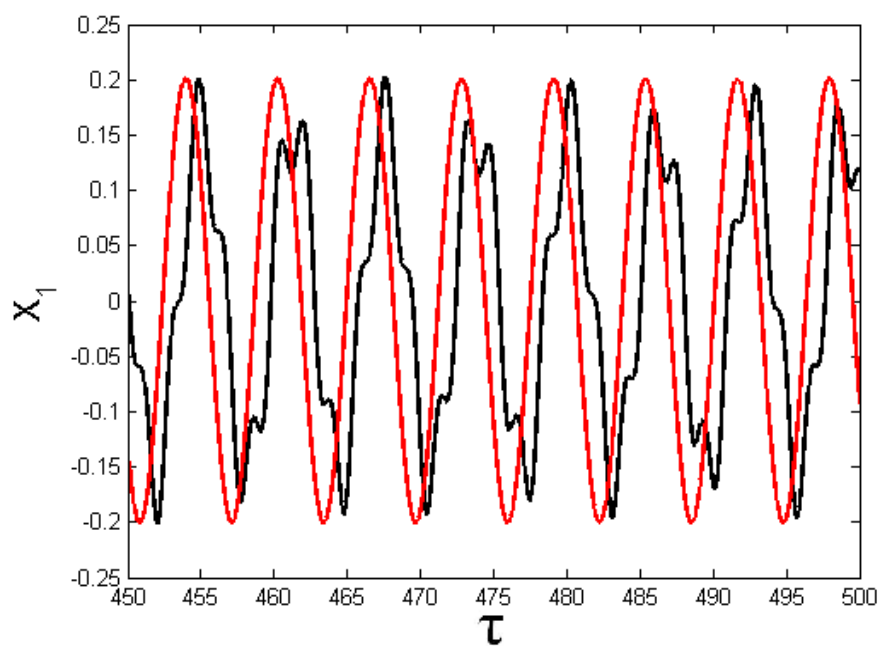


Figura 5.6 - Motor com relação exponencial torque-velocidade: em preto histórico no tempo do sistema caótico; em vermelho solução analítica obtida pelo método da média

CAPÍTULO 6

6. MÉTODOS DE CONTROLE APLICADOS A SISTEMAS NÃO-IDEAIS E CAÓTICOS

O comportamento caótico de sistemas dinâmicos tem atraído a tempos a atenção de diferentes campos da ciência, sendo encontrado em modelos físicos, químicos, biológicos, etc. O controle de sistemas caóticos, através de diversas técnicas tem sido investigado de forma significativa nos últimos anos, gerando grande quantidade de produção técnica e científica, tanto em áreas da elétrica, mecânica entre outras.

Baseado na publicação do artigo dos autores E. Ott, C. Grebogi e J. Yorke, (1990), no qual o termo controle de caos foi criado, iniciou-se uma série de estudos buscando controlar sistemas caóticos. Ainda no mesmo artigo, os autores demonstraram que com pequenos ajustes nos parâmetros uma mudança significativa no comportamento do sistema caótico pode ser realizada. Devido ao fato de um atrator caótico possuir infinitas órbitas periódicas, instáveis ou estáveis, utiliza-se uma dessas órbitas que seja conhecida para aplicar uma técnica de controle que envie o movimento caótico para a mesma. Tal demonstração abriu possibilidades para a mudança do comportamento do sistema sem alterar suas propriedades inerentes (Fradkov e Evans (2005)).

Nos dias atuais é possível encontrar várias estratégias de controle as quais vêm sendo desenvolvidas e utilizadas na busca de soluções para problemas nas áreas de engenharia, ciências e em sistemas de grande complexidade.

Os sistemas dinâmicos podem ser classificados de acordo com o tipo de excitação a qual estão sujeitos. Podendo ser classificados como sistemas ideais e sistemas não-ideais. Quando a excitação não é influenciada pela resposta, o sistema possui uma excitação ideal ou ainda uma fonte ideal de energia. Por outro lado, quando a excitação é influenciada pela resposta do sistema, esta é chamada de não-ideal ou uma fonte não-ideal de energia e com potência limitada segundo (Nayfeh e Mook (1979)).

Em um sistema ideal, a representação da excitação em modelos matemáticos pode ser da forma $A\cos(\omega t)$, por exemplo, onde A é a amplitude do sistema e ω a sua frequência.

Nos sistemas não-ideais, a modelagem matemática, requer que essa excitação seja tratada como mais uma equação acoplada ao sistema, interagindo com os movimentos ao longo do tempo. Relacionam-se alguns trabalhos de controle para problemas não-ideais, como os publicados por Yamanaka e Murakami (1989) que utilizaram a técnica dos gradientes conjugados em um problema de rotores; Diemetenberg et. al. (1997) que utilizou métodos heurísticos no controle da amplitude de vibração quando há a passagem pela ressonância em um problema de um grau de liberdade, Balthazar et. al. (2001) utilizou a técnica de Tikhonov na obtenção de tempo mínimo de passagem pela ressonância em um problema vibratório não-ideal de dois graus de liberdade; Palácios (2002) apresentou resultados numéricos da técnica de controle por saturação aplicado em um problema do pórtico plano excitado por um motor não-ideal; Pontes Jr (2003) desenvolveu um procedimento de controle utilizando um controle chaveado inspirado na técnica de controle de estrutura variável em sistemas com atrito adere-desliza, e Peruzzi et. al. (2007) utilizou a teoria de Floquet na solução de um problema não-ideal baseado em técnicas de controle desenvolvidos por Sinha et. al. (2000); em Piccirillo (2008), um sistema vibratório modelado com memória de forma e excitado por fontes

de energia do tipo ideal e não-ideal é controlado usando o método de Controle Linear Ótimo de Rafikov *et al* (2008), em Fenili e Balthazar (2010) um braço rígido-flexível é modelado e o controle é feito usando o método das Equações Dependentes de Estado de Ricatti (SDRE), e por fim Rodrigues (2011), estudou um projeto de controle para uma micro-viga em balanço de um AFM (Atomic Force Microscopy), operando em tapping-mode, com um comportamento irregular, foram aplicados o método das Equações Dependentes de Estado de Ricatti (SDRE) e o método de Time Delayed.

No presente trabalho três técnicas de controle foram utilizados para estabilizar o sistema representado pela eq.(3.12). Inicialmente o método SDRE foi usado para levar o movimento caótico até a órbita representada pela solução eq.(5.21), obtida através da aplicação do Método da Média. Na sequência aplicou-se o método de controle LQR utilizando também a órbita periódica obtida pelo Método da Média, e finalmente o método de controle proposto por Tereshko (2011) que altera o valor da energia média de oscilação que é um composto (ao longo do tempo) em média da energia cinética e potencial do sistema. O objetivo é alterar essa energia de modo a corresponder ao comportamento desejado, a vantagem deste método é que o mesmo não necessita que seja encontrada uma órbita periódica previamente.

6.1. Método de Controle (SDRE)

Nos anos 90, a equação de Riccati dependente do estado (SDRE) passou a ser utilizada com mais ênfase como um método de aplicação geral, o qual fornece um meio eficaz para o projeto de controladores não-lineares. Com algoritmos computacionais simples e altamente eficazes este método supera muitas das dificuldades e limitações das metodologias existentes tendo uma grande aplicabilidade em diversas áreas de estudo,

como: mísseis, aeronaves, navios, sistemas automotivos, controle de processos, robótica, vibrações e comportamento caótico, etc (Bassinello (2011)).

As matrizes de estado nos sistemas não-lineares são dependentes das variáveis do problema. Um controle ótimo de um modelo dinâmico exige uma formulação que visa minimizar um funcional de custo e cumprir com as restrições sobre o modelo, que podem ser equações de equilíbrio dinâmico, as condições de contorno e/ou outros (Pergher *et al* (2010)).

Considera-se o sistema não-linear, na forma:

$$\dot{x} = A(x)x + g(x)u \quad (6.1)$$

E o funcional custo:

$$J = \int_0^{\infty} (e^T Q(e)e + u_r^T R(u)u_r) dt \quad (6.2)$$

que permite relacionar o erro x e o controle de entrada u , através das matrizes de ponderação $Q(x) \geq 0$, $R(x) > 0 \quad \forall x$, respectivamente, com $x \in R^n$, $u \in R^m$, $f(x) \in C^k$, $g(x) \in C^k$, $Q(x) \in C^k$ e $R(x) \in C^k$, com $k \geq 0$. Assumindo que $f(0) = 0$ e $g(x) \neq 0 \quad \forall x$, é necessário encontrar uma lei para o controle de realimentação $u(x)$, que levará o sistema para a origem $\forall x$ (Rodrigues (2011)).

Utilizando o método SDRE trabalha-se com o problema da mesma maneira que o método LQR para sistemas lineares, assim, escreve-se as equações do problema como:

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u \quad (6.3)$$

Onde $f(x) = A(x)x$ é a matriz de estados do sistema e $g(x) = B(x)$. Tem-se como restrição que $f(0) = 0$ e $f(x)$ seja diferenciável contínua (Banks e Manha, (1992) e Cloutier (1996)). Assim, pode-se proceder igual ao caso de um sistema linear invariante, onde a lei de controle linear por realimentação de estados u é dada por:

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)P(x) = -K(x)u \quad (6.4)$$

Onde a matriz simétrica $P(x)$ é calculada através da equação algébrica não-linear de Riccati:

$$P(x)A(x) + A^T(x)P(x) - P(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)P(x) + Q(x) = 0 \quad (6.5)$$

Como grande vantagem o método de controle SDRE mantém as características físicas do modelo estudado, já que por meio das matrizes $Q(x)$ e $R(x)$ o desenvolvedor do controle tem a possibilidade de um melhor ajuste do desempenho do método. Pode-se dizer que a flexibilidade do sistema de controle LQR é diretamente traduzido para o controle de sistemas não-lineares. Desta forma, pode-se impor diferentes modos de comportamento em diferentes regiões do espaço de estados uma vez que, as matrizes $Q(x)$ e $R(x)$ podem variar em função da matriz de estados.

6.2. Método de Controle LQR

A técnica do controle por realimentação em sua ideia original foi desenvolvida para aplicação em sistemas lineares, tendo sido empregada com sucesso em vários trabalhos,

inclusive, em sistemas que apresentam dinâmica não-linear como exemplo pode-se citar os trabalhos de Grzybowski et al. (2009), Piccirillo et al. (2009a e 2009b), Tusset et al. (2009), Tusset e Balthazar (2011), Iliuk (2012) sem desmerecer outros.

Segundo Tusset (2008) o controle por realimentação é um mecanismo matemático que regula e estabiliza o comportamento de sistemas dinâmicos. Assim o sinal de controle é uma função da diferença entre valores atuais das variáveis de estado do sistema e os valores desejados. Onde a saída do sistema é utilizada pelo controle para realimentá-lo através do sinal de controle. O controle ótimo segue uma metodologia que busca controlar o processo da forma desejada ao mesmo tempo em que minimiza um índice de desempenho. Segundo Rafikov e Balthazar, (2006), é devida a sua simplicidade de configuração e implementação que a técnica do controle por realimentação é aplicada em sistemas não-lineares. Conforme Ogata(2000), o controle é baseado na teoria da estabilidade de Lyapunov e no controle linear quadrático ótimo (LQR). Uma condição suficiente para utilização do controle por realimentação em sistemas não-lineares foi proposta por Rafikov e Balthazar,(2006).

Considera-se o sistema (6.6) como não-linear e controlável (Rafikov e Balthazar, 2008):

$$\dot{x} = Ax + g(x) + u \quad (6.6)$$

Sendo que $x \in R^n$ é um vetor de estados, $A \in R^{n \times n}$ é a matriz de estados formada pelos termos lineares do sistema, $u \in R^m$ é o vetor de controle, e $g(x)$ é um vetor de funções contínuas não-lineares. O objetivo é achar uma lei de controle que conduz o sistema sob

ação de perturbações externas até um desejado estado. Sendo que este estado pode ser: um ponto de equilíbrio, uma órbita periódica ou uma órbita não-periódica.

O vetor de controle u consiste em duas partes:

$$u = u_f + u_r \quad (6.7)$$

com: u_f sendo o controle de feedforward dado por:

$$u_f = \dot{x}^* - Ax^* - g(x^*) \quad (6.8)$$

x^* é o estado desejado.

u_r é o controle por realimentação de estados (*feedback*), obtido da seguinte maneira:

$$u_r = Bu \quad (6.9)$$

Onde $B \in R^{n \times m}$ é uma matriz constante.

Definindo o erro do seguimento dos estados como:

$$y = x - x^* \quad (6.10)$$

Como o desvio da trajetória do sistema (6.6) do estado desejado, e substituindo (6.7), (6.10) e (6.8) em (6.6) pode-se obter a seguinte equação:

$$\dot{y} = Ay + g(x) - g(x^*) + Bu \quad (6.11)$$

A parte não-linear do sistema (6.11) pode ser escrita da seguinte forma:

$$g(x) - g(x^*) = G(y, x^*)(x - x^*) \quad (6.12)$$

Sendo $G(y, x^*)$ uma matriz limitada, cujos elementos dependem de y e de x^* .

Considerando (6.12), o sistema (6.11) adquire a seguinte forma:

$$\dot{y} = Ay + G(y, x^*) + Bu \quad (6.13)$$

Teorema. Se existirem as matrizes Q e R , escolhidas de forma a serem definidas positivas, com Q simétrica, tais que a matriz [Rafikov e Balthazar, 2008]:

$$\tilde{Q} = Q - G^T(y, x^*)P - PG(y, x^*) \quad (6.14)$$

Seja definida positiva, onde a matriz P é a solução da seguinte equação diferencial matricial de Riccati:

$$\dot{P} + PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (6.15)$$

Com a condição final:

$$P(t_f) = 0 \quad (6.16)$$

Para o caso de $t \rightarrow \infty$ e as matrizes A, B, Q e R serem matrizes com elementos constantes, a matriz definida positiva P é a solução da equação reduzida de Riccati:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (6.17)$$

Então o controle por realimentação de estados :

$$u = -R^{-1}B^T P y \quad (6.18)$$

é ótimo e transfere o sistema não-linear (6.11) de qualquer estado inicial para o estado final:

$$y(t_f) = 0 \quad (6.19)$$

Minimizando o funcional:

$$\tilde{J} = \int_0^{t_f} (y^T \tilde{Q} y + u^T R u) dt \quad (6.20)$$

Para o controle (6.18) existe uma região $\Gamma_0 \subset \Gamma, \Gamma \subset R^n$, do ponto de origem tal que se

$y_0 \in \Gamma_0$ a solução $y(t) = 0, t \geq 0$ do sistema controlado (6.13) tem estabilidade

assintoticamente local, e: $J_{min} = y_0^T P(0) y_0$.

Concluído que, se $\Gamma = \mathbb{R}^n$ então a solução $y(t) = 0, t \geq 0$, do sistema controlado (6.13)

é globalmente assintoticamente estável.

6.3. Método de Controle de Retroalimentação que Altera a Energia de Oscilação Proposto por Tereshko

Nesta seção descreve-se o método de controle proposto por Tereshko (2011), o qual é aplicada a osciladores não-lineares quando a retroalimentação simples altera a energia de oscilação. O controle não requer nenhum conhecimento de computação, nem das equações do sistema. Dependendo dos parâmetros de perturbação de controle, dois cenários podem ocorrer: (i) mudança (linearmente ou não-linear) no amortecimento do oscilador, e (ii) supressão (melhorar) da força motriz. No caso de grandes desvios entre as fases do oscilador caótico e a força motriz, apenas primeiro cenário ocorre.

Define-se que, a qualquer tipo de comportamento do sistema, coloca-se em correspondência ao valor da energia média de oscilação que é um composto (ao longo do tempo) em média da energia cinética e potencial do sistema. O objetivo é alterar essa energia de modo a corresponder ao comportamento desejado. Esta é uma estratégia do tipo geral que não depende do sistema de equações. Para realizá-la, utiliza-se um *feedback* simples dependendo unicamente do sinal de saída e não exigindo qualquer cálculo extra.

As perturbações de controle, que não destróem a estrutura do sistema intrínseco, são mostradas para alterar a energia de oscilação, de modo a estabilizar os repulsores do sistema.

Considerando o controle de um tipo geral de oscilador não-linear:

$$\ddot{x} + \chi(x, \dot{x}) + \xi(x) = F(t) + g(x, \dot{x}) \quad (6.21)$$

onde $\chi(x, \dot{x})$, $\xi(x)$ e $g(x, \dot{x})$ são funções dissipativas ou componente geradora de energia, força de restauração, e a força de controle, respectivamente. Estas funções são não-lineares, no caso geral também, $\chi(x, \dot{x})$ e $g(x, \dot{x})$ assume-se não conter uma função aditiva de x .

$F(t)$ é uma força motriz externa dependente do tempo.

Com $F(t) = 0$ e $g(x, \dot{x}) = 0$, a equação (6.21) possui um equilíbrio definido pela equação $\xi(x) = 0$. Em osciladores não-lineares com amortecimento (digamos, van der Pol e osciladores Reyleigh), um equilíbrio torna-se instável para alguns valores de parâmetros, e estável quando oscilações auto-sustentados são excitadas. Em outros tipos de osciladores, digamos oscilador de Duffing, um ciclo limite decorre da ação da força motriz periódica. Assumem-se que em algumas amplitudes de oscilação, um ciclo limite torna-se sela, e um novo atrator, digamos de período-2 surge. Em muitos exemplos bem conhecidos, este cenário leva, através da sequência de bifurcações, para o nascimento de um atrator caótico. Pode-se definir uma energia de oscilações como a soma de energia "potencial" e energia "cinética":

$$E(t) = \int \xi(x) dx + \frac{1}{2} \dot{x}^2 \quad (6.22)$$

Uma média (sobre o período T) produz a energia:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int \xi(x) dx + \frac{1}{2} \dot{x}^2 \right) dt \quad (6.23)$$

Para a dinâmica periódica T é um período de oscilação, enquanto que para atrator caótico $T \rightarrow \infty$. Cada atrator de um oscilador é atribuído a um valor de energia média (6.23). Se uma amplitude de oscilação é suficientemente pequena, as oscilações do ciclo limite podem ser aproximadas como $x \simeq \psi \sin(\omega t)$, o que dá $\langle E \rangle = 1/2 \psi^2$. Tipicamente, as transições para um atrator caótico correspondem ao aumento de energia (6.23). Para esclarecer esta declaração sobre o exemplo de um processo de duplicação do período. Supondo que a mudança de alguns dos parâmetros do sistema resulta em uma duplicação período de oscilação e, eventualmente, em um caos. A partir de período-1 ciclo, a sua amplitude cresce com o aumento do parâmetro acima, e portanto a energia (6.23) também. Cada bifurcação de duplicação do período contribui com uma sub-harmônica (bem como a sua harmônica ímpar) para a frequência fundamental, o que aumenta a energia (6.23). Assim, quanto maior o período desta órbita, maior a energia média correspondente a esta órbita.

Um ponto estacionário, em torno do qual se desenvolve um ciclo limite, pode ser visto como um ciclo de amplitude zero possuindo portanto zero de energia.

Assim a estratégia de controle a seguir pode ser proposta. A partir de um atrator de energia mais baixo, estabilizam-se os repulsores de energia mais altos por um aumento sequencial da energia de oscilação média. Ao contrário, diminuindo essa energia leva à estabilização de repulsores de energia mais baixos.

A mudança de energia (6.22) leva à:

$$\dot{E}(t) = \xi(x) \dot{x} + \ddot{x} \dot{x} = (-\chi(x, \dot{x}) + F(t) + g(x, \dot{x})) \dot{x} \quad (6.24)$$

O último termo de (6.24) representa uma mudança de energia causada unicamente pelo controle.

Exige-se que:

$$g(x, \dot{x})\dot{x} > 0 (< 0) \quad (6.25)$$

Para $\forall(x, \dot{x})$. Um mínimo *feedback* satisfazendo (6.25) é alcançado com $g = g(\dot{x})$. De fato, o simples controle linear (em relação à velocidade) $g(\dot{x}) \sim \dot{x}$, bem como um controle não-linear de maior potência, digamos $g(\dot{x}) \sim \dot{x}^3$ são suficientes.

Em geral:

$$g(\dot{x}) = kh(\dot{x}) \quad (6.26)$$

onde $h(\dot{x})$ é assumida ser ímpar ou seja, $h(\dot{x}) = -h(-\dot{x})$.

Pode-se, assim definir:

$$h(\dot{x}) \begin{cases} > 0, & \text{if } \dot{x} > 0 \\ = 0, & \text{if } \dot{x} = 0 \\ < 0, & \text{if } \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (6.27)$$

Para garantir um controle para uma perturbação muito pequena mesmo em altos valores de $\dot{x}$, $h(\dot{x})$ é tomada para ser delimitada.

Assim, considera-se $g(\dot{x}) = k \tanh(\beta \dot{x})$ com $0 < \beta \leq \infty$ determinando a inclinação da função.

A perturbação (6.26-6.27) foi especialmente sintonizada para controle dos pontos de equilíbrio: suas posições não são alteradas pelo controle que desaparece com $\dot{x} = 0$. $\dot{E} = 0$ quando em equilíbrio, respectivamente. No controle acima não desaparecem os atratores dinâmicos. O objetivo no entanto, não é controlar órbitas periódicas instáveis (UPOS) do sistema não perturbado existentes para determinados valores de parâmetros, mas sim a mudança de um sistema para uma região de comportamentos desejados. A energia (6.23) é alterada de forma a coincidir com a energia de um estado desejado. Para pequenas oscilações, pode-se encontrar a amplitude ψ substituindo $x \simeq \psi \sin(\omega t)$ em uma mudança de energia média (sobre o período T) e resolvendo a equação:

$$\langle \dot{E} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{E}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (-\chi(x, \dot{x}) + F(t) + g(x, \dot{x})) \dot{x} dt = 0 \quad (6.28)$$

Equação (6.28) descreve o balanço de dissipação e de fornecimento de energia trazida por amortecimento, excitação, e as forças de controle. Para uma órbita geral definida pela série infinita de modos periódicos, um modo fundamental, bem como seus harmônicos deve, em princípio, ser contado.

Assim a estratégia de alteração da força de *feedback* para ajustar a energia de oscilação para diferentes níveis, não requer nenhum cálculo do sinal de controle e, portanto, é aplicável para controle, bem como identificação de sistemas desconhecidos.

6.4. Aplicação dos Métodos de Controle

Primeiramente foi aplicado o método SDRE para levar o sistema com comportamento caótico até a órbita periódica encontrada através do método da média no capítulo anterior, também utilizou-se o método LQR que estabiliza o sistema usando a solução

analítica encontrada através do método da média, em sequência aplicou-se o método de retroalimentação (*feedback*) que altera a energia de oscilação proposto por Tereshko para estabilizar o sistema em uma órbita periódica estável.

6.4.1. Aplicação do Método SDRE ao Sistema Não-Ideal

Nesta seção o objetivo foi encontrar um controle tal que a resposta do sistema controlado, resultasse em uma órbita periodica assintoticamente estável, usando um controle retroalimentado utilizando o controle SDRE.

Introduzindo o controle temos o sistema da seguinte forma:

$$\dot{x} = A(x)x + F + Bu \quad (6.29)$$

Onde: u é o controle retroalimentado obtido a através de: $u = -R^{-1} B^T e = -K(x - x^*)$, onde x representa os estados, e x^* é o estado desejado. $K = lqr(A(x), B, Q, R)$ é obtido através do comando *lqr* do Matlab[®]. Assim o objetivo é o de controlar os estados x_1 e x_2 implementando o controle no sistema.

6.4.1.1. Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente

Contínua com Relação Linear Torque-Velocidade

O objetivo é o de controlar os estados x_1 e x_2 sendo implementado no sistema controlado:

$$\begin{aligned}
x'_1 &= x_2 \\
x'_2 &= \frac{1}{\Delta} [-\varepsilon \alpha x_2 - x_1 - \varepsilon b x_1^3 + \varepsilon (\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5) \\
&\quad - \varepsilon (\delta_2 x_4^2 \sin x_3) + \varepsilon^2 (\delta_1 \cos x_3) (\mu_1 - \mu_2 x_4)]
\end{aligned} \tag{6.30}$$

$$\begin{aligned}
x'_3 &= x_4 \\
x'_4 &= \frac{1}{\Delta} [\varepsilon (\mu_1 - \mu_2 x_4) + \varepsilon \gamma \cos x_3 \\
&\quad (-\varepsilon \alpha x_2 - x_1 - \varepsilon b x_1^3 + \varepsilon (\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5) - \varepsilon \delta_2 x_4^2 \sin x_3)] \\
x'_5 &= ((\theta x_1 + \theta \Theta |x_1| x_1) - x_5) / \rho
\end{aligned} \tag{6.31}$$

Onde: $\Delta = 1 - \varepsilon^2 \delta_1 \gamma \cos^2 x_3$

Os demais estados são considerados como perturbações do sistema. Assim escrevendo o sistema (6.30), na forma (6.29), tem-se:

$$\begin{aligned}
x' &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-\varepsilon b x_1^2}{\Delta} & \frac{-\varepsilon \alpha}{\Delta} \end{bmatrix} x + \\
&\quad \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\varepsilon}{\Delta} [(\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5) - (\delta_2 x_4^2 \sin x_3) + \varepsilon (\delta_1 \cos x_3) (\mu_1 - \mu_2 x_4)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u
\end{aligned} \tag{6.32}$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-\varepsilon b x_1^2}{\Delta} & \frac{-\varepsilon \alpha}{\Delta} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e$$

$$F = \left\lfloor \frac{\varepsilon}{\Delta} \left[\left(\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5 \right) - \left(\delta_2 x_4^2 \sin x_3 \right) + \varepsilon \left(\delta_1 \cos x_3 \right) \left(\mu_1 - \mu_2 x_4 \right) \right] \right\rfloor \quad (6.33)$$

Definindo-se as matrizes $Q = 10^5 I_{2 \times 2}$ e $R = 10^{-3} I_{1 \times 1}$, obtem-se o controle: $u = -Ke$.

Desde que, x_3 , x_4 e x_5 são obtidos através de (6.31).

Na sequencia de figuras a seguir pode-se notar o sistema controlado, através do controle u para o desejado estado (6.29). Aqui pode-se observar a eficiência do controle aplicado ao sistema levando o mesmo que se encontrava em comportamento caótico para a órbita desejada (5.21), considerando-se a aplicação do controle (6.29) no sistema (5.1).

Na fig. 6.1 está o retrato de fase do sistema sem controle em preto e com controle em vermelho.

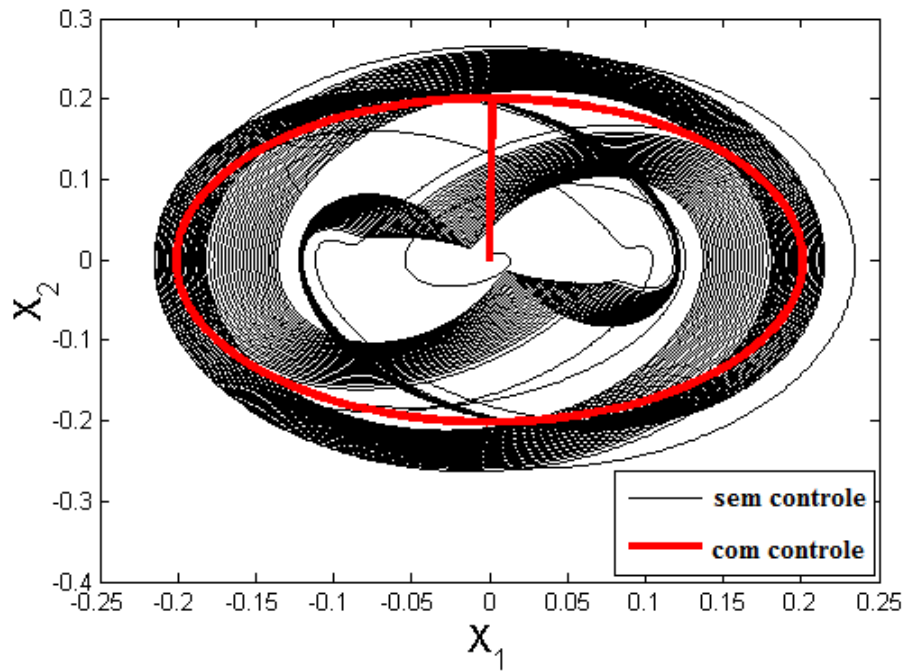


Figura 6.1 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle

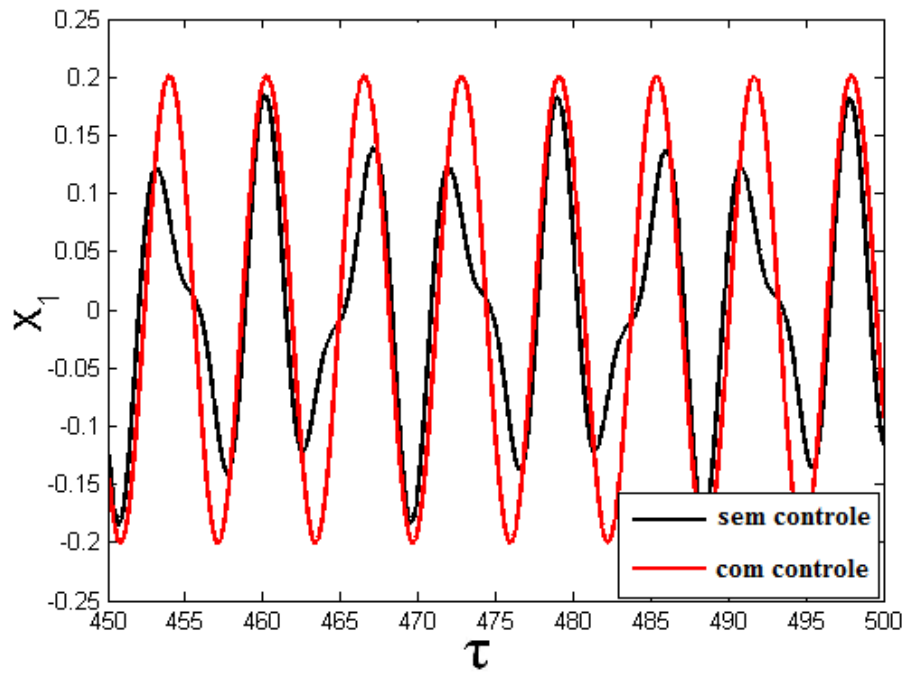


Figura 6.2 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.2 tem-se o histórico no tempo para o deslocamento do sistema sem controle em preto e em vermelho com a aplicação do controle.

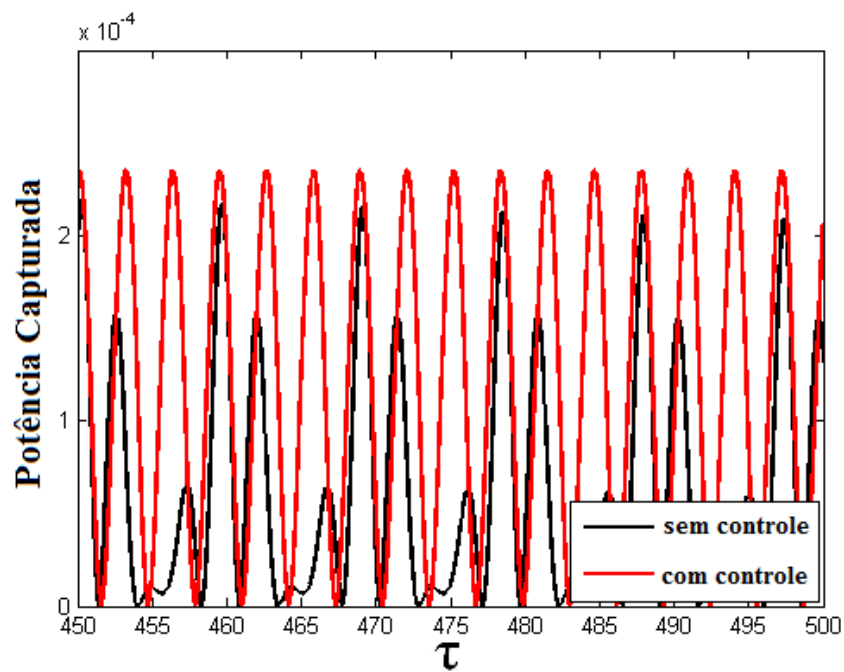


Figura 6.3 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.3 pode-se observar a potência adimensional máxima capturada para o sistema não-ideal, sem controle em preto e em vermelho com a aplicação do controle.

6.4.1.2. Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente

Contínua com Relação Exponencial Torque-Velocidade

O objetivo é o de controlar os estados x_1 e x_2 sendo implementado no sistema controlado:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= \frac{1}{\Delta} [-\varepsilon \alpha x_2 - x_1 - \varepsilon b x_1^3 + \varepsilon (\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5) \\ &\quad - \varepsilon (\delta_2 x_4^2 \sin x_3) + \varepsilon^2 (\delta_1 \cos x_3) (\mu_1 e^{-\mu_2 x_4})] \end{aligned} \quad (6.34)$$

$$\begin{aligned} x_3' &= x_4 \\ x_4' &= \frac{1}{\Delta} [\varepsilon (\mu_1 e^{-\mu_2 x_4}) + \varepsilon \gamma \cos x_3 \\ &\quad (-\varepsilon \alpha x_2 - x_1 - \varepsilon b x_1^3 + \varepsilon (\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5) - \varepsilon \delta_2 x_4^2 \sin x_3)] \\ x_5' &= ((\theta x_1 + \theta \Theta |x_1| x_1) - x_5) / \rho \end{aligned} \quad (6.35)$$

Onde: $\Delta = 1 - \varepsilon^2 \delta_1 \gamma \cos^2 x_3$

Os demais estados são considerados como perturbações do sistemas. Assim escrevendo o sistema (6.34), na forma (6.29), tem-se:

$$x' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-\varepsilon b x_1^2}{\Delta} & \frac{-\varepsilon \alpha}{\Delta} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\varepsilon}{\Delta} \left[\left(\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5 \right) - \left(\delta_2 x_4^2 \sin x_3 \right) + \varepsilon \left(\delta_1 \cos x_3 \right) \left(\mu_1 e^{-\mu_2 x_4} \right) \right] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (6.36)$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-\varepsilon b x_1^2}{\Delta} & \frac{-\varepsilon \alpha}{\Delta} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e$$

$$F = \left[\frac{\varepsilon}{\Delta} \left[\left(\theta x_5 + \theta \Theta |x_1| x_5 \right) - \left(\delta_2 x_4^2 \sin x_3 \right) + \varepsilon \left(\delta_1 \cos x_3 \right) \left(\mu_1 e^{-\mu_2 x_4} \right) \right] \right] \quad (6.37)$$

Definindo-se as matrizes $Q = 10^5 I_{2 \times 2}$ e $R = 10^{-3} I_{1 \times 1}$, obtem-se o controle: $u = -Ke$.

Desde que, x_3 , x_4 e x_5 são obtidos através de (6.35). Nas figuras a seguir estão representados o sistema controlado, através do controle u para o desejado estado (6.29).

Na fig. 6.4 tem-se o retrato de fase do sistema sem controle em preto e com controle em vermelho.

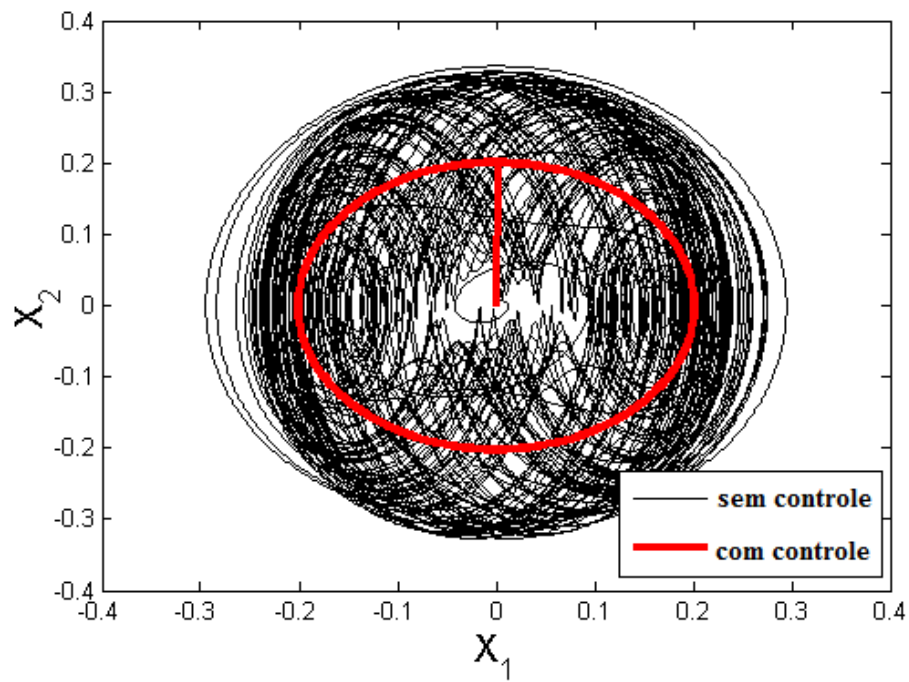


Figura 6.4 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle

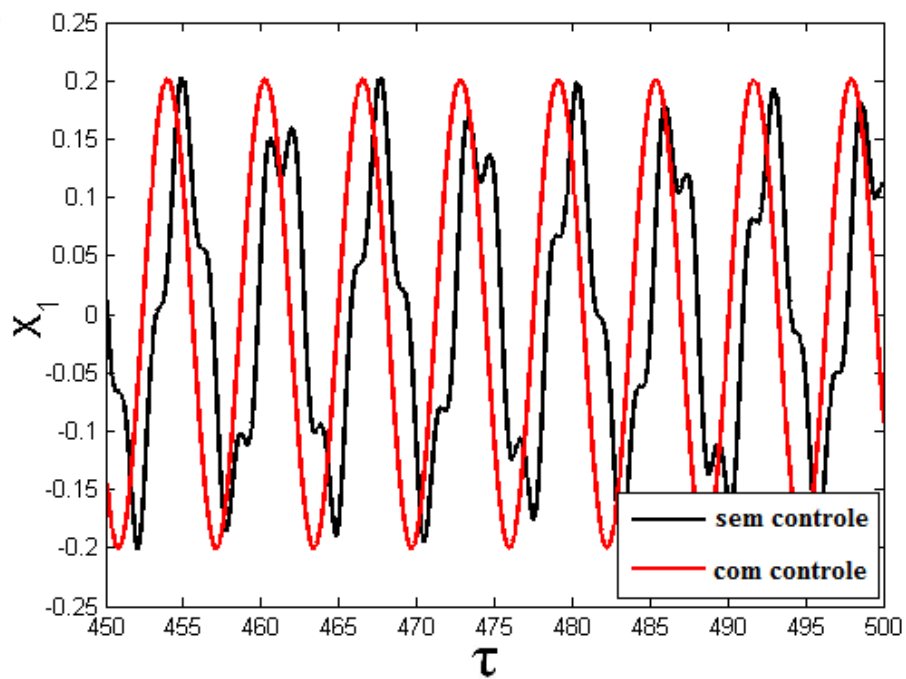


Figura 6.5 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle

A fig. 6.5 apresenta o histórico no tempo para o deslocamento do sistema sem controle em preto e em vermelho com controle.

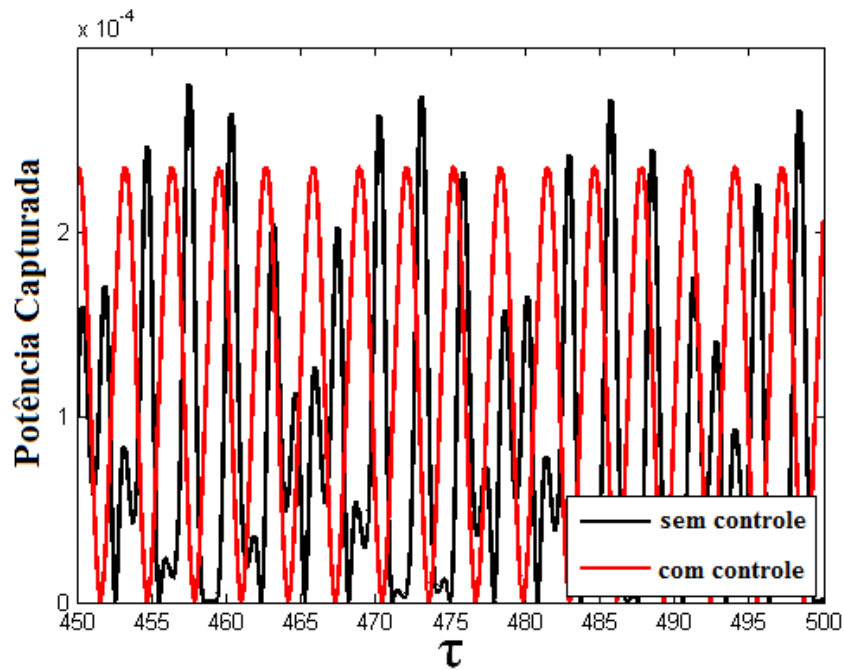


Figura 6.6 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.6 pode-se observar a potência adimensional máxima capturada para o sistema não-ideal, sem controle em preto e com a aplicação do controle em vermelho.

Novamente a eficiência do controle aplicado levou o sistema com comportamento caótico para a órbita desejada (5.21), aqui aplicou-se o controle (6.29) no sistema (5.1).

6.4.2. Aplicação do Controle LQR

O controle aqui proposto segue o princípio da utilização de dois controladores. O controle *feedforward*, a fim de manter o sistema em uma órbita desejada e um controle por realimentação de estados (*feedback*). O controle de realimentação de estados é um mecanismo matemático, que regula e estabiliza o comportamento de sistemas dinâmicos. Assim nesta seção o objetivo foi o de encontrar um controle, de tal modo

que a resposta do sistema controlado, resulte em uma órbita periódica assintoticamente estável, usando o controle de realimentação. A introdução do controle no sistema conduz a:

$$\dot{x} = Ax + G(x) + BU \quad (6.38)$$

Onde: $G(x)$ é a componente não-linear do sistema, e:

$$U = u_f + u \quad (6.39)$$

com: u_f sendo o controle de *feedforward* dado por:

$$u_f = -G(x) \quad (6.40)$$

e u é o controle *feedback*, obtido de: $u = -R^{-1}B^T e = -K(x - x^*)$, onde x representa os estados, e x^* é o estado desejado. $k = lqr(A, B, Q, R)$ é obtido através do comando do Matlab[®].

6.4.2.1. Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Linear Torque-Velocidade

O objetivo foi o de controlar os estados x_1 e x_2 implementando o controle no sistema:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= -\varepsilon\alpha x_2 - \beta x_1 - \varepsilon\beta_1 x_1^3 + \varepsilon\theta(1 + \Theta|x_1|)x_5 - \varepsilon\delta_1 x_4' \cos x_3 + \varepsilon\delta_2 x_4^2 \sin x_3 + U \end{aligned} \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} x_3' &= x_4 \\ x_4' &= \varepsilon\Gamma(x_4) + \varepsilon\gamma x_2' \cos x_3 \\ x_5' &= (\theta(1 + \Theta|x_1|)x_1 - x_5) / \rho \end{aligned} \quad (6.42)$$

E os demais estados são considerados como perturbações do sistema.

Considerando o sistema (6.41), na forma (6.38), obtem-se:

$$x' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta & -\varepsilon\alpha \end{bmatrix} x + G(x) + BU \quad (6.43)$$

Onde:

$$G(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\varepsilon\beta_1 x_1^3 + \varepsilon\theta(1 + \Theta|x_1|)x_5 - \varepsilon\delta_1 \dot{x}_4 \cos x_3 + \varepsilon\delta_2 x_4^2 \sin x_3 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta & -\varepsilon\alpha \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Definindo as matrizes $Q = 10^5 I_{2 \times 2}$ e $R = [1]$, assim obtem-se o controle:

$$u = -2.3166(x_1 - x_1^*) - 3.8243(x_2 - x_2^*) \quad (6.44)$$

Desde que x_3 , x_4 e x_5 foram obtidos de (6.42).

Na sequencia de figuras abaixo pode-se observar o sistema (6.43) com o controle para o estado desejado (6.38).

Assim, observa-se a eficácia da técnica de controle proposto, para trazer o sistema que estava oscilando em um comportamento caótico, para a órbita desejada (5.21), considerando-se a aplicação do controle (6.38) na eq(5.1).

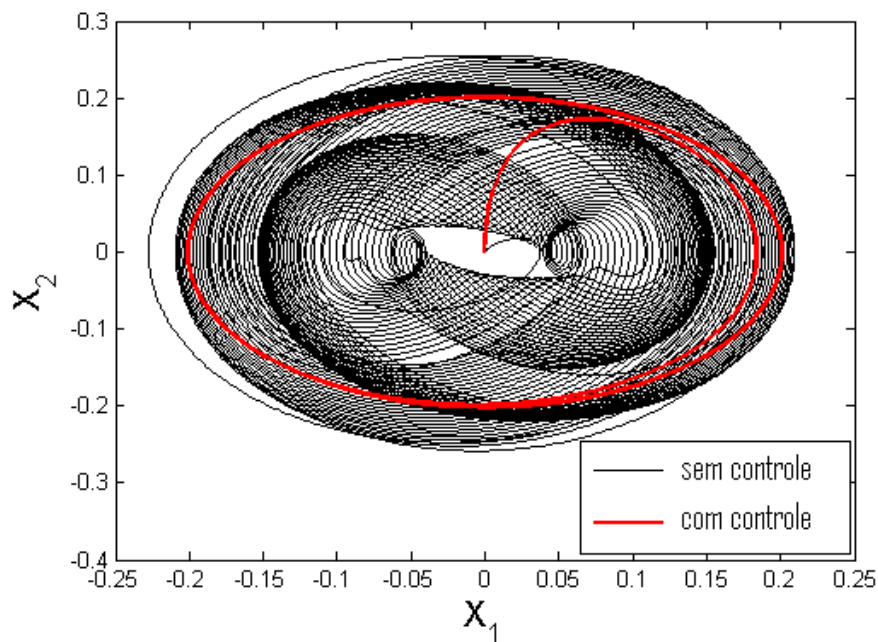


Figura 6.7 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.7 tem-se o retrato de fase do sistema não-ideal sem controle em preto e com controle em vermelho.

A seguir na fig. 6.8 apresenta-se o histórico de deslocamento no tempo do sistema não-ideal sem controle em preto e em vermelho com controle.

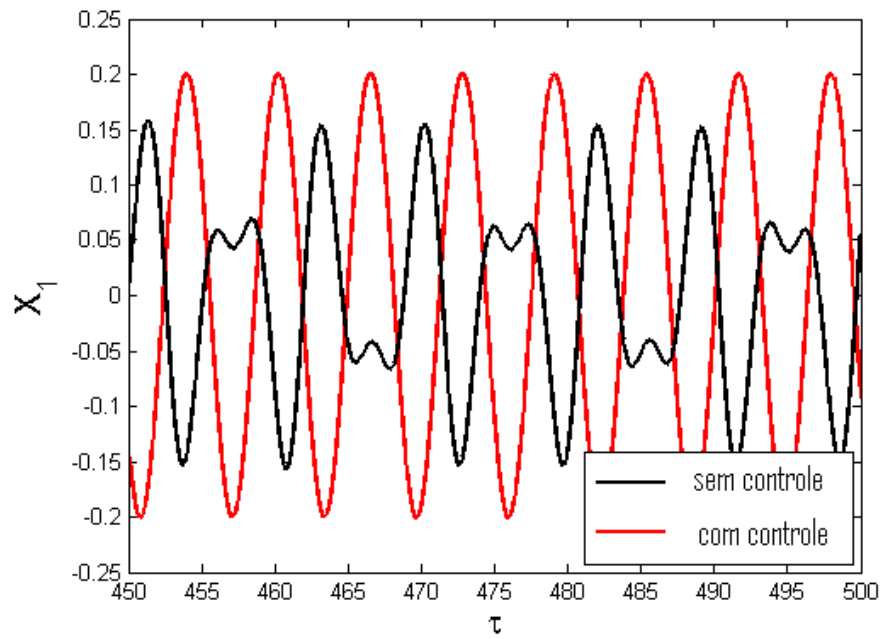


Figura 6.8 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle

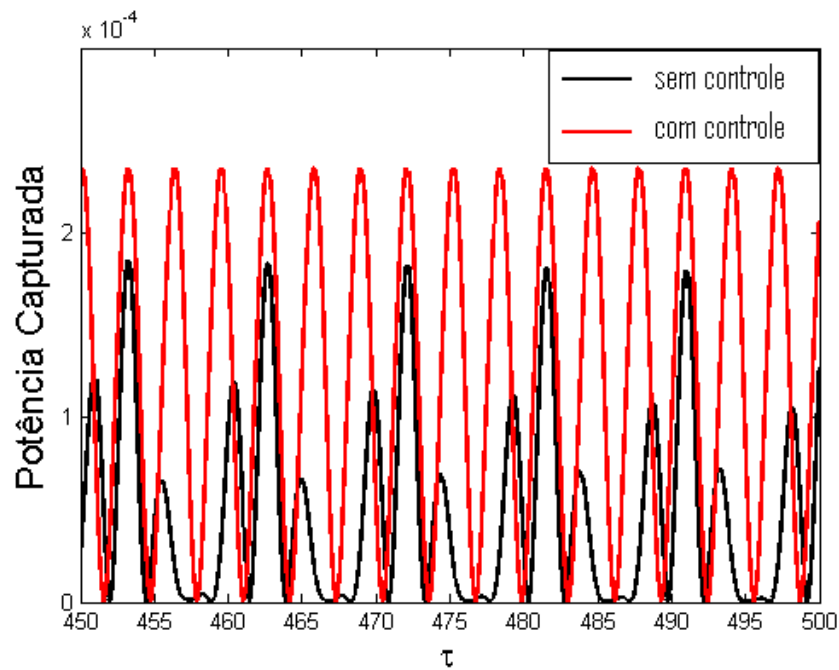


Figura 6.9 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.9 está representada a potência adimensional máxima capturada para o sistema não-ideal, sem controle em preto e com a aplicação do controle em vermelho.

6.4.2.2. Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente

Contínua com Relação Exponencial Torque-Velocidade

Análogo a seção anterior, aqui o objetivo foi o de controlar os estados x_1 e x_2

implementando o controle no sistema:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= -\varepsilon\alpha x_2 - \beta x_1 - \varepsilon\beta_1 x_1^3 + \varepsilon\theta(1 + \Theta|x_1|)x_5 - \varepsilon\delta_1 x_4' \cos x_3 + \varepsilon\delta_2 x_4^2 \sin x_3 + U \end{aligned} \quad (6.45)$$

$$\begin{aligned} x_3' &= x_4 \\ x_4' &= \varepsilon\Gamma(x_4) + \varepsilon\gamma x_2' \cos x_3 \\ x_5' &= (\theta(1 + \Theta|x_1|)x_1 - x_5) / \rho \end{aligned} \quad (6.46)$$

E os demais estados são considerados como perturbações do sistema.

Considerando o sistema (6.45), na forma (6.38), obtem-se:

$$x' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta & -\varepsilon\alpha \end{bmatrix} x + G(x) + BU \quad (6.47)$$

Onde:

$$G(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\varepsilon\beta_1 x_1^3 + \varepsilon\theta(1 + \Theta|x_1|)x_5 - \varepsilon\delta_1 \dot{x}_4 \cos x_3 + \varepsilon\delta_2 x_4^2 \sin x_3 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta & -\varepsilon\alpha \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Definindo as matrizes $Q = 10^5 I_{2 \times 2}$ e $R = [1]$, assim obtem-se o controle:

$$u = -2.3166(x_1 - x_1^*) - 3.8243(x_2 - x_2^*) \quad (6.48)$$

Desde que x_3 , x_4 e x_5 foram obtidos de (6.46).

Pode-se observar nas figuras a seguir o sistema (6.47) com o controle para o estado desejado (6.38).

Verifica-se novamente a eficácia da técnica de controle proposta que trouxe o sistema que estava em um comportamento caótico, para a órbita desejada (5.21), tendo sido considerada a aplicação do controle (6.38) na eq(5.1).

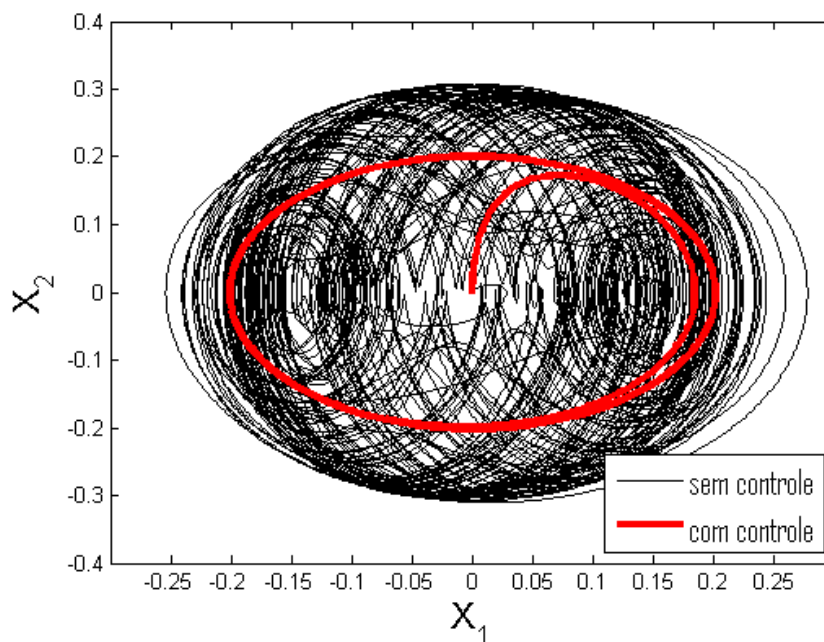


Figura 6.10 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.10 tem-se o retrato de fase do sistema não-ideal sem controle em preto e com controle em vermelho onde nota-se a eficiência do controle aplicado.

A seguir na fig. 6.11 apresenta-se o histórico de deslocamento no tempo do sistema não-ideal sem controle em preto e em vermelho com controle.

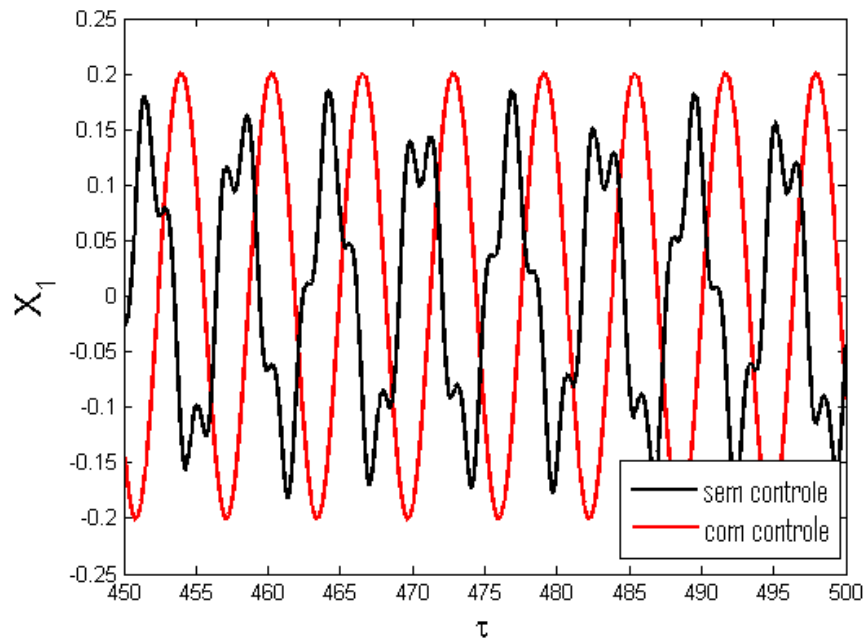


Figura 6.11 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.12 apresenta-se a potência adimensional máxima capturada para o sistema não-ideal, sem controle em preto e com a aplicação do controle em vermelho.

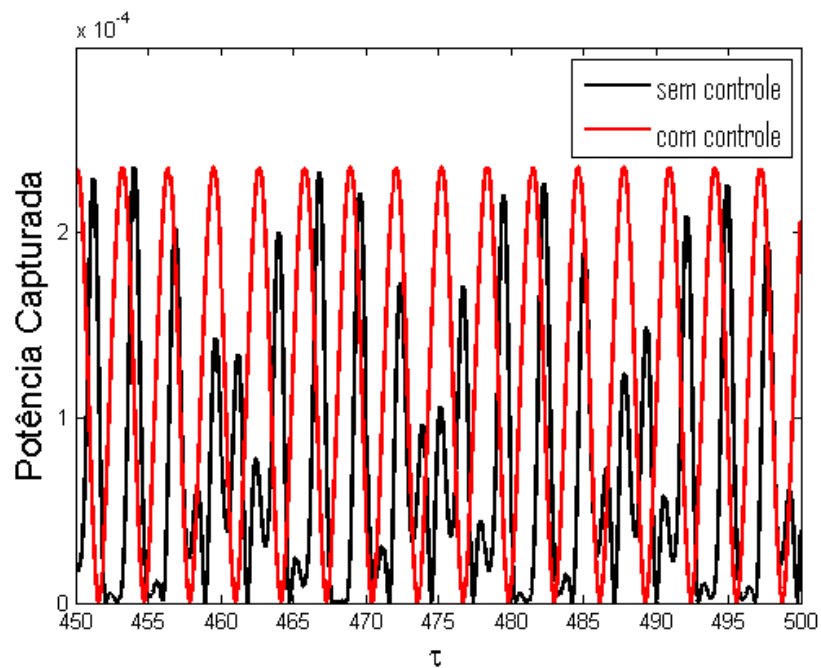


Figura 6.12 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle

6.4.3. Aplicação do Método de Controle de Retroalimentação que Altera a Energia de Oscilação Proposto por Tereshko

O objetivo desta seção foi encontrar um controle, tal que a resposta do sistema controlado, resultasse em uma órbita periódica assintoticamente estável, usando o método de controle proposto por Tereshko (2011). Assim após a introdução do controle obteve-se o seguinte sistema:

$$\begin{aligned}
 x_1' &= x_2 \\
 x_2' &= \varepsilon(-\alpha x_2 - bx_1^3 + \theta(1 + \Theta |x_1|)x_5 - \delta_1 x_4' \cos x_3 + \delta_2 x_4'^2 \sin x_3) - x_1 + u \\
 x_3' &= x_4 \\
 x_4' &= \varepsilon(\gamma x_2' \cos x_3 + \Gamma(x_4)) \\
 x_5' &= (\theta(1 + \Theta |x_1|)x_1 - x_5) / \rho
 \end{aligned} \tag{6.49}$$

Onde: u altera a energia de oscilação com o controle retroalimentado, obtido como:

$$u = -\kappa \tanh(\chi x'), \text{ como sugerido por Tereshko (2011).}$$

Definindo os valores para os parâmetros de controle $\kappa = 0.4$ e $\chi = 0.5$, foram efetuadas simulações numéricas utilizando tanto o motor com relação linear torque-velocidade quanto o motor com relação exponencial torque-velocidade. Então obteve-se as respostas para o sistema de captura não-ideal com os dois tipos de relação torque-velocidade usados como fonte de excitação. Nas seções seguintes as figuras demonstram as respostas obtidas pelo controle em uma comparação entre o sistema controlado e sem controle. Pode-se evidenciar a eficiência do controle proposto em trazer o sistema que estava vibrando em uma trajetória caótica, para uma órbita periódica estável. As respostas do controle estão dentro do espaço solução do problema,

porém como as órbitas nas quais o sistema foi estabilizado são de pequena amplitude, a potência máxima capturada também foi pequena em comparação a potência obtida quando utilizado os controles SDRE ou LQR que estabilizaram o sistema na órbita periódica encontrada através do método da média.

6.4.3.1. Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Linear Torque-Velocidade

Nas figuras a seguir pode-se avaliar a resposta do sistema excitado por um motor com relação linear torque-velocidade em preto, e em vermelho tem-se a resposta quando é aplicado a técnica de controle proposta por Tereshko (2011).

Na fig. 6.13 tem-se o retrato de fase do sistema não-ideal sem controle em preto e com controle em vermelho onde nota-se que o controle foi efetivo em manter o sistema em uma órbita periódica estável.

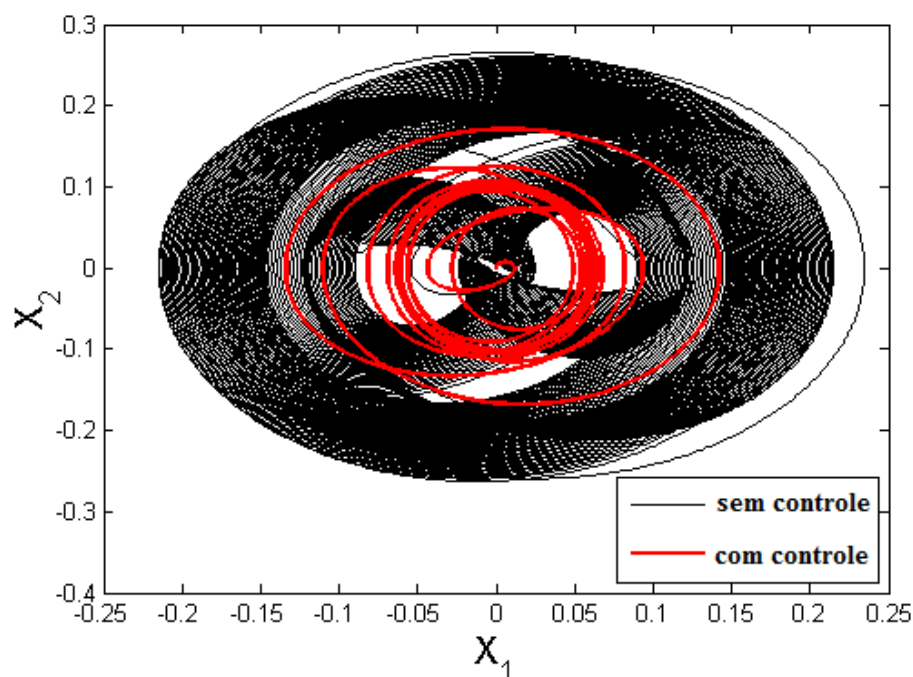


Figura 6.13 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle

A fig. 6.14 apresenta o histórico de deslocamento no tempo para o sistema não-ideal sem controle em preto e em vermelho com controle.

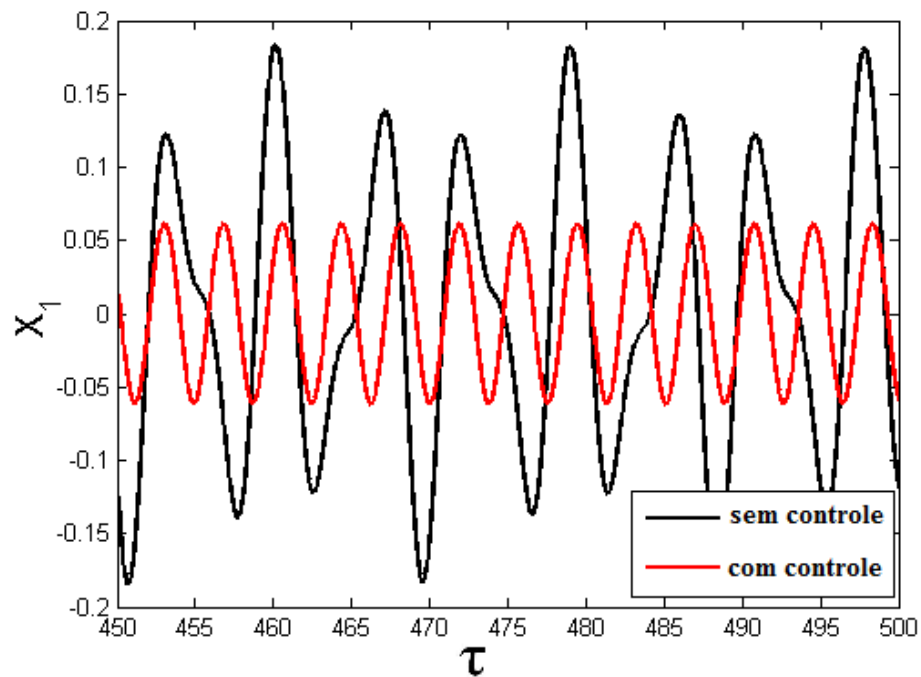


Figura 6.14 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle

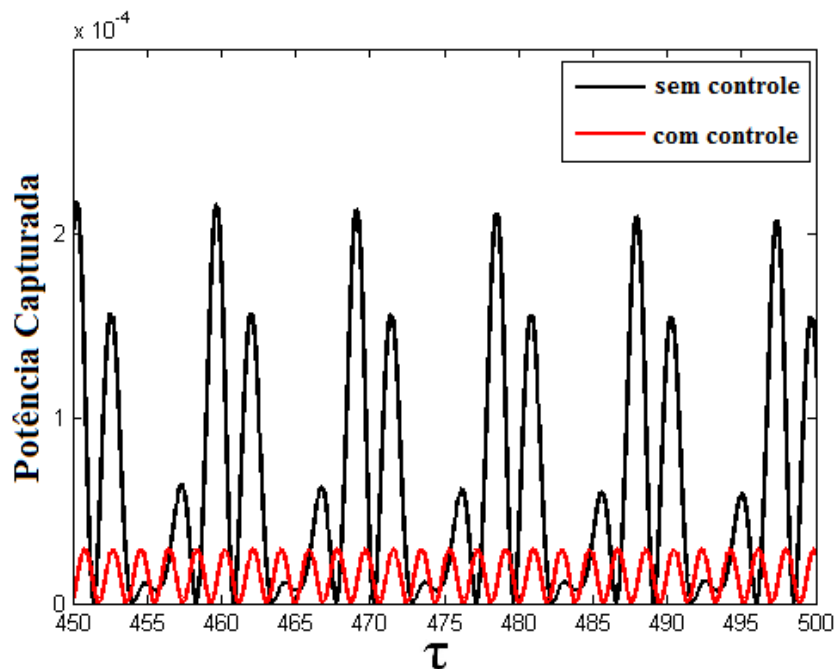


Figura 6.15 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Na fig. 6.15 está representada a potência adimensional máxima capturada para o sistema não-ideal, sem controle em preto e com a aplicação do controle em vermelho.

6.4.3.2. Estratégia de Controle Usando o Motor de Corrente Contínua com Relação Exponencial Torque-Velocidade

Através da aplicação da técnica de controle no sistema excitado por um motor com relação exponencial torque-velocidade, pode-se verificar que o controle foi efetivo em manter o sistema em uma órbita periódica estável.

Na fig. 6.16 o retrato de fase do sistema não-ideal apresenta a resposta dinâmica sem controle em preto e com controle em vermelho em uma órbita periódica estável.

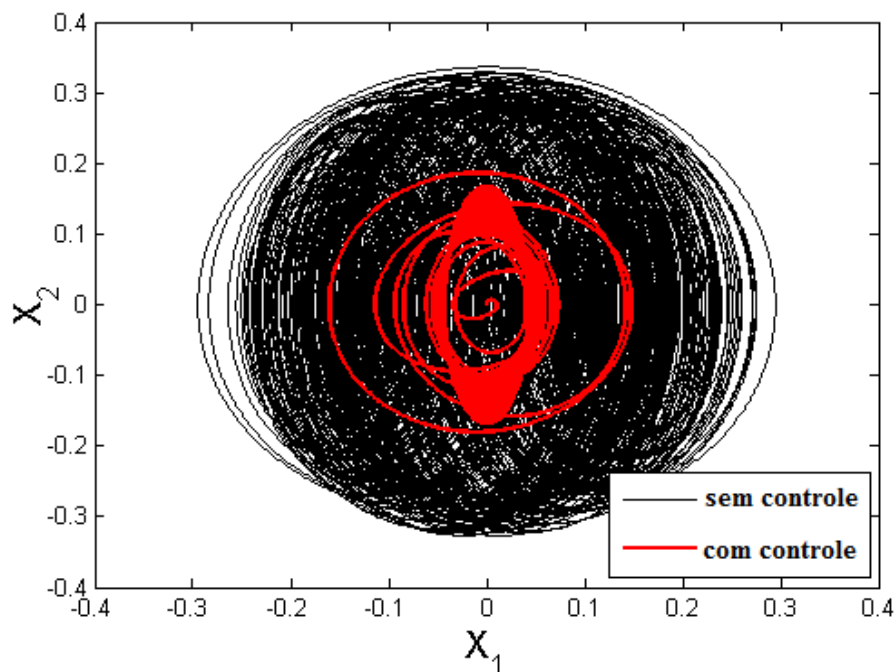


Figura 6.16 – Retrato de Fase: Em preto sem controle e em vermelho com controle

A fig. 6.17 apresenta o histórico de deslocamento no tempo para o sistema não-ideal sem controle em preto e em vermelho com controle.

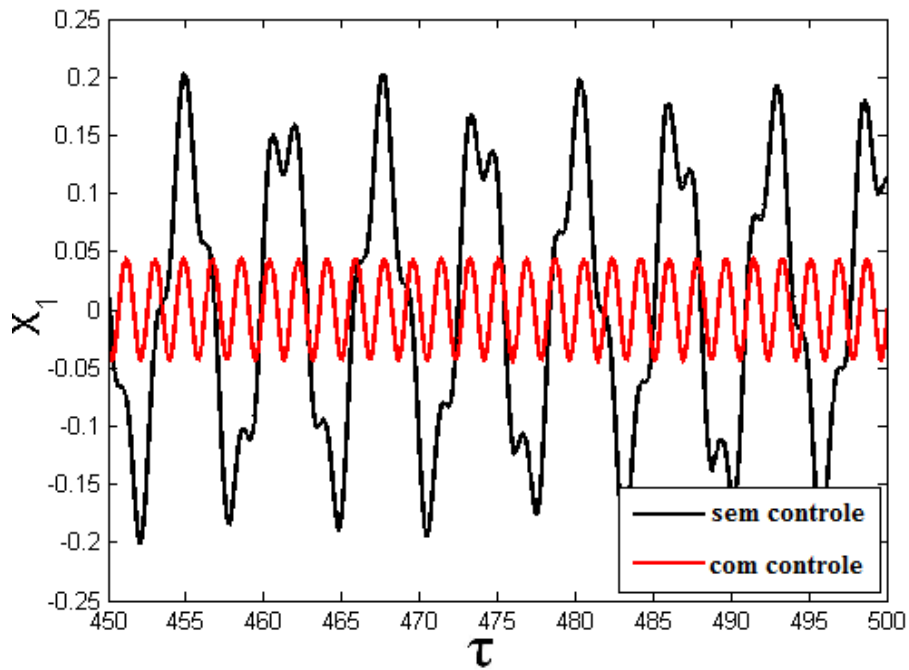


Figura 6.17 – Histórico no Tempo: Em preto sem controle e em vermelho com controle

A fig. 6.18 representa a potência adimensional máxima capturada para o sistema não-ideal, sem controle em preto e com a aplicação do controle em vermelho.

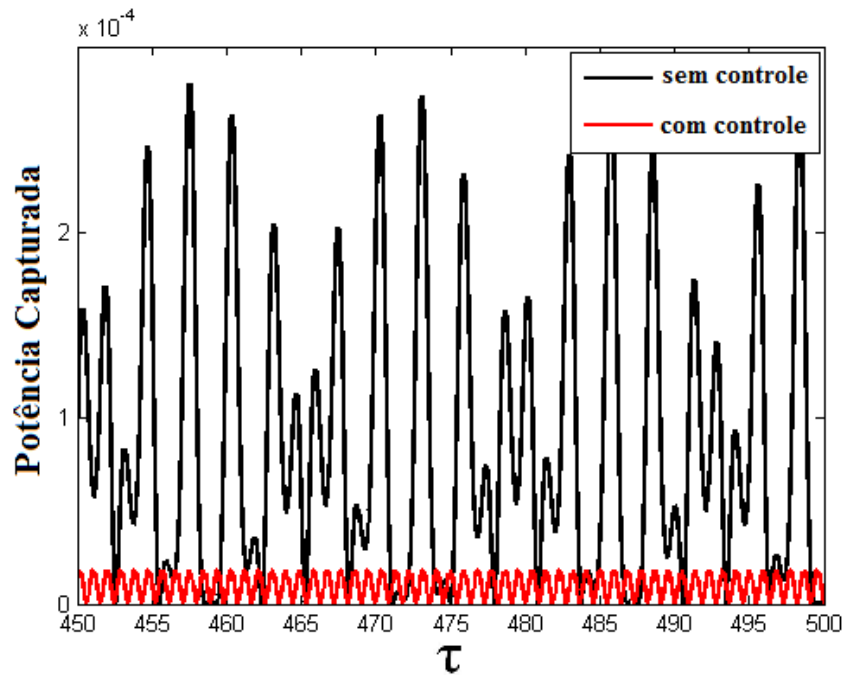


Figura 6.18 – Potência Máxima Capturada: Em preto sem controle e em vermelho com controle

Conclui-se que de maneira semelhante utilizando-se o motor CC com uma relação linear torque-velocidade ou o motor CC com uma relação exponencial torque-velocidade, a estratégia de controle manteve o sistema controlado em uma órbita periódica estável, porém a amplitude de vibração foi pequena para ambas as relações torque-velocidade, e sendo assim a potência capturada foi inferior a obtida com os controles SDRE e LQR. A grande vantagem desta técnica é a sua simplicidade na aplicação pois a mesma não depende de que seja obtida uma solução analítica a priori, o que pode ser difícil de se encontrar dependendo da complexidade do sistema estudado.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho pode-se confirmar a influência dos coeficientes de acoplamento piezoelétrico linear e não-linear sobre a resposta final do sistema.

A inclusão de não-linearidades relevantes na modelagem de dispositivos piezoelétricos de captura de energia é de grande importância para que se possa prever a potência final capturada pelo sistema.

Como resultado da análise do sistema de captura de energia, foi possível concluir que a medida que o valor do coeficiente de acoplamento linear piezoelétrico tornou-se maior, ocorreu um aumento da energia capturada até um certo limite, a partir do qual, aumentar o valor do coeficiente de acoplamento linear resultou em uma diminuição da amplitude de deslocamento e uma consequente queda na potência capturada pelo sistema.

A inclusão da não-linearidade no acoplamento piezoelétrico fez com que o sistema atingisse sua amplitude máxima de deslocamento em menos tempo que no caso linear.

Após a inclusão da não-linearidade piezoelétrica no sistema, verificou-se que para uma determinada faixa de valores de acoplamento linear θ , houve um ganho na potência capturada pelo dispositivo, contudo com o aumento do coeficiente de acoplamento não-linear Θ a interação desta não-linearidade com a estrutura também se tornou mais forte, causando significativas perdas na potência capturada, pois agiu semelhante a um efeito de amortecimento sobre a resposta vibratória do sistema. Assim quanto maior o valor de Θ , menor foi o deslocamento do sistema e consequentemente a potência capturada foi reduzida significativamente. Assim os efeitos das não-linearidades sobre a resposta

dinâmica do sistema de captura de energia não podem ser desprezados no momento em que se está projetando estes dispositivos.

No presente trabalho foi demonstrada a influência de uma fonte de energia de potência limitada sobre um dispositivo de captura de energia de vibração. A análise foi realizada sobre o comportamento dinâmico do sistema não-ideal excitados por um motor CC com relação linear entre torque-velocidade e um motor CC com relação exponencial entre torque-velocidade, onde uma comparação foi feita e conclui-se que o motor CC com relação exponencial torque-velocidade levou o sistema não-ideal ao regime caótico mais rapidamente.

O efeito Sommerfeld ocorreu no sistema levando à perda de estabilidade e a um movimento caótico com a conseqüente redução na potência capturada. Esse comportamento caótico foi identificado no modelo não-ideal através da variação do valor do parâmetro de controle (tensão elétrica no motor CC) e principalmente quando se utilizou coeficientes de acoplamento piezoelétrico com baixos valores.

O método média foi aplicado com sucesso para resolver o sistema de equações e encontrar uma solução analítica.

Utilizou-se o controle SDRE para trazer o sistema que se encontrava em um comportamento caótico para a solução periódica obtida pela aplicação do método da média, sendo o mesmo o controle com maior precisão de resposta, porém necessita de uma implementação com um microcontrolador. Foi utilizado o controle LQR também com eficiência para manter o sistema na órbita periódica desejada obtida pelo método da média, esse controle pode ser comparado as estratégias clássicas de controle, sendo análogo a um controlador PID amplamente disponível no mercado. Também analisou-se o uso do controle como proposto por Tereshko (2011), sendo que o mesmo não requer que se encontre uma solução analítica inicialmente, nesta técnica de controle pode-se

considerar a inclusão de um atuador magneto-reológico no sistema físico. Todas as técnicas de controle aplicadas no modelo não-ideal de captura de energia proposto, foram eficazes em manter o sistema em uma órbita periódica estável. Como pode-se verificar a energia capturada pelo método proposto por Tereshko (2011) foi menor que a energia capturada com os controles SDRE ou LQR. Isso se deve ao fato de que método proposto por Tereshko (2011) estabilizou o sistema em uma órbita de vibração menor que a órbita obtida pela solução analítica utilizada pelos controles SDRE ou LQR.

Em trabalhos futuros, a inclusão de um absorvedor passivo (NES) pode ser usada para estabilizar o sistema.

Também considera-se a inclusão do pêndulo como absorvedor.

Da mesma forma a introdução das equações da dinâmica do motor podem ser consideradas.

Também pode-se optar pela introdução de um *Shaker* para excitar o sistema não-ideal.

Uma nova função matemática pode ser utilizada para uma melhor aproximação dos coeficientes de acoplamento piezoelétricos.

CAPÍTULO 8

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALTHAZAR, J.M., CHESHANKOV, B. I., RUSCHEV, D. T., BARBANTIN, L., E WEBER, H. I., Remarks on the passage through resonance of a vibrating system with two degree of freedom, excited by a non ideal source. Journal of Sound and Vibration, 295 (5), p. 1075 – 1085, 2001.

BALTHAZAR, J.M., MOOK, D.T., WEBER, H.I., BRASIL, R.M.L.R.F., FENILI, A., BELATO, D., FELIX, J.L.P., An overview on non-ideal vibrations, Meccanica, Vol. 38, No. 6, 613-621, 2003.

BANKS, S. P., MANHA, K. J., “Optimal Control and Stabilization for Nonlinear Systems”, IMA Journal of Mathematical Control and Information, vol. 9 pp. 179-196, 1992.

BASSINELLO, D. G., Comportamento Dinâmico Não Linear e Controle de Sistemas Eletromecânicos em Macro e Micro Escalas, Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Elétrica, Bauru, 2011.

COTTONE, F., Nonlinear Piezoelectric Generators for Vibration Energy Harvesting. Universita’ Degli Studi Di Perugia, Dottorato Di Ricerca In Fisica, XX Ciclo, 2007.

CLOUTIER, J. R., “State-Dependent Riccati Equation Techniques: An Overview”,
Proceedings of the American Control Conference, vol.2, pp.932-936, 1997.

CRAWLEY, E. F., DE LUIS, J., Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 25, 1373–1385., 1987.

CRAWLEY, E.F., ANDERSON, E.H., Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams, Journal of Intelligent Material System Structure, 1:4-25, 1990.

DIMENTBERG, M. F., MCGOVERN, L., NORTON, R. L., CHAPDELAIN, J., HARRISON, R., Dynamics of an unbalanced shaft interacting with limited power supply. Nonlinear Dynamic, 13, p.171 – 187, 1997.

DU TOIT, N.E. e WARDLE, B.L., Performance of Microfabricated Piezoelectric Vibration Energy Harvesters, Intgr. Ferro., 83:13-32 , 2006.

DU TOIT, N.E. e WARDLE, B.L., Experimental Verification of Models for Microfabricated Piezoelectric Vibration Energy Harvesters, AIAA Journal, 45:1126-1137, 2007.

ERTURK, A., Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters, Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics, November 20, 2009 Blacksburg, VA, 2009.

ERTURK, A., INMAN, D. J., Piezoelectric Energy Harvesting, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

FENILI, A., BALTHAZAR, J.M., The rigid-flexible nonlinear robotic manipulator, Modeling and control, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 16, Issue 5, 2332-2341, 2011.

FRADKOV, A. L., EVANS, R. J., Control of chaos: Methods and applications in engineering, Annual Reviews in Control, 29, p. 33 – 56, 2005.

FUJITSU LABORATORIES LTD., 2010. Disponível em:
<http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2010/20101209-01.html>,
Acessado em: 17/05/2012.

GRZYBOWSKI, J., RAFIKOV, M., BALTHAZAR, J. M., Synchronization of the unified chaotic system and application in secure communication, Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation v. 14, 2793-2806, 2009.

HEYWANG, W., LUBITZ, K., WERSING, W., Piezoelectricity Evolution and Future of a Technology, Springer Series in Materials Science ISSN 0933-033x, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., Application Of The Linear Feedback Control In A Model Of Energy Harvester With Nonlinear Piezoelectric Coupling And Excited By A Non-Ideal Energy Source,

CONEM , VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho à 2 de agosto de 2012, São Luís – Maranhão – Brasil, 2012.

JALILI, N., Piezoelectric-Based Vibration Control, From Macro to Micro/Nano Scale Systems, Springer Science Business Media, LLC 2010.

MOON, F.C., Chaotic Vibrations, John Wiley and Sons, New York, 1987.

NAYFEH, A. H., MOOK, D. T. , Nonlinear Oscillations. Wiley, New York, 1979.

OGATA, C., Engenharia do Controle Moderno, 3 ed. Prentice-Hall do Brasil, 2000.

OTT, E., GREBOGI, C., YORKE, J., Controlling chaos, Physics Review Letters, 64, p. 1196 – 1199, 1990.

PALÁCIOS, J. L., Teoria de sistemas vibratórios aporticados não lineares e não ideais. Tese de Doutorado, UNICAMP – Campinas, 2002.

PERGHER, R., BOTTEGA, V., MOLTER, A., Biomechanical Model And Control Of Human Postural System And Simulation Based On State-Dependent Riccati Equation, Mecánica Computacional Vol XXIX, págs. 6605-6618 (artículo completo) – Argentina, 2010.

PERUZZI, N., BALTHAZAR, J.M., PONTES JR., B.R., Nonlinear dynamics and control of an ideal/non ideal load transportation system with periodic coefficients. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, v. 2, p. 32-39, 2007.

PICCIRILLO, V., Dinâmica Não Linear e Controle de um Sistema Vibratório Modelado com Memória de Forma e, Excitado por Fontes de Energia do Tipo Ideal e Não- Ideal, Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru, 2008.

PICCIRILLO, V., BALTHAZAR, J. M., PONTES, B. R., FELIX, J. L. P., Chaos control of a nonlinear oscillator with shape memory alloy using an optimal linear control: Part I: Ideal energy source, Nonlinear Dynamics vol: 55 n:1-2,139-149, 2009a.

PICCIRILLO, V., BALTHAZAR, J. M., PONTES, B. R., FELIX, J. L. P., Chaos control of a nonlinear oscillator with shape memory alloy using an optimal linear control: Part II: Non-Ideal energy source, Nonlinear Dynamics vol: 56 n: 3, 243-253, 2009b.

PONTES JR., B. R., Dinâmica e controle de sistemas não lineares com interação auto excitadora, sujeitos a fontes de energia do tipo ideal e não ideal. Tese de Doutorado, EESC/USP – São Carlos, 2003.

PRIYA, S., INMAN, D.J., Energy Harvesting Technologies. Springer Science Business Media, LLC, 2009.

RAFIKOV, M., BALTHAZAR J. M., On a sufficient conditions for nonlinear systems using linear state feedback control, Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications. Guaratinguetá, SP, Brazil, 2006.

RAFIKOV, M., BALTHAZAR J. M., On control and synchronization in chaotic and hyperchaotic systems, Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, vol: 13, pp. 1246-1255, 2008.

RAFIKOV, M., BALTHAZAR J. M., TUSSET. A. M., An Optimal linear Control Design for Nonlinear Systems, J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng., XXX, 4, p. 279-284, 2008.

RAFIKOVA, E., Dinâmica não-linear de um rotor não-ideal, Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas-SP, 2006.

RODRIGUES, K. S., Caos e Controle de Microviga em Balanço de um Microscópio de Força Atômica, Operando em Modo Intermitente, na Ressonância, Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru, 2011.

SILVA, A. P., SILVA, D. M., FERREIRA, M. L. S., DA COSTA, M. C., CORRÊA, P. A., Piezoelettricidade, Trabalho de integralização apresentado ao Departamento de Química da Universidade de Uberaba, Universidade de Uberaba, Uberaba – MG, 2009.

SINHA, S.C., HENRICHS, J.T., RAVINDRA, B.A., A general approach in the design of active controllers for nonlinear systems exhibiting chaos, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 165- 178, 2000. Springer-Verlag, 1991.

TERESHKO, V., Control and Identification of Chaotic Systems by Altering the Oscillation Energy, *Chaotic Systems*, Esteban Tlelo-Cuautle (Ed.), ISBN: 978-953-307-564-8, InTech, Disponível em: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/control-and-identification-of-chaotic-systems-by-altering-the-oscillation-energy>, 2011.

TRIPLETT, A., QUINN, D. D. , The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20 p. 1959-1967—November 2009.

TUSSET, A. M., RAFIKOV, M., BALTHAZAR, J. M., An Intelligent controller design for magnetorheological damper based on quarter-car model, *Journal of Vibration and Control*. 15, 12 1907-1920, 2009.

TUSSET, A. M., BALTHAZAR, J. M., On the chaotic suppression of both ideal and non-ideal Duffing based vibrating systems, using a magneto-rheological damper mathematical model, with hysteresis, *Proceedings of the 11th Conference on Dynamical Systems Theory and Applications*. Łódź, Poland. 183-188, 2011.

TWIEFEL, J., RICHTER, B., SATTEL, T., WALLASCHEK, J., Power Output Estimation and Experimental Validation for Piezoelectric Energy Harvesting Systems, J. Electroceram., 20:203-208, 2008.

VON WAGNER, U., HAGEDORN, P., Piezo--Beam Systems Subjected to weak Electric Field: Experiments and Modelling of Non-Linearities, Journal of Sound and Vibration, 256(5), 861–872, 2002.

YAMANAKA, H., MURAKAMI, S., Optimum design of operating curves for rotating shaft systems with limited power supply. In: Chung, H. (ed.), Current Topics in Structural Mechanics PVP, 179, ASME NY, p. 181 – 185, 1989.

SÚMULA CURRICULAR

DISCIPLINAS CURSADAS NO MESTRADO

Nome do Programa: ENGENHARIA ELÉTRICA						
Curso: MESTRADO						
Nome: ITAMAR ILIUK				matricula nº: 112356-2		
Disciplinas	Ano	Período Letivo	Créditos	Carga Horária	Freq	Conceito
Dinâmica Não-Linear e Caos	2010	1º Semestre	8	120	100	A
Robótica	2010	1º Semestre	8	120	93	A
Tópicos em otimização linear, inteira e quadrática	2010	1º Semestre	8	120	94	B
Vibrações Mecânicas - T	2010	1º Semestre	8	120	100	A
Controle de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares e Caóticos	2010	2º Semestre	8	120	100	A
Modelagem de sistemas mecânicos	2010	2º Semestre	8	120	88	A
Pesquisa Científica - T	2011	1º Semestre	4	60	94	A
Interação Modal em Sistemas Oscilatórios Não-Lineares	2012	1º Semestre	0	0		J
Total de créditos em disciplinas			52	780		
Total de créditos em atividades complementares (*)			12	180		
Total de créditos em dissertação			0	0		
TOTAL GERAL DE CRÉDITOS			64	960		

Trabalhos Aceitos em Eventos com Arbitragem

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On a Mathematical Model of the Non-Ideal Energy Harvester Vibrating System, COBEM, Proceedings of the 21st International Congress of Mechanical Engineering, ISSN 2176-5480, Natal, RN, Brazil, (2011).

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., Sommerfeld Effect in a Vibration Model of Non-Linear Energy Harvester Excited by a Non-Ideal Energy Source, 10th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications, DINCON, 2011, Águas de Lindóia – SP <http://dx.doi.org/10.5540/DINCON.2011.001.1.0062>.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On a Vibrating Model of Energy Harvester, with Nonlinear Piezoelectric Coupling and Excited by a Non-Ideal Motor, 11th conference on dynamical systems theory and applications December 5-8, 2011. Łódź, Poland, pp 391-396, ISBN:978-83-7283-448.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., Nonlinear dynamics and control strategies: On a Energy Harvester Vibrating System with a linear form to Non-ideal Motor Torque, Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnostics, 2012, Marrakech - Marrocos.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., Application of the passive control on a new model of energy harvester using a non-ideal portal frame structural system, CNMAC - 34º Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 17 a 21 de setembro de 2012, Aguas de Lindóia – SP.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., Application Of The Linear Feedback Control In A Model Of Energy Harvester With Nonlinear Piezoelectric Coupling And Excited By A Non-Ideal Energy Source, CONEM , VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho à 2 de agosto de 2012, São Luís – Maranhão – Brasil.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On A New Model Of Energy Harvester Using A Non-Ideal Portal Frame Structural System, The 7th Annual Energy Harvesting Workshop and the 2nd Annual CEHMS Conference, Blacksburg, VA – USA, 2012.

Trabalhos Submetidos em Eventos com Arbitragem

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On Passive Control Strategy To An Energy Harvester Efficiency, Using A Nonlinear Portal Frame Structure Excited By A Non-Ideal Motor, DINAME 2013 - Proceedings of the XV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, ABCM, Buzios, RJ, Brazil, February 17-22, 2013

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On Application Of The Passive Control To Energy Harvester Efficiency, Using A Non-Ideal Portal Frame Structural Support System, Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2012 November 09-15, 2012, Houston, Texas, USA. IMECE2012-85408.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On A New Model Of An Energy Harvester, Using A Non-Ideal Portal Frame Structural System Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2012 November 09-15, 2012, Houston, Texas, USA. IMECE2012-85504.

Trabalhos Aceitos em Revista com Arbitragem

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On non-ideal and chaotic energy harvester behavior, Journal of Differential Equations and Dynamical Systems, 2012, DOI: 10.1007/s12591-012-0127-5

Trabalhos Submetidos em Revista com Arbitragem

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On the Dynamic of a Vibrating Model of Energy Harvester, with Nonlinear Piezoelectric Coupling And Excited by a Non-Ideal Motor, (submitted) 2011.

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES JR, B. R., FELIX, J. L. P., On a Control Strategies to an Energy Harvester, Using of a Non-Ideal and Chaotic Vibrating System, Like Device, (submitted) 2011.

Trabalho Apresentado em Seminário da Pós-Graduação

ILIUK, I., BALTHAZAR, J. M., Análise De Um Sistema De Captação De Energia Não-Ideal , I Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, FEB – Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP – Bauru, 2011.