

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DINÂMICA E CONTROLE NÃO-LINEARES DA MICROSCOPIA
DE FORÇA ATÔMICA (AFM), INCLUINDO-SE TERMOS DE ORDEM
FRACIONÁRIA NO MODELO MATEMÁTICO

Autor: Patricia Soyuri Yamaguchi

Orientador: Prof. Tit. José Manoel Balthazar

Coorientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset

Bauru, 2020

SP, Brasil

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DINÂMICA E CONTROLE NÃO-LINEARES DA MICROSCOPIA
DE FORÇA ATÔMICA (AFM), INCLUINDO-SE TERMOS DE ORDEM
FRACIONÁRIA NO MODELO MATEMÁTICO

Autor: Patricia Soyuri Yamaguchi

Orientador: Prof. Tit. José Manoel Balthazar

Co-Orientador: Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tusset

Curso: Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Mecatrônica

Tese apresentada à Universidade
Estadual Paulista (UNESP), Faculdade
de Engenharia, Campus Bauru, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Bauru, 2020
SP, Brasil

Yamaguchi Patricia Soyuri.

Dinâmica e controle não-lineares da microscopia de força atômica (afm),
incluindo-se termos de ordem fracionária no modelo matemático/Patricia Soyuri
Yamaguchi

Orientador: José Manoel Balthazar

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Faculdade de Engenharia Campus Bauru.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

1. Palavra-Chave 1.2. Palavra-chave 2.2. Palavra-Chave 3.1. Orientador. II Universi-
dade xxx. III. Faculdade de xxx. IV. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE PATRICIA SOYURI YAMAGUCHI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de janeiro do ano de 2020, às 08:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação / FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSE MANOEL BALTHAZAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica - docente voluntário / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ATILA MADUREIRA BUENO do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. CLIVALDO DE OLIVEIRA do(a) Faculdade de Engenharia / Universidade Federal da Grande Dourados - MS, Prof. Dr. MAURICIO APARECIDO RIBEIRO do(a) Departamento de Eletrônica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Prof. Dr. ITAMAR ILIUK do(a) Departamento de Ciência da Computação / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de PATRICIA SOYURI YAMAGUCHI, intitulada **DINÂMICA E CONTROLE NÃO-LINEARES DA MICROSCOPIA DE FORÇA ATÔMICA (AFM), INCLUINDO-SE TERMOS DE ORDEM FRACIONÁRIA NO MODELO MATEMÁTICO**. Após a exposição, a discente foi arguida 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. ATILA MADUREIRA BUENO

Prof. Dr. CLIVALDO DE OLIVEIRA

Prof. Dr. MAURICIO APARECIDO RIBEIRO

Prof. Dr. ITAMAR ILIUK

AGRADECIMENTOS

Ao nosso prestigiado Deus, por ter dado estímulo para realizar este trabalho;

Aos familiares pelo ânimo e esforço;

Aos docentes educadores doutores José Manoel Balthazar e Ângelo Marcelo Tusset pelo auxílio;

À Administração da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), aos educadores doutores e servidores, pela assistência a esta pesquisa.

*“A vida é o que acontece enquanto
você está ocupado fazendo outros planos.”*

(John Lennon)

RESUMO

A microscopia da força atômica (AFM) com medidas em nanoescala, vêm da nanotecnologia e constitui atualmente um campo de pesquisa multidisciplinar. A proposta de pesquisa apresentada tem como objetivo contribuir a pesquisa científica sobre AFM considerando que sistema está operando no modo intermitente e em meio líquido, e que a dinâmica do amortecimento do meio líquido é determinado por derivadas de ordem fracionária. Através de ferramentas de simulação numérica serão realizadas a análise dinâmica do sistema para os casos em que o sistema tenha comportamento caótico. Para supressão deste comportamento caótico serão utilizadas e analisadas duas estratégias de controle, o controle SDRE (Estados Dependentes da Equação de Riccati) e o controle OLFC (Controle Linear por Realimentação Ótimo).

Palavras-chave: AFM, Caos, Comportamento Dinâmico Não- Linear, Controle, Estabilidade- Instabilidade, Métodos Analíticos e Numéricos.

ABSTRACT

The atomic force microscope (AFM) with nanoscale measurements comes from nanotechnology and is currently a multidisciplinary field of research. The present research proposal aims to contribute to scientific research on AFM considering that the system is operating in the intermittent mode and in liquid medium, and that the damping dynamics of the liquid medium is represented by fractional order derivatives. Through numerical simulation tools, the dynamic analysis of the system will be performed in cases where the system has chaotic behavior. To suppress this chaotic behavior we will use and analyze two control strategies, the SDRE (Riccati Equation Dependent States) and OLFC (Linear Control for Optimum Feedback).

Keywords: AFM, Control, Nonlinear Dynamics, Numerical Simulations.

Sumário

CAPÍTULO 1	1
1.PRELIMINARES.....	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVO	3
1.3. DESCRIÇÃO DA TESE	3
CAPÍTULO 2	5
2.POSIÇÃO DO PROBLEMA NA LITERATURA.....	5
2.1.CRIAÇÃO DO AFM	5
2.2.FORÇAS ATUANTES ENTRE A PONTEIRA E A AMOSTRA	5
2.3.ELEMENTOS INTEGRANTES DO AFM.....	6
2.4.DESEMPENHO DO AFM.....	7
2.5.DESCRICÃO DA POSICÃO DO PROBLEMA NA LITERATURA	8
CAPÍTULO 3	13
3.PROJETO DE CONTROLE NÃO LINEAR APLICADO NA SUPRESSÃO DO COMPORTAMENTO CAÓTICO DO AFM.....	13
3.1.CONTROLE REALIMENTADO LINEAR ÓTIMO (OLFC).....	13
3.2.CONTROLE DA EQUAÇÃO DE RICCATI DE DEPENDÊNCIA DE ESTADO (STATE DEPENDENT RICCATI EQUATION (SDRE))	16
CAPÍTULO 4	20
4.1.MODELAGEM MATEMÁTICA DO AFM.....	20
4.2.MODELO MATEMÁTICO PARA O MODO INTERMITENTE CONSIDERANDO-SE A FORÇA ATRATIVA E REPULSIVA DE VAN DER WAALS E AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO	20

4.3.MODELO MATEMÁTICO PARA O MODO NÃO CONTATO CONSIDERANDO-SE APENAS A FORÇA ATRATIVA DE VAN DER WAALS E AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO.....	25
CAPÍTULO 5	30
5.1.PROJETO DE CONTROLE PARA O SISTEMA AFM COM COMPORTAMENTO CAÓTICO.....	30
CAPÍTULO 6	34
6.1.PROPOSTA DO CONTROLE OLFC PARA O AFM COM COMPORTAMENTO CAÓTICO.....	34
6.2.PROJETO DE CONTROLE ÓTIMO PARA O MODO INTERMITENTE CONSIDERANDO A FORÇA ATRATIVA E REPULSIVA DE VAN DER WAALS E AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO	34
6.3.PROJETO DE CONTROLE USANDO O CONTROLE OLFC	36
6.4.PROJETO DE CONTROLE CONSIDERANDO O CONTROLE SDRE	39
6.5.ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA	42
6.6.PROJETO DO CONTROLE REALIMENTADO LINEAR PARA O AFM COM FORÇA ATRATIVA DE VAN DER WAALS CONSIDERANDO O CÁLCULO FRACIONÁRIO	44
6.7.PROJETO DE CONTROLE CONSIDERANDO O CONTROLE OLFC	48
6.8.PROJETO DE CONTROLE CONSIDERANDO O CONTROLE SDRE	50
6.9.ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA	52
DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	56
SÚMULA CURRICULAR.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.11- Esquema do AFM. Fonte: SEBASTIAN <i>ET AL</i> , (2007).....	1
Figura 2.41- Figura 2 Esquema de funcionamento de um Microscópio de Força Atômica. Fonte: BOWENAND HILAL 2009.	7
Figura 2.42- Figura 3. Deflexão da microviga: (a) modo contato, (b) modo não contato, (c) modo intermitente. Fonte: MAURICIO, 2011.	9
Figura 4.11- Modelo de um AFM. Fonte: BALTHAZAR et al. (2012A, 2013)	21
Figura 4.12- Representação do modelo de AFM através de um sistema massa-mola-amortecedor. Fonte: BALTHAZAR <i>et al.</i> (2012a, 2013).	25
Figure 4.21- Modelo de um AFM fonte: NOZAKI <i>et al.</i> (2013) e WANG <i>et al</i> , (2009).	27
Figura 5.11- (a) Deslocamento para o sistema controlado.....	34
Figura 5.12- Deslocamento para o sistema sem e com controle.....	34
Figura 6.21- Variação de K versus a variação de $0.5 \leq q_3 \leq 1$	36
Figura 6.22- Histórico de tempo sem controle, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$). (a) deslocamento. (b) velocidade. (c) diagrama de fase.	37
Figura 6.31- Histórico de tempo sem e com controle, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$). (a) deslocamento. (b) velocidade. (c) diagrama de fase. (d) erro e_1 . (e) erro e_2	40
Figura 6.41- Histórico de tempo sem e com controle, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$). (a) deslocamento. (b) velocidade. (c) diagrama de fase. (d) erro e_1 . (e) erro e_2	43
Figura 6.51-OLFC. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	44
Figura 6.52- SDRE (a) desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	44
Figura 6.53- OLFC. (a) Desvio da trajetória e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2 ...	45

Figura 6.54- SDRE. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	45
Figura 6.55- OLFC. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	46
Figura 6.56- SDRE. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória deseja da e_2	46
Figura 6.61- Variação de K versus a variação de $0.5 \leq q_3 \leq 1$	47
Figura 6.62- Histórico de tempo sem controle, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$). (a) deslocamento. (b) velocidade. (c) diagrama de fase.	47
Figura 6.71- Histórico de tempo sem e com controle, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$). (a) deslocamento. (b) velocidade. (c) diagrama de fase. (d) erro e_1 . (e) erro e_2	50
Figura 6.81- Histórico de tempo sem e com controle, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$). (a) deslocamento. (b) velocidade. (c) diagrama de fase. (d) erro e_1 . (e) erro e_2	52
Figura 6.91- OLFC. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	53
Figura 6.92- SDRE. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	54
Figura 6.93- OLFC. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	54
Figura 6.94- SDRE. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	55
Figura 6.95- OLFC. (a) Desvio da trajetória desejada e_1 . (b) Desvio da trajetória desejada e_2	56
Figura 6.96- SDRE. (a) Desvio da trajetória deseja e_1 . (b) Desvio da trajetória deseja e_2	56

LISTA DE SIGLAS

STM	Microscópio de Tunelamento
MFM	Força Magnética do Microscópio
EFM	Força Elétrica do Microscópio
AFM	Microscópio da Força Atômica
OLFC	Controle Realimentado Linear Ótimo
SDRE	Controle da Equação de Riccati de Dependência de Estado
EDO	Equação Diferencial Ordinária
EDP	Equação Diferencial Parcial

LISTA DE SIMBOLOS

F_{vdw}	Força de Van der Waals
K_{nl}	Constante elástica não linear
K_l	Constante elástica linear
τ	Atraso
D	Dimensão
m	Dimensão de imersão
z	Altura em que a microviga está fixada
x	Deflexão da microviga
f	Força
K	Coeficiente teste 0-1
H	Constante de Hamaker
R	Raio de uma esfera
Z	Distância entre esfera e amostra
$P_{L,R}$	Potencial de Lennard-Jones
D	Distância entre amostra e área de contato
K	Coeficiente de elasticidade da mola
M	Massa da ponteira
E	Módulo de Young
$w^*(L)$	Função de flexão da ponta da microviga
$q(x)$	Função posição
A	Matriz de estado do polinômio de Riccati

F	Vetor não linear
U	Função de controle
u_f	Controle por pré-alimentação
U	Controle de realimentação
$P(x)$	Polinômio de Riccati
c_1, c_2	Par de coeficientes de interação do potencial intermolecular
L	Comprimento da microviga
I	Momento de inércia
A	Seção de área

CAPÍTULO 1

1.PRELIMINARES

É mostrado o desempenho do AFM, os modelos de microscópios, comparações e o desempenho, em seguida objetivos e a apresentação dos capítulos.

1.1.INTRODUÇÃO

O AFM produz imagens em superfícies com resolução nanométrica segundo BINNIG *et al.* (1986) e usa técnicas de resolução de superfície com nível atômico para amostras condutoras e não condutoras é usado para diversos efeitos para ter imagens, a partir de sistemas biológicos inclusive fabricação de semicondutores Zanette (2010).

Visto que para medir as forças de superfície é controlar a deflexão da microviga através de um fotodiodo segundo a Figura 1.11.

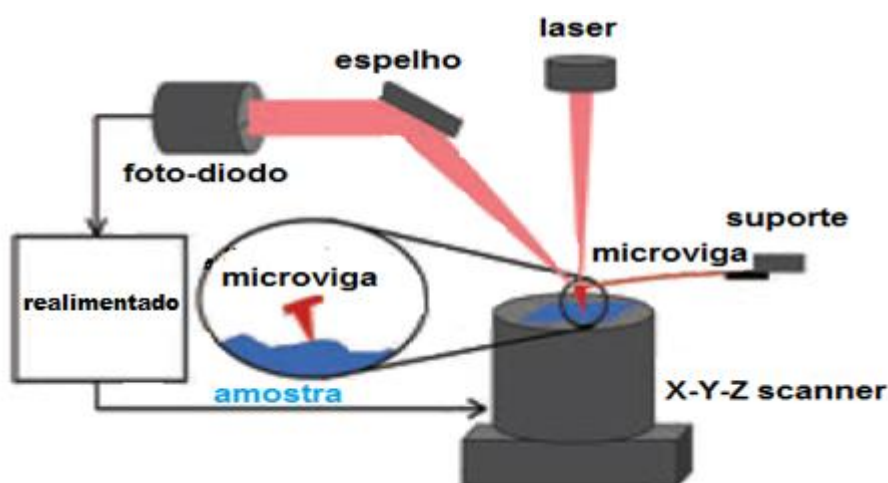


FIGURA 1.11: ESQUEMA DO AFM.

FONTE: SEBASTIAN *ET AL.*, (2007).

Para obter as imagens são usados três jeitos: contato, o modo intermitente e o não contado.

De acordo com TUSSET *et al.* (2019) o modo intermitente é o mais usado, que é executada através do balanço da microviga próximo à sua regularidade de ressonância. Neste método, a amplitude de condução é estabelecida de modo que seja um valor constante e repetições retumbantes específicas que são semelhantes a uns kilohertz para alguns megahertz por CADENA *et al.* (2016).

Sobre o modo intermitente a microviga expressa um funcionamento caótico acompanhado com as forças de Van der Waals, e foi analisado experimentalmente na presença de HSIEH *et al.* (2016).

É simbolizada por um potencial de Lenard-Jones a microviga e a amostra que em curto alcance seria um potencial repulsivo e a longo alcance é representado pelas forças de Van der Waals junto a um potencial atraente.

A presença de comportamento caótico no AFM é altamente indesejável por sua execução, onde essas medidas imprecisas e com pouca resolução da descrição detalhada da amostra pode acontecer de atribuir efeitos imprecisos de acordo com RAJABIFAR *et al.* (2018).

Assim, é sempre necessário garantir um bom desempenho do microscópio e tirar o comportamento caótico da microviga e alterar o desempenho do AFM onde o movimento regular é garantido segundo NESTOROVIC *et al.* (2018) e WEI *et al.* (2016).

Segundo KEIGHOBADI *et al.* (2017) o controle do caos por meio da estabilidade tem atraído uma imensa parte de interesse de pesquisa.

Consequentemente, poucas estratégias são aplicadas para controlar esse movimento desproporcional um dos mais eficientes é a aplicação de controladores que é usado para retirar o comportamento caótico Balthazar *et al* (2001).

1.2.OBJETIVO

O objetivo é exibir as não linearidades do AFM que está ligado ao comportamento caótico e mostrar o que acontece quando a microviga vibra, usando métodos de controle que foi aplicado por meio de simulações computacionais.

1.3.DESCRICÃO DA TESE

No Capítulo 2 é detalhado a criação do AFM, forças atuantes entre a ponteira e a amostra, elementos integrantes do AFM e o desempenho do AFM e uma descrição da posição do problema na literatura.

O Capítulo 3 trata das técnicas de controle adotada. O controle realimentado linear ótimo (OLFC) e o controle da Equação de Riccati de dependência de estado (SDRE).

O Capítulo 4 descreve a modelagem matemática que são:

O modelo matemático para o modo intermitente considerando a força atrativa e repulsiva de Van der Waals e amortecimento hidrodinâmico.

O modelo matemático para o modo não contato considerando somente força atrativa de Van der Waals e amortecimento hidrodinâmico.

No Capítulo 5 foi apresentado o projeto de controle para o sistema AFM com comportamento caótico.

O Capítulo 6 descreve o comportamento dinâmico do AFM, e o controle adotado com a ordem fracionária usando o controle OLFC e o SDRE.

Na sequência exibe a discussão dos resultados e as conclusões, trabalhos futuros, as referências, os apêndices que tratam as definições como: o cálculo fracionário, o teste 0-1 e a demonstração do teorema e encerrando com a súmula curricular.

CAPÍTULO 2

2.POSIÇÃO DO PROBLEMA NA LITERATURA

Expõe a criação do AFM, forças atuantes entre a ponteira e a amostra, elementos integrantes do AFM e o desempenho do AFM e uma descrição da posição do problema na literatura.

2.1.CRIAÇÃO DO AFM

Em 1986 o AFM foi descoberto e construído por Calvin Quate, Gerd Binnig e Christoph Gerber.

Os benefícios são: resolução maior; as imagens do AFM são preparadas em x,y e z ou seja em 3 dimensões; não tem métodos específicos no preparo da amostra Zanette (2010).

2.2.FORÇAS ATUANTES ENTRE A PONTEIRA E A AMOSTRA

Durante a varredura os átomos da ponteira junto aos átomos que estão na superfície podem ser atrativos ou repulsivos durante o contato entre os átomos.

As forças de Van der Waals é uma das forças que tem destaque maior ocorre quando tem a atração da ponteira e a amostra.

As forças de Van der Waals são:

a) Forças de orientação: é a relação que acontece com duas moléculas polares com momentos dipolares constantes.

b) Forças de indução: é o contato de uma molécula polar e uma apolar, convertendo em uma atração parecida à registrada entre moléculas polares.

c) Forças de dispersão: é resultado da relação entre dipolos flutuantes que ocorrem em moléculas apolares, onde esses dipolos são determinados em ciclos de tempo muito curto. São simétricas esta distribuição em média.

2.3.ELEMENTOS INTEGRANTES DO AFM

Os elementos são:

- a) Há uma microviga que fica presa no suporte;
- b) Para fazer as varreduras e posicionar a amostra possui cerâmicas piezelétricas.

São acoplados outros instrumentos como circuitos de realimentação que controla a posição vertical da ponteira conectado a um computador movendo os escaners de varredura onde armazena dados e modificam imagens usando programas específicos BUTT (2005).

A base que usa de apoio a ponteira do AFM na microviga em geral é em forma da letra V ou pode ser também em forma retangular o formato ZANETTE (2010).

Uma das formas mais comum da ponteira é em forma de pirâmide de nitreto de silício onde a base é quadrada e possui lados de medidas 5×10^{-5} metros e o raio do topo é aproximadamente 10^{-9} metros.

Existe outros tipos de ponteiras como a forma de um cone por exemplo fabricada com o material de silício onde o raio da base varia de 3×10^{-5} a 6×10^{-5} metros e junto com o raio do topo com medidas a cerca de 2×10^{-8} metros.

As alturas das ponteiras no AFM variam de 1×10^{-4} metros e 2×10^{-4} metros segundo ZANETTE (2010).

Alguns materiais como cristais de titânio, zircônio, chumbo e outros materiais podem sofrer também o inverso formando um defeito geométrico proporcional usando uma voltagem aplicada em alguns materiais KITTEL (2006).

2.4.DESEMPENHO DO AFM

A um espaço correspondente a 1×10^{-10} metros os primeiros átomos que estão na ponta próximos a superfície se ligam junto a ponteira e a amostra com uma distância de alguns metros.

Por causa do contato atômico a microviga tem deflexões isto acontece quando ocorre a varredura e o laser atinge a amostra e logo é desviado.

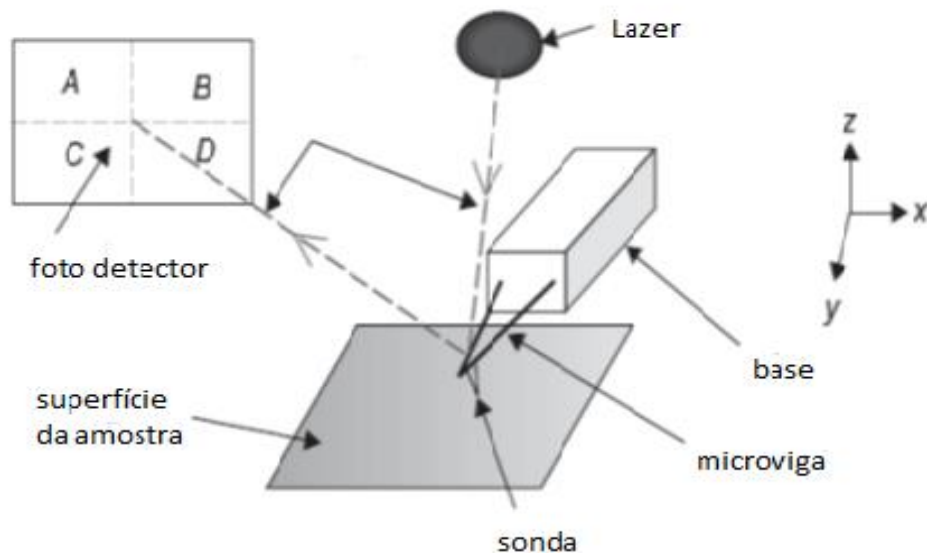


FIGURA 2.41: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA
FONTE: BOWENAND HILAL 2009.

Encontram-se diversas imagens que influencia em muitos aspectos junto a ponteira e a amostra como por exemplo a existência de sujeira na amostra, umidade do ar e junto com a geometria da ponteira ZANETTE *et al.*(2000).

As imagens são reproduzidas:

- a) Modo contato é o melhor na construção das imagens, no entanto é recomendado a utilizar em amostras com pouca rigidez onde age em locais onde há forças desprezíveis e a constante elástica seja menor valor possível para obter uma boa flexão e não arruinando, e a forma mais utilizada é em

forma da letra V onde diminui as forças laterais de atrito que desgastam as imagens criadas. Geralmente o formato das ponteiros são forma de pirâmides.

- b) Modo intermitente: A microviga alterna tem que ter uma constante elástica melhor que o item “a”, com amplitude melhor, limitando contato da superfície com a amostra frequentemente. Em geral as ponteiros são usadas de forma cônica.
- c) Modo não contato: A microviga muda devido a sua repetição com amplitudes baixas e com valor alto da constante elástica, e a amostra não é tocada e não há preocupação se a ponteira for afetada para fazer imagens dispondo detalhes bem menores visto que a todo momento a ponteira está afastada da amostra ao longo da varredura.

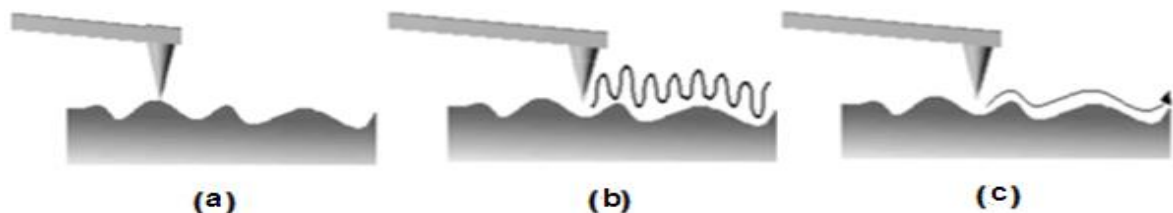


FIGURA 2.42: DEFELEXÃO DA MICROVIGA: (a) MODO CONTATO, (b) MODO INTERMITENTE, (c) MODO NÃO CONTATO.

FONTE: MAURÍCIO, 2011.

2.5.DESCRICÃO DA POSICÃO DO PROBLEMA NA LITERATURA

Segundo NOZAKI (2016), as não linearidades surgem periodicamente em experimentos, abalando o retorno previsto onde as variações são concretizadas na forma de imagens não possuindo imagens boas.

Em ZAKARIA e AZIZ (2018), o AFM é um utensílio poderoso que estuda apenas topografia de superfícies, investiga da mesma forma forças de interações junto com a ponteira e a amostra.

Em YANYAN WANG e SEN WU (2018) o AFM é um instrumento importante que gera imagens em nível de nanoescala.

Foi demonstrado que a simulação é eficaz para o projeto e foi realizado usando o controle Fuzzy no AFM.

Segundo MOLLICK *et al.* (2018) o microscópio de sonda de varredura (SPM) possui diversas técnicas utilizando a imagem junto com as qualidades dos utensílios físico e químico a nível de nanoescala.

O método de varredura é baseado na descoberta da deflexão da microviga, que é causada pelo modo contato, entretanto seria o período onde a ponteira percorre a dimensão da amostra.

De acordo EATON e BATZIOU (2019) todas as técnicas utilizadas no AFM, perturbações podem surgir por causa do mau uso do microscópio, e poucos são por causa das características particulares da amostra e considera a exata observação dos dados.

Em HUSSAIN, S. *et al.* (2019) o desenvolvimento dos materiais bidimensionais 2D está aumentando exponencialmente em muitos campos científicos junto com a área técnica em especial engenharia.

Por essa razão, é muito significativo qualificar essas qualidades a nível de nanoescala.

Os métodos baseados no AFM, são instrumentos poderosos que ao mesmo tempo definem a estrutura das propriedades elétricas de materiais 2D com alta solução espacial, sendo mais usadas neste campo de pesquisa.

De acordo ZHUKOV (2018) as imagens usadas em escala nanométrica são alcançadas.

Usando a realimentação aplicado na definição de controle e desenvolvendo no modo híbrido no AFM, é apontada a chance das operações das microgotas pela ponteira do microscópio.

E introduziu um recurso de movimentos suave de nanofios pelo fluxo líquido arrumado pela ponteira do AFM.

Em NAKAJIMA MIZUKI *et al.* (2018) mecanismos semicondutores de potência pelo microscópio de varredura por sonda foi fundamentada no ajuste do AFM, o microscópio de sonda Kelvin e o microscópio de força de capacitância, permitiu a análise direta de estruturas e formação de imagens usando o nível em nanoescala.

Observações a nível de nanoescala foram feitas com controle de estabilidade usando a metodologia de descoberta da frequência em um ambiente a vácuo.

Em RASSADIN *et al.* (2018) foi sugerido um programa de pesquisa para a visão da área de nanoengenharia.

Conhecimento de uma região no estado sólido sob a ação de uma procedência externa considerou uma dificuldade de controle ótimo por um conjunto de resultados dados.

A superfície do estado sólido usando o AFM e ondas eletromagnéticas foram demonstradas.

De acordo RUPPERT *et al.* (2019) o AFM com sensoriamento adaptado disponibiliza benefícios diferentes em ligação à instrumentação convencional na microviga.

Apesar da tecnologia de microfabricação da microviga tenha evoluído constantemente por muito tempo, o designer manteve quase sem alterações;

Em HSIEN-SHUN LIAO *et al.* (2019) atividade de mapeamento do AFM é empregue qualidades mecânicas a nível de nanoescala.

Utilizando uma ponteira muito pequena a agilidade de medir é muito benéfica.

Contudo, um sistema de leitura distinta é primordial para identificar a deflexão da microviga.

Segundo AMENEH JAVIDJAM *et al.* (2019) a rugosidade aparente é uma porção que surge ao desenrolar de um segmento de análise.

Empregando retrato de fase, diagramas de bifurcação, mapas de Poincaré e o expoente máximo de Lyapunov, onde os resultados mostraram que a taxa de frequência de excitação pode operar uma conduta periódica, sub-harmônico e caótico no sistema sob certas circunstâncias.

Um controlador da derivada proporcional foi usado para controlar caos, e a otimização de partículas foi usada para achar os parâmetros das derivadas proporcionais.

Em HSIEH *et al.* (2018) caminhos de planos de fase, análise de espectro, e outros métodos de análise numérica foram introduzidos para averiguar a dinâmica do sistema junto com as equações diferenciais.

O Sistema demonstrará comportamento não linear, foram empregados como apoio ao controle não linear a vibração causada no AFM, um controlador Fuzzy foi ajustado para igualar respostas obtidas.

Em HAGHIGHATNIA *et al.* (2019) um controlador de modos deslizantes usando ordem fracionária é apresentado para controlar o Sistema caótico do AFM onde foi verificado as incertezas e perdas.

Um controlador que usa ordem fracionária é colocada e o controle é comprovado por meio de Lyapunov baseada em derivada de ordem fracionária, os efeitos da

simulação exibem ganhos do controlador, com velocidade de convergência veloz, alta precisão e robustez contra imprecisões e perdas.

Com ALIASGHAR *et al.* (2017) aplicando o modo intermitente no AFM foi usado um atual modelo matemático baseado no cálculo das médias.

Experiências e pesquisas numéricas tem apresentado caos no AFM diminuindo a velocidade de obter imagens.

Ajustou um controlador no AFM para ficar rápido, onde o Sistema exibiu comportamento caótico.

CAPÍTULO 3

3.PROJETO DE CONTROLE NÃO LINEAR APLICADO NA SUPRESSÃO DO COMPORTAMENTO CAÓTICO DO AFM

Foram usados os métodos de controle no trabalho, cuja a finalidade foi de transformar o movimento caótico em periódico porque o movimento caótico danifica a figura otida no AFM.

3.1.CONTROLE REALIMENTADO LINEAR ÓTIMO (OLFC).

As técnicas do OLFC, foram desenvolvidos para serem empregues em Sistemas lineares, e em Sistemas que exibem a dinâmica não linear especificamente como exemplo em SINHA *et al.* (2000), RAFIKOV e BALTAZAR (2008), RAFIKOV *et al.* (2008).

Concordando com RAFIKOV E BALTHAZAR (2008), a execução do método do controle realimentado linear ótimo em Sistemas não lineares são exibidos à clareza do formato e da realização do controle.

O controle é baseado na idéia da estabilidade de Lyapunov próximo ao OLFC.

Observando o Sistema da Eq. (3.11) como não sendo linear e controlável (RAFIKOV e BALTHAZAR, 2008):

$$\dot{x} = Ax + g(x) + u \quad (3.11)$$

Procedendo que $x \in R^n$ é um vetor de estado $A \in R^{n \times n}$ é a matriz de estados feita através de formas lineares e $u \in R^m$ é o vetor de controle, e $g(x)$ é um vetor de funções contínuas não linear.

O propósito é estabelecer uma regra que controle u e que segua o Sistema sob ação de forças externas a um estado esperado.

O vetor de controle abrange em duas partes:

$$\mathbf{U} = \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{u}_t \quad (3.12)$$

Em que $\tilde{\mathbf{u}}$ é o termo realimentado que pode ser repetido na próxima forma:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{x}}^* - \mathbf{A}\mathbf{x}^* - \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) \quad (3.13)$$

No qual o $\dot{\mathbf{x}}^*$ é o estado de estabilidade esperado e $\mathbf{u}_f$ é o controle realimentado linear e logo:

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3.14)$$

Deste modo $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ é uma matriz contínua e estabelecendo o erro do seguimento dos estados tal como:

$$\mathbf{u} = \mathbf{x} - \dot{\mathbf{x}} \quad (3.15)$$

Junto com o desvio da trajetória do Sistema Eq. (3.11) do estado esperado, e prosseguindo nas Eqs. (3.13), (3.14) e (3.15) é capaz de conseguir a próxima equação:

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{g}(\dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3.16)$$

A parte não-linear do Sistema Eq. (3.16) tornar-se a escrita de outro jeito:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(\mathbf{x}^*)(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \quad (3.17)$$

Existindo $\mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^*)$ uma matriz limitada, onde os princípios consistem de $\mathbf{y}, \mathbf{x}^*$ e considerando Eq. (3.17), o Sistema Eq. (3.16) obtém a imediata forma:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^*)\mathbf{y} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3.18)$$

Teorema. Existindo as matrizes $\mathbf{Q}$ e $\mathbf{R}$, fixas sendo positivas, e $\mathbf{Q}^*$ é simétrica, onde a matriz (CHAVARETTE *et al.*, 2007):

$$\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q} - \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{x})\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \quad (3.19)$$

Seja positiva, no qual a matriz $\mathbf{P}$ é o resultado da próxima equação diferencial matricial de Riccati:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (3.20)$$

Com o estado final:

$$\mathbf{P}(\mathbf{t}_f) = \mathbf{0} \quad (3.21)$$

E no caso de $t \rightarrow \infty$ e as matrizes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{Q}$ e $\mathbf{R}$, existem matrizes com elementos contínuos, a matriz fixa positiva é o resultado da equação reduzida de Riccati.

$$PA + A^T - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \quad (3.22)$$

Logo o controle realimentado linear seria:

$$u = -R^{-1}B^TPy \quad (3.23)$$

É ótimo e conduz o Sistema não linear Eq. (3.16) de algum estado iniciativo, ao último estado:

$$y(t_f) = 0 \quad (3.24)$$

Para o controle realimentado da Eq.(3.23), mantém um lugar onde $\Gamma_0 \subset \Gamma$, $\Gamma \subset \mathbb{R}^n$ do local do início tanto se $y_0 \in \Gamma_0$ a solução $y(t) = 0, t \geq 0$ do sistema controlado Eq. (3.18) tem imobilidade assintoticamente local, e: $J = \min = y^T P(0)y$.

Completando, se $\Gamma = \mathbb{R}^n$ logo a resposta $y(t) = 0, t \geq 0$ do Sistema controlado Eq. (3.18) é absolutamente e assintoticamente consistente.

3.2.CONTROLE DA EQUAÇÃO DE RICCATI DE DEPENDÊNCIA DE ESTADO (STATE DEPENDENT RICCATI EQUATION (SDRE))

O Sistema dinâmico estabelecido através de $\dot{x} = A(x) + g(x) + u$ é capaz de parametrizar uma equação diferencial de primeira ordem e colocar imediatamente a forma:

$$\dot{x} = A(x) + g(x) + u \quad (3.25)$$

$$y = S(x)x \quad (3.26)$$

Nas quais o vetor $\dot{x}^T$ simboliza as condições do Sistema e depende do tempo, e o vetor de derivadas primeiras das condições $u \in U \in R$ é a função controle U é a força empregada no controle.

O Sistema da Eq. (3.26) retrata o problema do controle de Sistemas não lineares. O estado x^T e o controle u são dados pelos elementos:

$$f(x) = A(x)x, b(x) = B(x) \text{ e } d(x) = S(x)x \text{ (SHAWKY et al., 2007).}$$

Supõe que $f(0) = 0$ o que ocasiona o início que é um sinal de estabilidade. O custo operacional a ser diminuído pelo meio do controle SDRE, é entregue por:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [x^T Q(x)x + u^T R(x)u] dt \quad (3.27)$$

Tratando-se $Q(x)$ é uma matriz assim sendo positiva ou semi-definida positiva e $R(x)$ sendo positiva.

O controle por realimentação de condições usando o controle SDRE é transferido por:

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)P(x)x = -Kx \quad (3.28)$$

Tornando-se a matriz $P(x)$ a adaptação da equação de Riccati dependente dos estados ofertada por:

$$A^T(x)P(x) + P(x)A(x) - P(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)P(x) + Q(x) = 0 \quad (3.29)$$

De acordo com MRACEK e CLOUTIER (1998), no local em relação ao começo o método SDRE afirma um recurso assintoticamente regular em um ciclo fixo.

Na situação de um escalar, o recurso SDRE alcança a recurso ótimo para o funcional, equivalentemente Q e R são funções de x.

O controle SDRE agrada o primeiro e o segundo estado indispensável da otimalidade $H_u = 0$.

Diante disso o Hamiltoniano para o controle realimentado linear ótimo é:

$$H(x, \mu, \lambda) = \frac{1}{2} x^T Q x + u^T R u + \lambda^T (A(x)x + B(x)u) \quad (3.30)$$

As exigências essenciais para o controle realimentado linear ótimo são BANKS *et al.*, (2007):

$$\begin{aligned} \lambda &= -Qx - \frac{1}{2} \left[\partial \left(\frac{A(x)x}{\partial x} \right)^T \lambda - \left[\frac{\partial(B(x)u)}{\partial x} \right]^T \lambda \right. \\ x &= A(x) + B(x)u \\ 0 &= Ru + B(x)\lambda \end{aligned} \quad (3.31)$$

Existindo:

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)\lambda \quad (3.32)$$

Estimando um estado perto, consta que:

$$\lambda = P(x)x \quad (3.33)$$

Assumindo Eq. (3.31) em Eq. (3.32) consegue o controle SDRE Eq. (3.27).

O método de controle SDRE para atingir o recurso ótimo para o problema dinâmico de controle, possui o imediato método (SHAWKY, 2007):

Passo 1. Determinar o espaço de estado da amostra e parametrizar a amostra na maneira de coeficientes sujeito ao estado;

Passo 2. Mensuração do estado do Sistema $x(t)$ quer dizer determinar $x(0) = x_0$ e decidir os elementos das matrizes Q e R ;

Passo 3. Determinar a Eq. (3.28) para a condição $x(t)$;

Passo 4. Determinar o sinal da passagem da Eq. (3.27);

Passo 5. Atribuir a medida de partida do Sistema Eq. (3.25) do modo que uma atual quantia inicial e renovar o estado do Sistema $x(t)$ retornar para o passo 3 e retomar o método ainda que a técnica de interrupção estabelecido seja obtido.

A contrariedade do controle OLFC para o controle SDRE consegue ser desenvolvido de outra forma reduzindo o funcional:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [y^T Q(y)y + u^T R(y)u] dt \quad (3.34)$$

Em $y = Ay + Bu, y(0) = y_0, y(\infty) = 0$ no qual o vetor $y = [x - \tilde{x}]$.

Onde os requisitos iniciais $x(t_0) = x_0$ no entanto para cada vizinhança do estado $y(t)$ assim seja conseguido uma inovação da situação preliminar o fundamento da realimentação das condições junto com o controle.

CAPÍTULO 4

4.1.MODELAGEM MATEMÁTICA DO AFM

Fica a obrigação de atingir uma compreensão dos modelos matemáticos que simbolizam o modo intermitente e a produção de imagens que são obtidas em conformidade com a característica do modelo matemático e das formas nos métodos de controle.

Neste contexto, foram usados dois fatos em que a amostra está submersa em um meio hidrodinâmico e estabeleceu as forças de Van der Waals, o primeiro foi aplicado no modo intermitente e o segundo foi usado para o modo não contato, que são observados no decorrer deste assunto.

4.2.MODELO MATEMÁTICO PARA O MODO INTERMITENTE CONSIDERANDO-SE A FORÇA ATRATIVA E REPULSIVA DE VAN DER WAALS E AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO

Na Figura 4.11 constata-se o protótipo da microviga aplicando o modo intermitente no AFM.

O suporte da microviga é excitada por um atuador piezoelétrico constituindo um deslocamento $f \cos(wt)$.

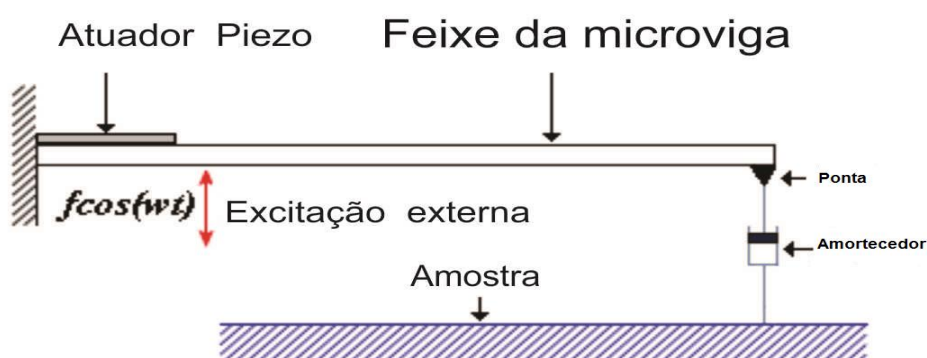


FIGURA 4.11: MODELO DE UM AFM

FONTE: BALTHAZAR ET AL., (2012A, 2013)

Em concordância com BALTHAZAR *et al.* (2012a, 2013), no qual conceitua somente o primeiro modo de vibrar, o raio de ação do AFM consegue ser modelado tal como um sistema massa-mola-amortecedor, de acordo com a Figura 4.11.

A ponteira referenciado como se existisse uma esfera de raio R , e o intervalo entre a amostra e a microviga por Z_0 que é o espaço no meio da posição de equilíbrio da microviga e a amostra, no qual só a gravidade opera sobre ela. O lugar da microviga é dada por x calculado a partir da posição de equilíbrio.

Considerando o modelo do AFM a microviga está trepidando perto da superfície da amostra, sendo incluído o F_u que simboliza a robustez de controle que é capaz de ser colocada para monitorar a transferência da microviga.

A união com a ponta da microviga e a superfície da amostra pode se transformar na relação entre uma esfera e um superfície plana.

Onde esta relação torna – se como:

$$U(x, z_0) = \frac{A_1 R}{1260(z_0 + x)^7} - \frac{A_2 R}{6(z_0 + x)} \quad (4.10)$$

Existindo $U(x, z_0)$ a potencialidade de Lennard-Jones, na qual A_1 é a continuidade de Hamaker para a potencialidade atrativo e A_2 é contínuo de Hamaker para o potencial desprezível.

Em que $A_1 = \pi^2 \rho_1 \rho_2 c_1$ e $A_2 = \pi^2 \rho_1 \rho_2 c_2$, ficando ρ_1 e ρ_2 a densidade dos componentes que estão compartilhando e c_1 e c_2 são contínuos do contato.

Em que a microviga está junto da amostra, além da potência da mola foi acrescentado a força atrativa de Van der Waals que é correspondente ao inverso do quadrado da distância entre a ponteira da microviga e a amostra, e a força de repulsão é similar a oitava potência inversa da distância entre a ponteira e a amostra.

Essas forças podem ser exibidas como o total das forças atrativas e repulsivas, que são indicadas por BALTHAZAR *et al.* (2012a, 2013):

$$F = -\frac{\partial U}{\partial(x+z_0)} = \frac{A_1 R}{180(z_0+x)^8} - \frac{A_2 R}{6(z_0+x)^2} \quad (4.11)$$

Entretanto a técnica do AFM que age no modo intermitente, a microviga é oferecido através de uma força harmônica $f \cos w t$ e o contato da ponteira e amostra constitui a força F e a sonda chega a tocar a superfície da amostra no ponto de máxima dimensão da amplitude do balanço.

O modo contato entre a ponteira e a amostra é bastante frágil, sendo este modo de operação indicado para amostras delicadas. Usando o Lagrangeano:

$$L = T - V \quad (4.12)$$

Encontrando-se a energia cinética (T) e a energia potencial gravitacional (V), nessa ordem do Sistema. Equações do deslocamento para a coordenada x :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (4.13)$$

Em que: Q_i são as forças não-conservativas.

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 \quad (4.14)$$

$$V = \frac{1}{2} k_l x^2 + \frac{1}{4} k_{nl} x^4 \quad (4.15)$$

$$Q_i = F + c \dot{x} + c_s \dot{x} + f \cos w t \quad (4.16)$$

De acordo com BALTHAZAR *et al.* (2012a, 2013):

$$c_s \dot{x} = \frac{\mu_{eff} B^3 L}{(x+z_0)^3} \dot{x} \quad (4.17)$$

Em que μ_{eff} é uma constante de viscosidade efetiva, B a largura da microviga e L o comprimento da microviga. Usando na Eq. (4.13) em Eqs. (4.14), (4.15) e (4.16) adquire –se:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_l x + k_{nl} x^3 = \frac{A_1 R}{180(z_0+x)^8} - \frac{A_2 R}{6(z_0+x)^2} + \frac{\mu_{eff} B^3 L}{(x+z_0)^3} \dot{x} + f \cos w t \quad (4.18)$$

Achando x o deslocamento da ponteira da microviga tendo em vista a posição de equilíbrio na ausência de forças externas $\dot{x}$ a velocidade de deslocamento $\ddot{x}$ a aceleração e m a massa da microviga e k_l o coeficiente de rigidez linear da mola no qual k_{nl} o coeficiente de rigidez não-linear da mola e c o coeficiente de amortecimento, indicando:

$$Z_s = \left(\frac{2}{3}\right) (2D)^{1/3} \quad (4.19)$$

Fazendo as imediatas mudanças em Eq. (4.18):

$$\tau = w_1 t, y = \frac{x}{z_s}, y = \frac{x}{z_s}, y = \frac{x}{z_s}, \dot{y} = \frac{\dot{x}}{w_1 z_s}, a = \frac{z_0}{z_s}, b = \frac{K_l}{K_{at}}, c = \frac{K_{nl}}{K_{at}} z_s^2,$$

$$d = \frac{4}{27}, e = \frac{2}{405} \left(\frac{a}{z_s}\right), g = \frac{f_0}{k_{at} z_s}, p = \frac{\mu_{eff} B^3 L}{m w_1 z_s^3}, \omega = \frac{w}{w_1}, r = \frac{1}{Q}$$

Em que $x_1 = y$ e $x_2 = \dot{y}$

Segundo TUSSET *et al.* (2017) é capaz de aplicar as derivadas de ordem fracionária com o objetivo de simbolizar o amortecimento hidrodinâmico $\left(-\frac{p}{(a+x_1)^3}x_2\right)$, desse modo o Sistema da Eq. (3,13) é capaz de ser representado por ordem fracionária na imediata forma abaixo (4.22):

$$\begin{aligned}\frac{d^{q_1}u_1}{dT^{q_1}} &= x_2 \\ \frac{d^{q_2}x_2}{dT^{q_2}} &= -rx_2 - bx_1 - cx_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + \frac{e}{(a+x_1)^8} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_2}x_3}{dT^{q_3}} \\ \frac{d^{q_3}x_3}{dT^{q_3}} &= x_2\end{aligned}\tag{4.22}$$

Na qual $0 < q_1, q_2, q_3 \leq 1$ é a regra da derivada fracionária e representado por:

$$q = (q_1, q_2, q_3).$$

4.3.MODELO MATEMÁTICO PARA O MODO NÃO CONTATO CONSIDERANDO-SE APENAS A FORÇA ATRATIVA DE VAN DER WAALS E AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO

Em concordância com NOZAKI *et al.* (2013) e WANG *et al.* (2009) o modelo matemático e a relação com a microviga e a amostra no modo não contato no AFM, pé capaz de ser formulado como é demonstrado na Figura 4.21.

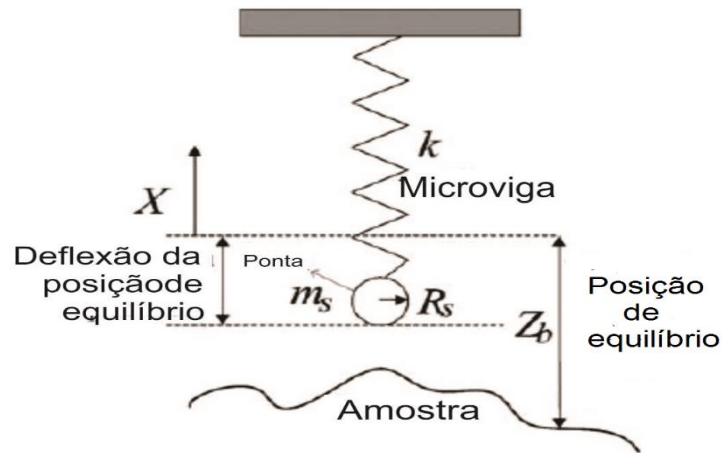


FIGURA 4.21: MODELO DE UM AFM.

FONTE: NOZAKI *et al.*, (2013) E WANG *et al.*, (2009).

Na microviga é formado com um sistema massa-mola, com uma constante k da mola e da massa equivalente m .

Moldando o Sistema por uma esfera de raio R e massa m interrompida por uma mola de rigidez K .

Desse modo, a potencialidade em direção ao conjunto da amostra e a esfera é dado por intermédio de:

$$P(X, Z) = -\frac{A_c R_c}{6(Z_b + X)} + \frac{1}{2} k_s X^2 \quad (4.23)$$

A força do Sistema calculado na massa da microviga é transferido por $E(X, X', Z)$ existindo:

$$E(X, X', Z) = \frac{1}{2} X'^2 + \frac{1}{2} \omega_s^2 X^2 - \frac{D \omega_s^2}{(Z_b - X)} \quad (4.24)$$

Continuando $X_1 = X$ e $X_2 = X'$ a ponteira e a amostra é entregue mediante a Eq.(4.25):

$$\begin{aligned} X'_1 &= \frac{\partial E}{\partial X_2} \\ X'_2 &= -\frac{\partial E}{\partial X_1} \end{aligned} \quad (4.25)$$

O Sistema descreve a operação do AFM na Figura 4.21, é conseguida com apoio no modelo proposto por WANG *et al.*, (2009). Prosseguindo Eq. (4.23) e Eq. (4.24) em Eq. (4.25):

$$\begin{aligned} X_1' &= X_2 \\ X_2' &= -\omega_s^2 X_1 - \frac{D\omega_s^2}{(Z_b - X_1)^2} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Em que Z_b é o espaço da posição de equilíbrio e a amostra, D é o diâmetro molecular: $D = \frac{A_H R}{6k}$ e A_h é a continuidade de Hamaker e R é o raio da esfera que retrata a ponteira da microviga, observando somente a força atrativa de Van der Waals e que a microviga é excitado por uma força $mf \cos(wt)$ e w simboliza a periodicidade natural do Sistema, e a constante do amortecimento hidrodinâmico:

$$c_s X_2' = \frac{\mu_{eff} B^3 L}{(X_1 + z_0)^3} X_2' \quad (4.27)$$

O Sistema de equações diferenciais é capaz de ser escrito tal como:

$$X_1' = X_2$$

$$X_2' = -\omega_s^2 X_1 - \frac{D\omega_s^2}{(z_b - X_1)^2} - f \cos w t - \varphi X_2 - \frac{\mu_{eff} B^3 L}{(X_1 + z_0)^3} X_2' \quad (4.28)$$

Na qual φX_2 simboliza a força de amortecimento e pode ser indicada como:

$$\varphi X_2 = (a_4 \cos b - a_5 X_2).$$

Fazendo as seguintes trocas:

$$x_1 = \frac{X_1}{z_s} x_2 = \frac{X_2}{\omega_s z_s}, z = \frac{z_b}{z_s}, z_s = \frac{3}{2} (2D)^{\frac{1}{3}}, \tau = wt, \alpha = \frac{a_1}{(1-a_3 a_5)}, b = \frac{a_1 a_2}{(1-a_3 a_5)},$$

$$\delta = \frac{a_3 a_4}{(1-a_3 a_5)}, a = \frac{z_0}{z_s}, p = \frac{\mu_{eff} B^3 L}{m w_1 z_s^3}$$

O Sistema é capaz de ser reproduzido na seguinte forma adimensional:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\alpha a_1 x_1 - \alpha a_2 x_1^3 - \frac{b}{(z+x_1)^2} - \frac{p}{(a+x_1)^3} x_2 + \delta \sin \tau \quad (4.29)$$

Em conformidade com TUSSET *et al.*, (2017) assim como para o modo intermitente e para o modo não contato pode-se utilizar as derivadas em ordem fracionária para representar o amortecimento hidrodinâmico $(-\frac{p}{(a+x_1)^3} x_2)$, assim o Sistema pode ser exibido em ordem fracionária na seguinte forma:

$$\frac{d^{q_1} x_1}{dT^{q_1}} = x_2$$

$$\frac{d^{q_2} x_2}{dT^{q_2}} = -r x_2 - c x_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_2} x_3}{dT^{q_3}}$$

$$\frac{d^{q_3} x_3}{dT^{q_3}} = x_2 \quad (4.30)$$

Onde $0 < q_1, q_2, q_3 \leq 1$, é a ordem da derivada fracionária e denotado por:

$$q = (q_1, q_2, q_3).$$

CAPÍTULO 5

Foi usado um projeto de controle sem usar a ordem fracionária não gerando muito efeito junto com a inclusão do controle F_u que foi verificado nos resultados obtidos.

5.1.PROJETO DE CONTROLE PARA O SISTEMA AFM COM COMPORTAMENTO CAÓTICO.

Empregando o modelo (4.21) com a injeção do controle F_u usado na Eq. (5.10) usamos:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -rx_2 - bx_1 - cx_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + \frac{e}{(a+x_1)^8} + g \cos \Omega t - \frac{p}{(a+x_1)^3} x_2 + F_u\end{aligned}\quad (5.10)$$

Produsindo a órbita periódica como a função de $\tilde{x}(t)$ dessa maneira é alcançado a próxima equação:

$$\ddot{\tilde{y}} = -r\dot{\tilde{y}} - b\tilde{y} - \tilde{c}^3 - \frac{d}{(a+\tilde{y})^3} \dot{\tilde{y}} + \tilde{u}\quad (5.11)$$

Satisfazendo $\tilde{u}$ o controle que mantém o Sistema no caminho esperado, a função $\tilde{x}(t)$ é a solução de (nu), sem o resultado de controle F_u então $\tilde{u} = 0$.

E a equação $\tilde{y}$ mantém-se:

$$\tilde{y} = a_0 + a_1 \cos(\Omega\tau) + b_1 \sin(\Omega\tau) + a_2 \cos(2\Omega\tau) + b_2 \sin(2\Omega\tau) + \dots\quad (5.12)$$

O controle realimentado $\tilde{u}$ permanece:

$$\tilde{u} = \ddot{\tilde{y}} + r\dot{\tilde{y}} + b\tilde{y} + c\tilde{y}^3 + \frac{d}{(a+\tilde{y})^2} \dot{\tilde{y}} - \frac{e}{(a+\tilde{y})^8} - g \cos \Omega\tau + \frac{p}{(a+\tilde{y})^3} \tilde{y}\quad (5.13)$$

Tomando a Eq. (5.11) em Eq. (5.10) e gerando os desvios da trajetória desejada incluímos:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} x_1 - \tilde{x}_1 \\ x_2 - \tilde{x}_2 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

O Sistema Eq. (5.10) é exibido:

$$\dot{e}_1 = e_2$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & -re_2 - be_1 - c(e_1 + \tilde{x}_1)^3 + c\tilde{x}_1^3 - \frac{d}{(a + e_1 + x_1)^2} + \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} + \\ & \frac{e}{(a + e_1 + \tilde{x}_1)^8} - \frac{e}{(a + \tilde{x}_1)^8} - \frac{p(e_2 + \tilde{x}_2)}{(a + e_1 + \tilde{x}_1)^3} + \frac{p\tilde{x}_2}{(a + \tilde{x}_1)^3} + \mathbf{u} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Onde $\mathbf{u} = \mathbf{F}_u - \tilde{\mathbf{u}}$ o controle realimentado e $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{e}$ e o Sistema Eq. (5.15) é exibido com desvios:

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{g}(\dot{\mathbf{x}}) - \mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5.16)$$

Onde em particular não foi linearizado o Sistema Eq. (5.16) é mostrado da seguinte forma:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) \quad (5.17)$$

O Sistema Eq. (5.16) é exposto na seguinte forma:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{G}(\dot{\mathbf{e}}, \tilde{\mathbf{x}}) \mathbf{e} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5.18)$$

Exibindo o Sistema Eq. (5.15) na forma Eq. (5.16):

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{b} & -\mathbf{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}}) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) =$$

$$-c[(e_1 + \tilde{x}_1)^3 - \tilde{x}_1^3] - \frac{d}{(a + e_1 + \tilde{x}_1)^2} + \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} + \frac{e}{(a + e_1 + \tilde{x}_1)^3} - \frac{e}{(a + \tilde{x}_1)^3} - \frac{p(e_2 + \tilde{x}_2)}{(a + e_1 + \tilde{x}_1)^3} + \frac{p\tilde{x}_2}{(a + \tilde{x}_1)^3}$$

$$(5.20)$$

Verificando o caminho esperado junto com a órbita que apresenta regularidade, com dimensão menor que (a) :

$$\tilde{x} = 1.3 \sin(t) \quad (5.21)$$

E os parâmetros:

$$\Omega = 1; r = 0.1; b = 0.05; c = 0.35; d = \frac{4}{27}; e = 0.0001; g = 0.2; p = 0.005 \text{ e}$$

$$a = 1.6$$

As matrizes são exibidas por A e B:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0.05 & -0.1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Exibindo:

$$Q = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix}, \quad R = [1] \quad (5.23)$$

Manipulando o comando lqr do matlab^r chega:

$$p = \begin{pmatrix} 2.73 & 3.11 \\ 3.11 & 3.92 \end{pmatrix} \text{ e } K = [3.1127 \quad 3.9293] \quad (5.24)$$

Onde o controle é dado por:

$$u = -k_{11}e_1 - k_{12}e = -3.1127e_1 - 3.9293e_2 \quad (5.25)$$

A Figura 5.11, considerou o Sistema controlado na órbita Eq. (5.21).

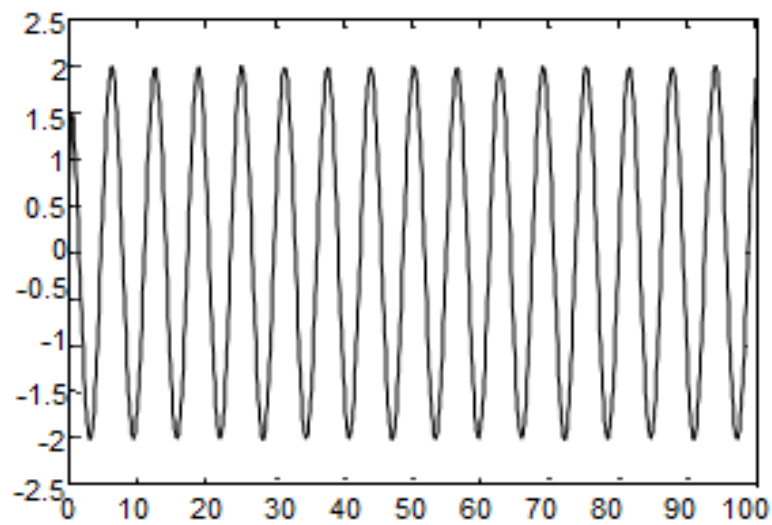


FIGURA 5.11: DESLOCAMENTO PARA O SISTEMA CONTROLADO

E a Figura 5.12, confirmou o confronto da transferência sem e com controle.

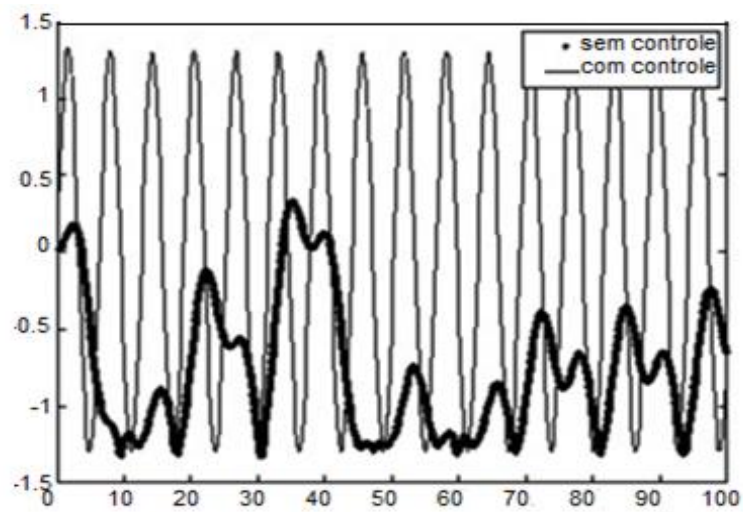


FIGURA 5.12: DESLOCAMENTO PARA O SISTEMA SEM E COM CONTROLE.

CAPÍTULO 6

Foram utilizados dois tipos de controle, o controle OLFC e o controle SDRE que foi aplicado no AFM onde colocou uma investigação de sensibilidade e robustez.

6.1.PROPOSTA DO CONTROLE OLFC PARA O AFM COM COMPORTAMENTO CAÓTICO

A finalidade é estabelecer um sinal de controle U , que acompanhe o Sistema de qualquer situação inicial $x(t_0) = x_0$ a um estado esperado $\tilde{x}$ onde $y(\infty) = 0$ e y é um vetor do erro $y = [x - \tilde{x}]$ de localização do Sistema, e reduza o funcional:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [y^T Q y + u^T R u] dt \quad (6.10)$$

6.2.PROJETO DE CONTROLE ÓTIMO PARA O MODO INTERMITENTE CONSIDERANDO A FORÇA ATRATIVA E REPULSIVA DE VAN DER WAALS E AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO

Análise da dinâmica do sistema para o caso de $u=0$.

Para as simulações numéricas serão considerados os parâmetros $\Omega = 1$, $r = 0.1$, $b = 0.05$, $c = 0.35$, $d = 4/27$, $e = 0.0001$, $g = 0.2$, $p = 0.005$, $a = 1.6$, $x_{10} = 0$ e $x_2 = 0$ obtidos de BALTHAZAR *et al.*, (2013).

Na Figura 6.21 podemos verificar a variação do teste 0-1 para variação da ordem da derivada de q_3 .

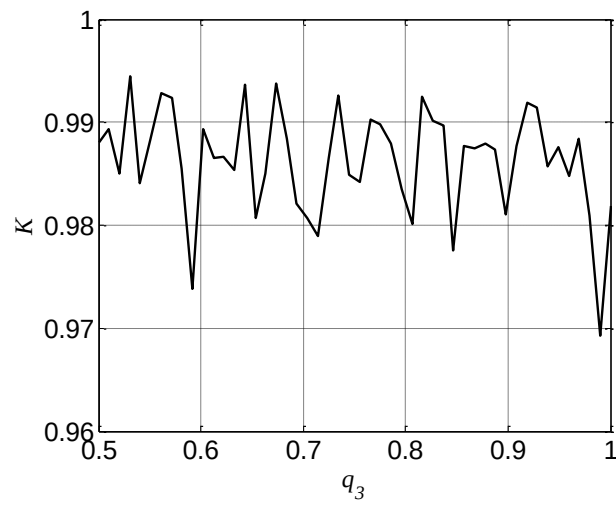
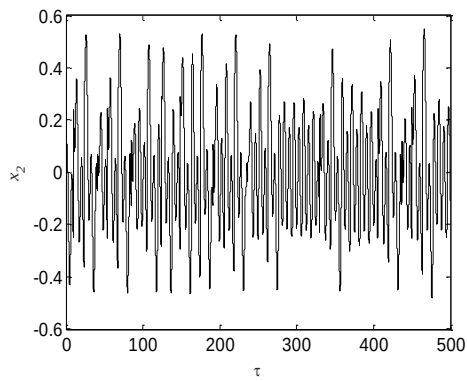
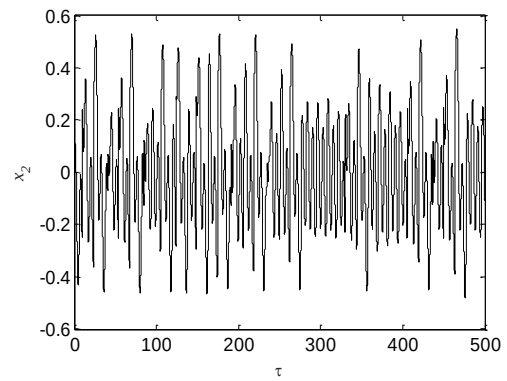


FIGURA 6.21: VARIAÇÃO DE K VERSUS A VARIAÇÃO DE $0.5 \leq q_3 \leq 1$.

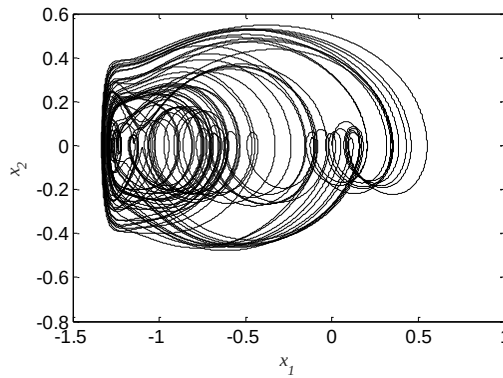
Para as simulações numéricas do controle será considerado a ordem das derivadas ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$). Na Figura 6.22 são apresentados o comportamento do sistema sem controle.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 6.22: HISTÓRICO DE TEMPO SEM CONTROLE, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$).

(A) DESLOCAMENTO. (B) VELOCIDADE. (C) DIAGRAMA DE FASE.

Usando a inclusão de um sinal de controle U na Eq. (5.10), conforme a Eq. (6.11):

$$\begin{aligned} \frac{d^{q_1} x_1}{dT^{q_1}} &= x_2 \\ \frac{d^{q_2} x_2}{dT^{q_2}} &= -rx_2 - bx_1 - cx_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + \frac{e}{(a+x_1)^8} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_2} x_3}{dT^{q_2}} + U \\ \frac{d^{q_3} x_3}{dT^{q_3}} &= x_2 \end{aligned} \quad (6.11)$$

6.3.PROJETO DE CONTROLE USANDO O CONTROLE OLFC

O sinal de controle U consiste de duas partes: $U = \tilde{u} + u$ onde $\tilde{u}$ é o controle realimentado e u é o controle OLFC que definindo como orbitas periódicas desejáveis o vetor: $[\tilde{x}_1(\tau) \quad \tilde{x}_2(\tau) \quad \tilde{x}_3(\tau)]^T$.

Se o vetor: $[\tilde{x}_1(\tau) \quad \tilde{x}_2(\tau) \quad \tilde{x}_3(\tau)]^T$ é a solução para o Sistema da Eq. (6.11) então $u = 0$ desta forma, o regime desejado é obtido pela seguinte Equação:

$$\begin{aligned}
\frac{d^{q_1} \tilde{x}_1}{dT^{q_1}} &= \tilde{x}_2 \\
\frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} &= -r\tilde{x}_2 - b\tilde{x}_1 - c\tilde{x}_1^3 - \frac{d}{(a+\tilde{x}_1)^2} + \frac{e}{(a+\tilde{x}_1)^8} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+\tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}} + U \\
\frac{d^{q_3} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}} &= \tilde{x}_2
\end{aligned} \tag{6.12}$$

Desse modo o controle realimentado $\tilde{u}$ é por meio de:

$$\tilde{u} = \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} + r\tilde{x}_2 + b\tilde{x}_1 + c\tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a+\tilde{x}_1)^2} - \frac{e}{(a+\tilde{x}_1)^8} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a+\tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}} \tag{6.13}$$

Substituindo em Eq. (6.13) na Eq. (6.11) e definindo o desvio da trajetória desejada como:

$$e = \begin{bmatrix} x_1 - \tilde{x}_1 \\ x_2 - \tilde{x}_2 \\ x_3 - \tilde{x}_3 \end{bmatrix} \tag{6.14}$$

Então o Sistema é capaz de ser representado de acordo com a Eq. (6.15):

$$\begin{aligned}
\frac{d^{q_1} e_1}{dT^{q_1}} &= e_2 \\
\frac{d^{q_2} e_2}{dT^{q_2}} &= -re_2 - be_1 - c(e_1 + \tilde{x}_1)^3 - \frac{d}{(a+e_1+\tilde{x}_1)^2} + \frac{e}{(a+e_1+\tilde{x}_1)^8} - \frac{p}{(a+e_1+\tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} (e_3 + \tilde{x}_3)}{dT^{q_3}} \\
&\quad + c\tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a+\tilde{x}_1)^2} - \frac{e}{(a+\tilde{x}_1)^8} + \frac{p}{(a+\tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}} + u \\
\frac{d^{q_3} e_3}{dT^{q_3}} &= e_2
\end{aligned} \tag{6.15}$$

O controle u , é capaz de ser achado por meio da próxima equação:

$$u = -R^{-1}B^T P e \quad (6.16)$$

Sendo P uma matriz simétrica e obtida da Equação Algébrica de Riccati (3.29).

Definindo as orbitas desejadas como $\tilde{x}_3 = x_3$ e $(\tilde{x}_1 = -0.5 + 0.5 \sin(0.98177\tau)$ e $\tilde{x}_2 = 0.4908 \cos(0.98177\tau))$.

Visto que a finalidade desta proposta é monitorar x_1 e x_2 , as variáveis x_3 será considerada apenas como distúrbios do sistema.

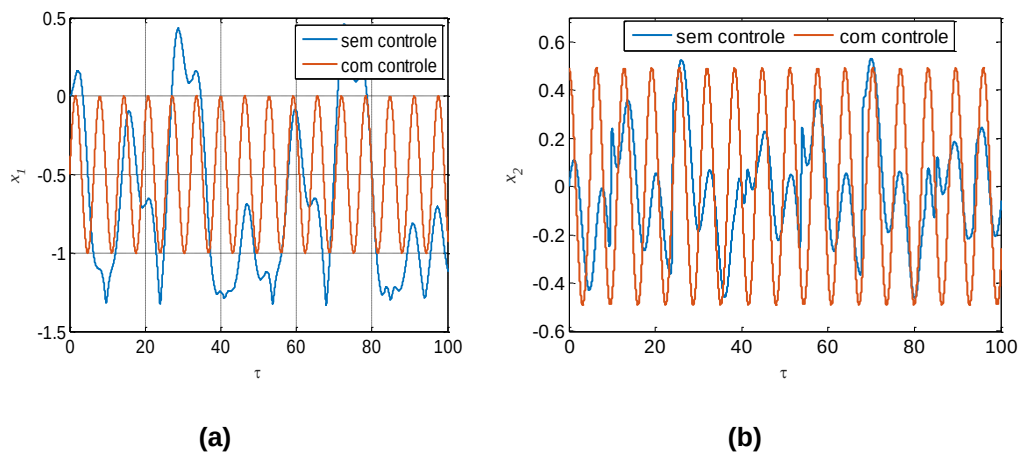
As matrizes A , B , Q e R são apresentadas abaixo:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b & -r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ e definindo: } Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}, R = [0.001]$$

Resolvendo a Eq. (6.17), consegue o controle realimentado u representado logo abaixo:

$$u = -999.95e_1 - 1000.89e_2 = -999.95[x_1 - \tilde{x}_1] - 1000.89[x_2 - \tilde{x}_2] \quad (6.17)$$

Na Figura 6.31, pode-se observar os resultados preliminares da proposta de controle considerando o controle $(U = \tilde{u} + u)$ com comportamento definido pela Figura 6.31.



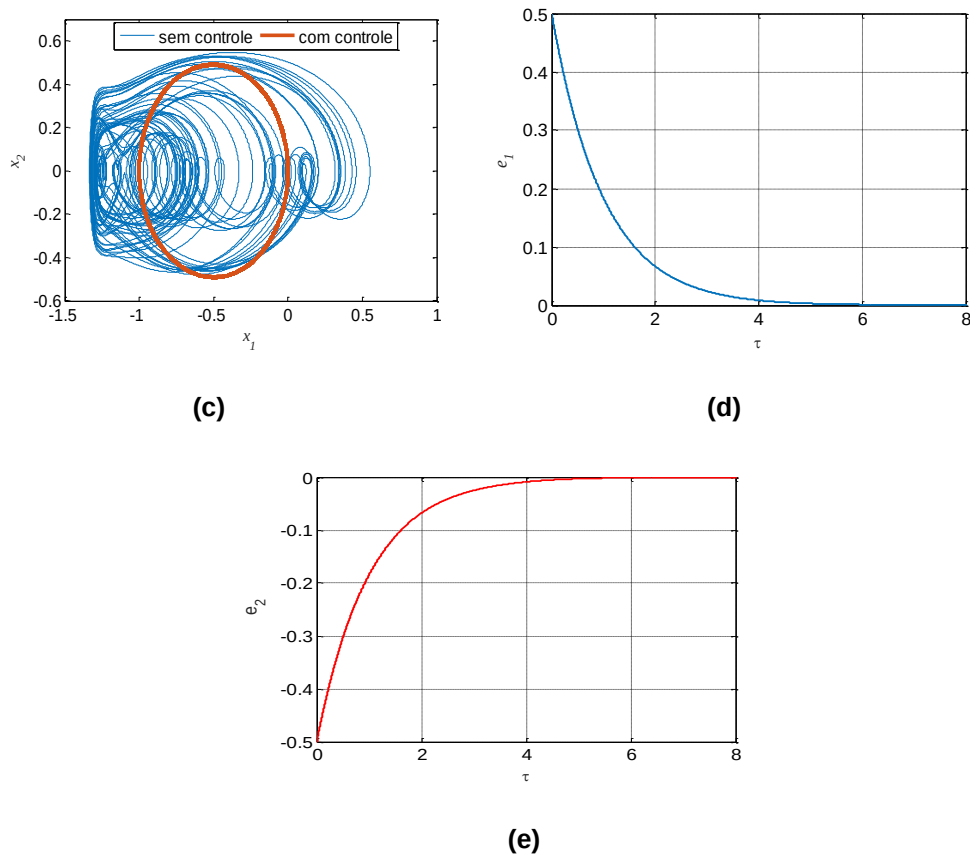


FIGURA 6.31 - HISTÓRICO DE TEMPO SEM E COM CONTROLE, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$).

(A) DESLOCAMENTO. (B) VELOCIDADE. (C) DIAGRAMA DE FASE. (D) ERRO e_1 . (E) ERRO e_2 .

6.4.PROJETO DE CONTROLE CONSIDERANDO O CONTROLE SDRE

O sinal de controle U consiste de duas partes: $U = \tilde{u} + u$, onde $\tilde{u}$ é o controle realimentado e u é o controle SDRE que definindo como órbitas periódicas desejáveis

o vetor: $[\tilde{x}_1(\tau) \quad \tilde{x}_2(\tau) \quad \tilde{x}_3(\tau)]^T$.

Se o vetor: $[\tilde{x}_1(\tau) \quad \tilde{x}_2(\tau) \quad \tilde{x}_3(\tau)]^T$ é a resposta do Sistema da Eq. (6.12) então $u = 0$. Desta forma, o regime desejado é obtido pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \frac{d^{q_1} \tilde{x}_1}{dT^{q_1}} &= \tilde{x}_2 \\ \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} &= -r \tilde{x}_2 - b \tilde{x}_1 - c \tilde{x}_1^3 - \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} + \frac{e}{(a + \tilde{x}_1)^8} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a + \tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} \tilde{x}_3}{dT^{q_2}} + U \\ \frac{d^{q_3} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}} &= \tilde{x}_2 \end{aligned} \quad (6.18)$$

Assim o controle realimentado $\tilde{u}$ é dado por:

$$\tilde{u} = \frac{d}{(a+\tilde{x}_1)^2} - \frac{e}{(a+\tilde{x}_1)^8} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a+\tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} x_3}{dT^{q_3}} \quad (6.19)$$

Substituindo a Eq. (6.20) na Eq. (6.12) e definindo o desvio da trajetória desejada como:

$$e = \begin{bmatrix} x_1 - \tilde{x}_1 \\ x_2 - \tilde{x}_2 \\ x_3 - \tilde{x}_3 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Logo a Eq.(6.21) é mostrado abaixo:

$$\begin{aligned} \frac{d^{q_1} e_1}{dT^{q_1}} &= e_2 \\ \frac{d^{q_2} e_2}{dT^{q_2}} &= -r e_2 - b e_1 - c(e_1 + \tilde{x}_1)^3 + u \\ \frac{d^{q_3} e_3}{dT^{q_3}} &= e_2 \end{aligned} \quad (6.21)$$

O controle u , pode ser encontrado da solução da seguinte equação:

$$u = -R^{-1} B^T P e \quad (6.22)$$

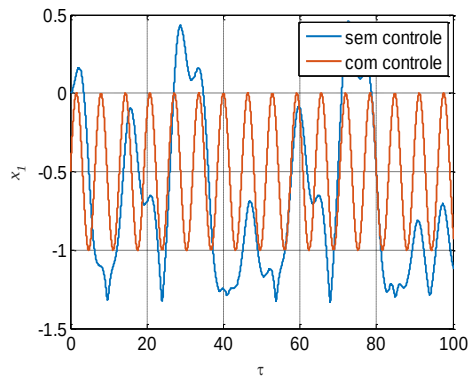
Sendo P uma matriz simétrica e obtida da Equação Algébrica de Riccati (3.29).

Definindo as orbitas desejadas como: $\tilde{x}_3 = x_3$, $(\tilde{x}_1 = -0.5 + 0.5 \sin(0.98177\tau))$
e $\tilde{x}_2 = 0.4908 \cos(0.98177\tau)$.

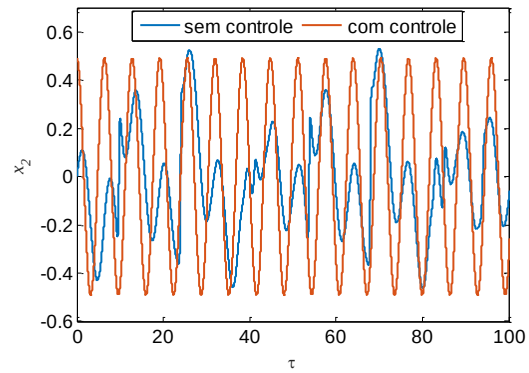
O objetivo é controlar x_1 e x_2 , e a variável x_3 será considerada apenas como distúrbios do Sistema e as matrizes A e B podem ser representadas na seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b - cx_1^2 & -r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ e definindo: } Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}, R = [0.001]$$

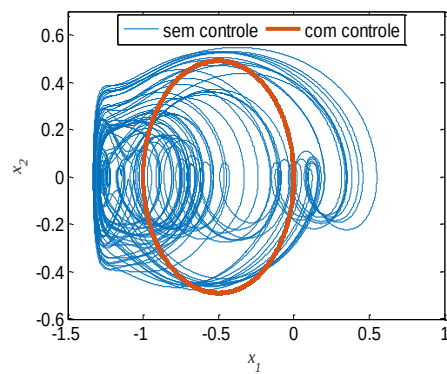
Na Figura 6.41, consideramos o controle usando o controle ($U = \tilde{u} + u$) com desempenho estabelecido na Figura 6.41.



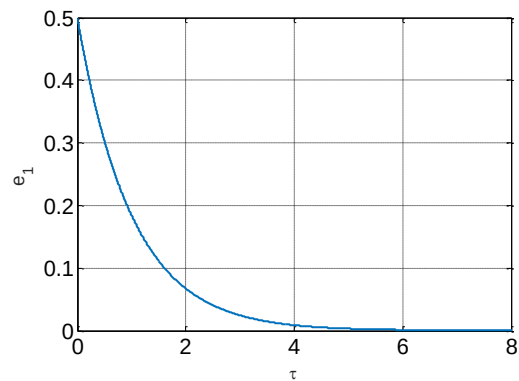
(a)



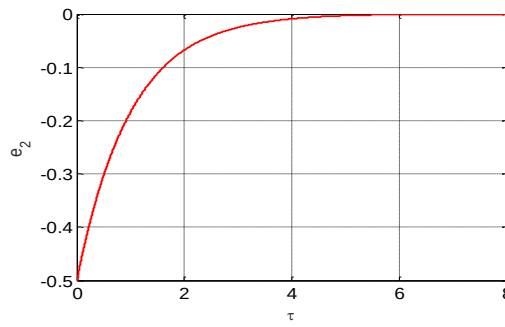
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 6.41: HISTÓRICO DE TEMPO SEM E COM CONTROLE, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.53$).(A) DESLOCAMENTO. (B) VELOCIDADE. (C) DIAGRAMA DE FASE. (D) ERRO E_1 . (E) ERRO E_2 .

6.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

A fim de determinar os efeitos das incertezas sobre o desempenho do controlador, estima-se que seja encontrado um erro nos parâmetros (Ω , r , c , d , e , g , p , a). Além de tudo, a alteração da derivada fracionária na robustez do controle apresentado passará a ser apontada.

Nas Figuras 6.51, 6.52 e 6.53, são a robustez do controle para manter o Sistema em órbita com periodicidade é examinada, usando o controle proposto com alteração nas medidas:

$$\begin{aligned} \Omega_u &= \Omega(0.8 + 0.4r(t)), r_u = r(0.8 + 0.4r(t)), b_u = b(0.8 + 0.4r(t)), c_u = c(0.8 + \\ 0.4r(t)), d_u &= d(0.8 + 0.4r(t)), e_u = e(0.8 + 0.4r(t)), g_u = g(0.8 + 0.4r(t)), \\ p_u &= p(0.8 + 0.4r(t)) \text{ e } a_u = a(0.8 + 0.4r(t)), \text{ onde } r(t) \text{ é um número arbitrário } r(t) = \\ &[0, 1]. \end{aligned}$$

Considerando as incertezas apenas no controle realimentado (u_r), com a matriz:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_u & -r_r \end{bmatrix}$$

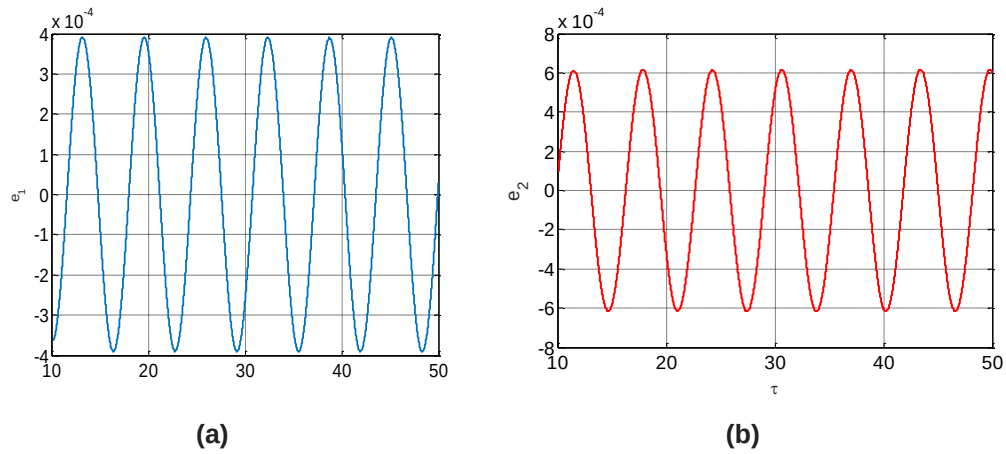


FIGURA 6.51: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

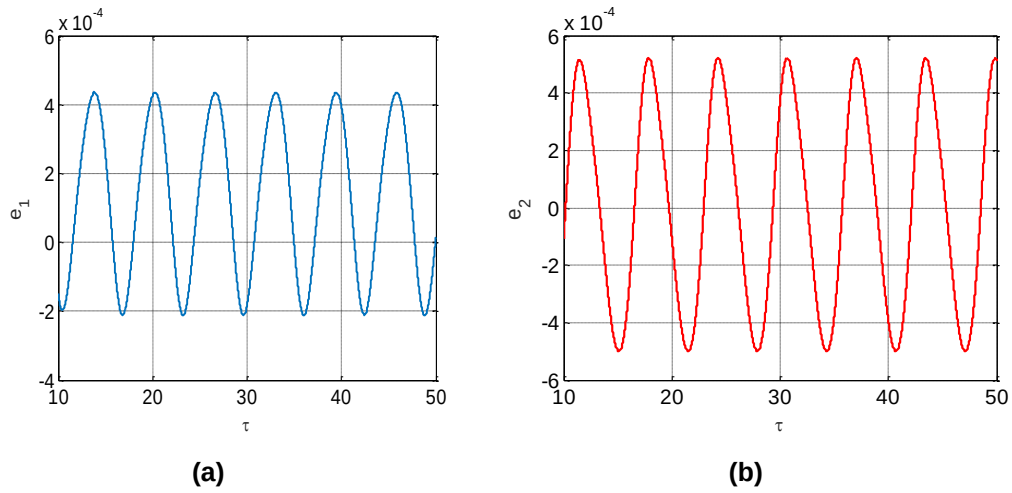


FIGURA 6.52: SDRE. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

Na Figura 6.53, é possível observar a robustez do controle em manter o Sistema equivalente na órbita obtida junto ao controle sem imprecisões, considerando as incertezas apenas no controle realimentado ($\tilde{u}$):

$$\tilde{u} = \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{d\tau^{q_2}} + r\tilde{x}_2 + b\tilde{x}_1 + c\tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a+\tilde{x}_1)^2} - \frac{e}{(a+\tilde{x}_1)^8} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a+\tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} \tilde{x}_3}{d\tau^{q_3}}$$

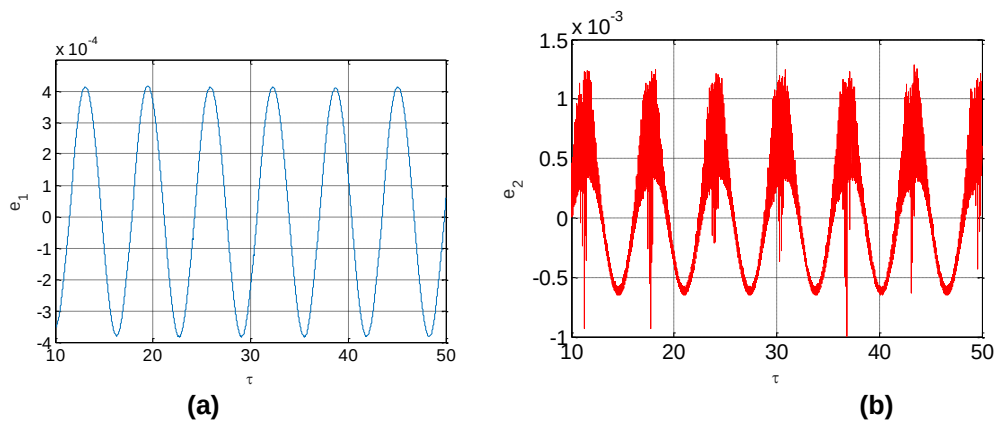


FIGURA 6.53: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

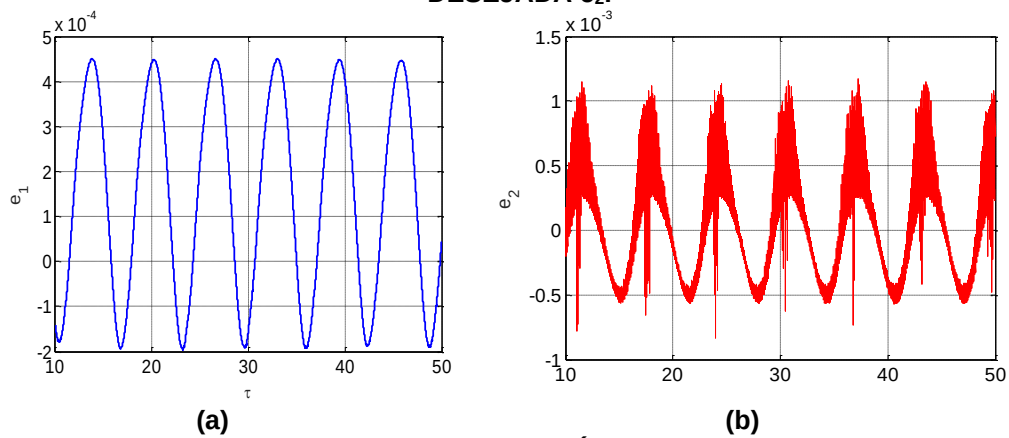


FIGURA 6.54: SDRE. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

Na Figura 6.52 verifica-se a energia do controle em preservar o Sistema na própria órbita atingida na companhia do controle com menas oscilações, o motivo das oscilações junto ao controle realimentado (u_r) e no controle realimentado ($\tilde{u}$), com o controle realimentado na forma abaixo:

$$\tilde{u} = \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} + r \tilde{x}_2 + b \tilde{x}_1 + c \tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} - \frac{e}{(a + \tilde{x}_1)^8} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a + \tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_2} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}}$$

e a matriz:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_u & -r_r \end{bmatrix}$$

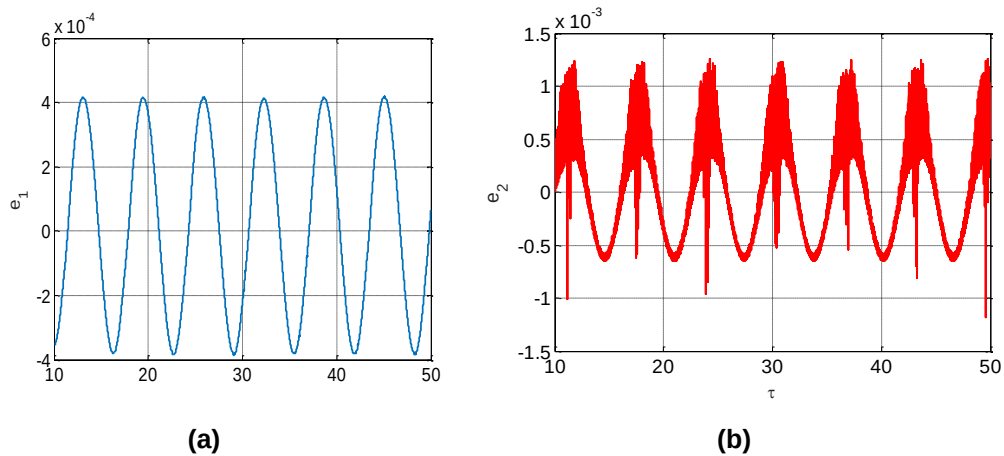


FIGURA 6.55: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

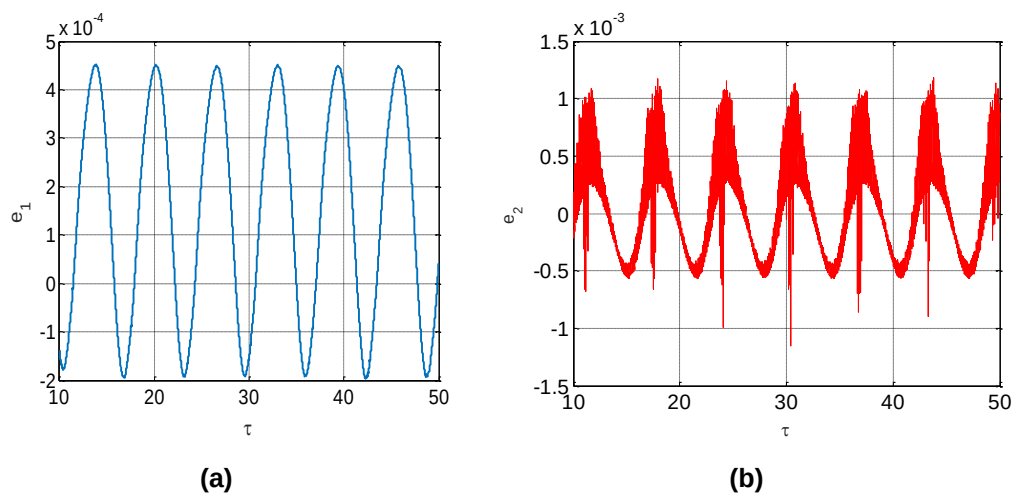


FIGURA 6.56: SDRE (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 E (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJA DA e_2 .

6.6.PROJETO DO CONTROLE REALIMENTADO LINEAR PARA O AFM COM FORÇA ATRATIVA DE VAN DER WAALS CONSIDERANDO O CÁLCULO FRACIONÁRIO

ANALISE DINÂMICA DO SISTEMA PARA O CASO DE $U=0$

Para as simulações numéricas serão considerados os parâmetros: $r = 0.14668$; $c = 2.1269$; $d = 0.02173$; $p = 0.001$; $g = 2.6364$; $\Omega = 1$ e $a = 2.5$ (NOZAKI *et al.*, (2013)).

Na Figura 6.61 podemos verificar a variação do teste 0-1 para variação da ordem da derivada de q_3 .

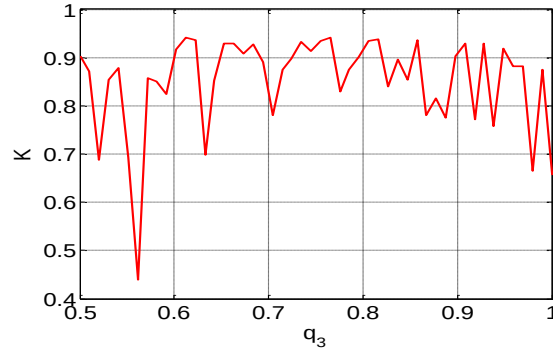


FIGURA 6.61- VARIAÇÃO DE K VERSUS A VARIAÇÃO DE $0.5 \leq q_3 \leq 1$.

Em direção as simulações numéricas do controle são conhecida a ordem das derivadas ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$).

Na Figura 6.62 são apresentados o comportamento do Sistema sem controle.

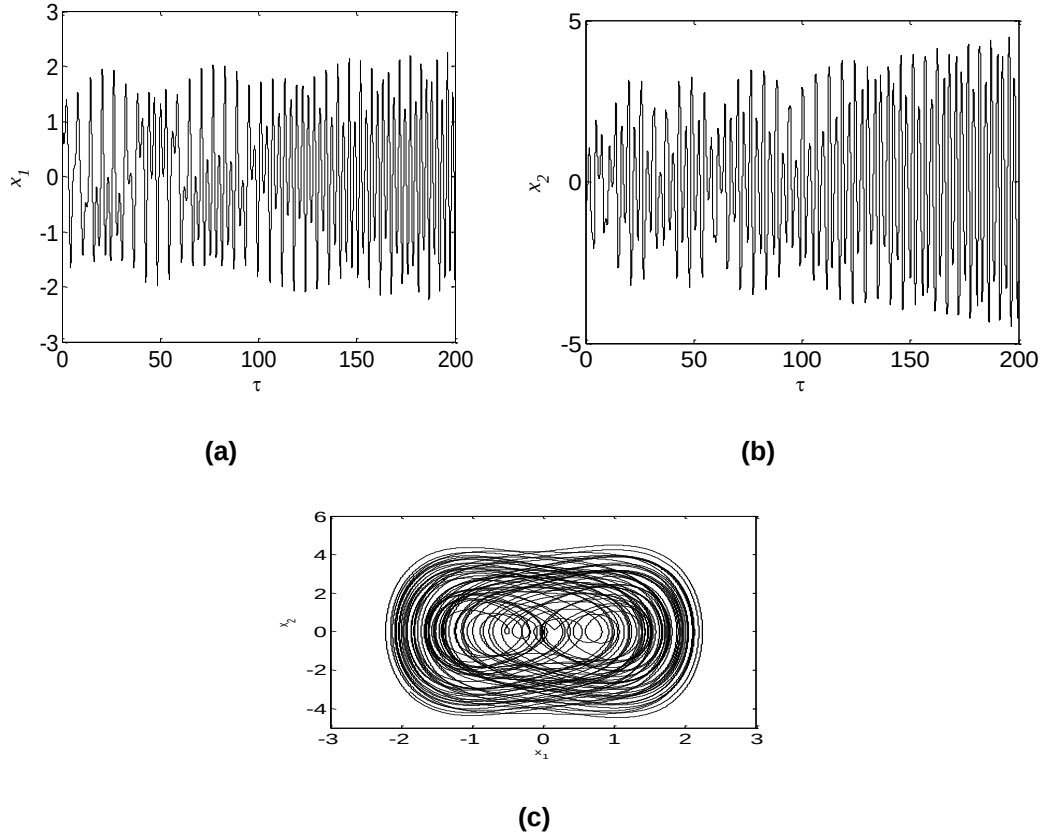


FIGURA 6.62: HISTÓRICO DE TEMPO SEM CONTROLE, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$).

(A) DESLOCAMENTO. (B) VELOCIDADE. (C) DIAGRAMA DE FASE.

Em direção ao controle do Sistema observando a inclusão de um sinal de controle U na equação junto com a ordem fracionária:

$$\begin{aligned}\frac{d^{q_1}x_1}{dT^{q_1}} &= x_2 \\ \frac{d^{q_2}x_2}{dT^{q_2}} &= -rx_1 - cx_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_3}x_3}{dT^{q_3}} + U \\ \frac{d^{q_3}x_3}{dT^{q_3}} &= x_2\end{aligned}\tag{6.23}$$

O controle U possui dois elementos: $U = \tilde{u} + u$, onde $\tilde{u}$ é o controle realimentado e u é o controle.

6.7.PROJETO DE CONTROLE CONSIDERANDO O CONTROLE OLFC

O sinal de controle U consiste no controle em duas partes: $U = \tilde{u} + u$, onde $\tilde{u}$ é o controle realimentado e u é o OLFC que foi definido como orbitas periódicas desejáveis o vetor: $[\tilde{x}_1(\tau) \quad \tilde{x}_2(\tau) \quad \tilde{x}_3(\tau)]^T$.

Se o vetor: $[\tilde{x}_1(\tau) \quad \tilde{x}_2(\tau) \quad \tilde{x}_3(\tau)]^T$ é a solução para o Sistema da Eq. (74) então $u = 0$. Desta forma, o regime desejado é obtido pela seguinte equação:

$$\begin{aligned}\frac{d^{q_1}x_1}{dT^{q_1}} &= x_2 \\ \frac{d^{q_2}x_2}{dT^{q_2}} &= -rx_1 - cx_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_3}x_3}{dT^{q_3}} + U \\ \frac{d^{q_3}x_3}{dT^{q_3}} &= x_2\end{aligned}\tag{6.24}$$

Assim o controle realimentado $\tilde{u}$ é por esse motivo:

$$\tilde{u} = \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} + r \tilde{x}_1 + c \tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a + \tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_3} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}} \quad (6.25)$$

Substituindo a Eq. (6.25) na Eq. (6.24) e definindo o desvio da trajetória desejada como:

$$e = \begin{bmatrix} x_1 - \tilde{x}_1 \\ x_2 - \tilde{x}_2 \\ x_3 - \tilde{x}_3 \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

O controle u , pode ser encontrado da solução da seguinte equação:

$$u = -R^{-1} B^T P e \quad (6.27)$$

Sendo P uma matriz simétrica e obtida da equação algébrica de Riccati (3.29).

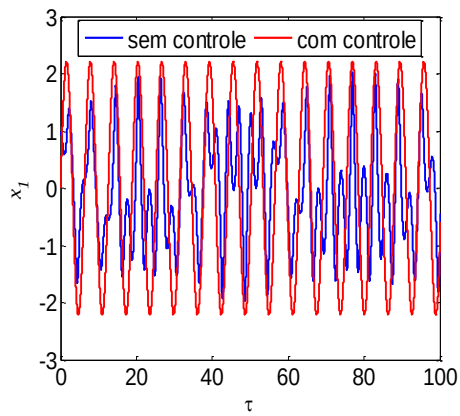
Definindo as orbitas desejadas como $\tilde{x}_3 = x_3$ e $(\tilde{x}_1 = 2.218 \sin(\tau))$ e $\tilde{x}_2 = 2.218 \cos(\tau)$.

Uma vez que o objetivo deste projeto é controlar x_1 e x_2 , a variável x_3 será considerada apenas como distúrbios do sistema

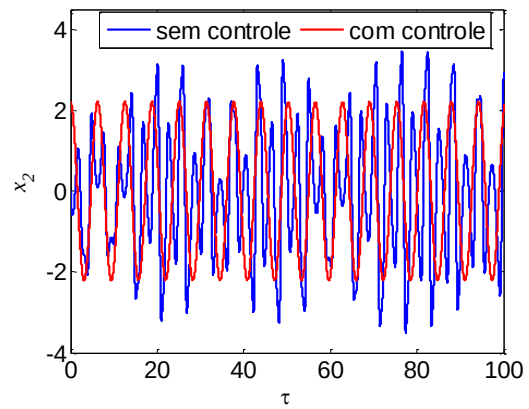
As matrizes A, B,Q,R são exibidas abaixo:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ e definindo: } Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}, R = [0.001]$$

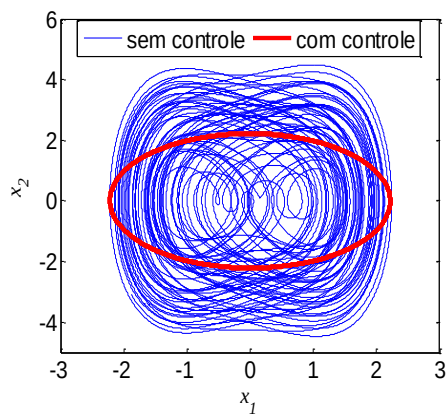
Na Figura 6.71, pode-se observar os resultados preliminares da proposta de controle considerando o controle $(U = \tilde{u} + u)$.



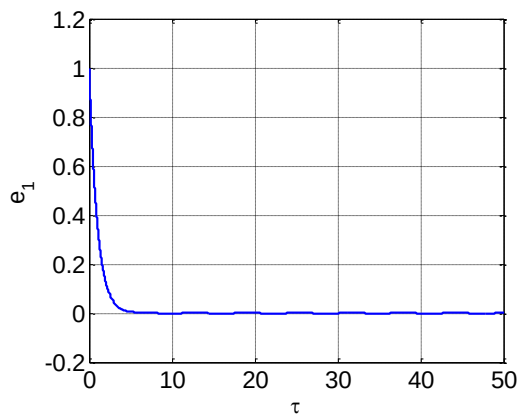
(a)



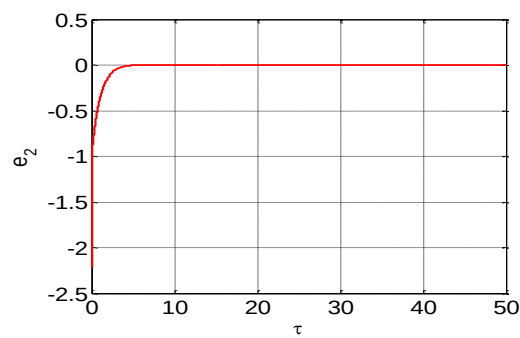
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 6.71: HISTÓRICO DE TEMPO SEM E COM CONTROLE, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$).

(A) DESLOCAMENTO. (B) VELOCIDADE. (C) DIAGRAMA DE FASE. (D) ERRO e_1 . (E) ERRO e_2 .

6.8.PROJETO DE CONTROLE CONSIDERANDO O CONTROLE SDRE

O controle realimentado é retratado abaixo:

$$\tilde{u} = \frac{d}{(a+x_1)^2} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_3} x_3}{dT^{q_3}} \quad (6.28)$$

Substituindo Eq. (6.28) em Eq. (6.24), obtém-se o Sistema:

$$\begin{aligned} \frac{d^{q_1} x_1}{dT^{q_1}} &= x_2 \\ \frac{d^{q_2} x_2}{dT^{q_2}} &= -rx_1 - cx_1^3 + u \end{aligned} \quad (6.29)$$

O controle u , pode ser encontrado da solução da seguinte equação:

$$u = -R^{-1}B^T P e \quad (6.30)$$

$$\text{onde: } e = \begin{bmatrix} x_1 - \tilde{x}_1 \\ x_2 - \tilde{x}_2 \\ x_3 - \tilde{x}_3 \end{bmatrix}$$

Tratando-se de P uma matriz simétrica e alcançada a partir da equação algébrica de Riccati. As matrizes A, B, Q e R são exibidas abaixo

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r - cx_1^2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ e definindo: } Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}, R = [0.001]$$

O propósito é controlar x_1 e x_2 , e a variável x_3 será considerada apenas como distúrbios do Sistema.

Na Figura 6.81, foi verificado as soluções do projeto de controle observando o controle ($U = \tilde{u} + u$) com órbita definida como esperada:

$$\tilde{x}_1 = 2.218 \text{ seno}(\tau) \text{ e } \tilde{x}_2 = 2.218 \cos(\tau).$$

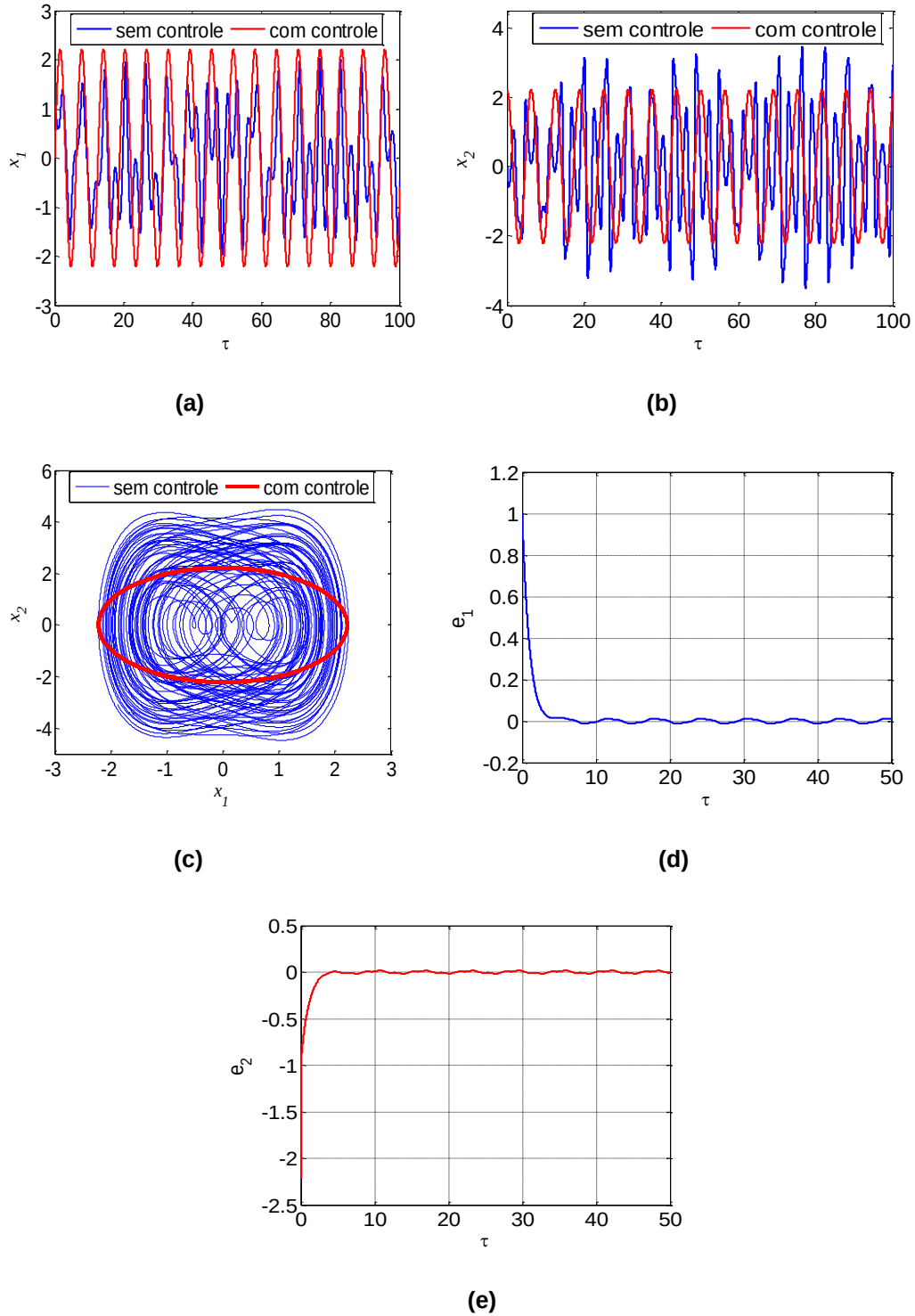


FIGURA 6.81: HISTÓRICO DE TEMPO SEM E COM CONTROLE, ($q_1 = q_2 = 1$ e $q_3 = 0.76$).

(A) DESLOCAMENTO. (B) VELOCIDADE. (C) DIAGRAMA DE FASE. (D) ERRO e_1 . (E) ERRO e_2 .

6.9. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

A fim de definir os resultados das imprecisões no comportamento do controle, estima-se que um erro seja encontrado nos parâmetros (Ω , r , c , d , g , p , a).

Além disso, a variação da derivada fracionária na robustez do controle proposto será considerada.

Nas Figuras. 6.91, 6.92 e 6.93, com a robustez do controle para preservar o Sistema em órbita frequente é analisada, usando o controle proposto com variação nos parâmetros:

$\Omega_u = \Omega(0.8 + 0.4r(t))$, $r_u = r(0.8 + 0.4r(t))$, $p_u = p(0.8 + 0.4r(t))$, $c_u = c(0.8 + 0.4r(t))$, e $a_u = a(0.8 + 0.4r(t))$, onde $r(t)$ é um número aleatório $r(t) = [0.1]$.

Considerando as incertezas apenas no controle realimentado (u_r), com a matriz:

Para o controle OLFC: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r_u & 0 \end{bmatrix}$.

Para o controle SDRE: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r_u - c_u x_1^2 & 0 \end{bmatrix}$.

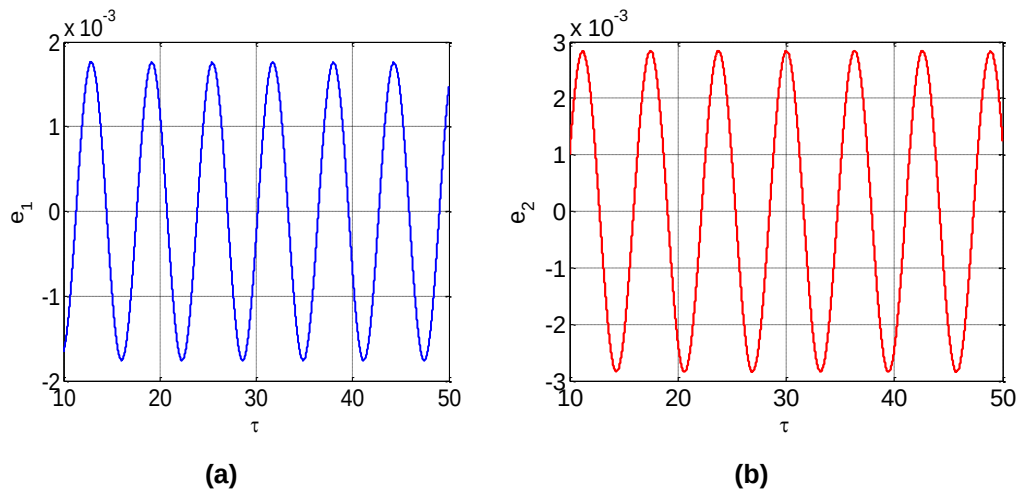


FIGURA 6.91: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

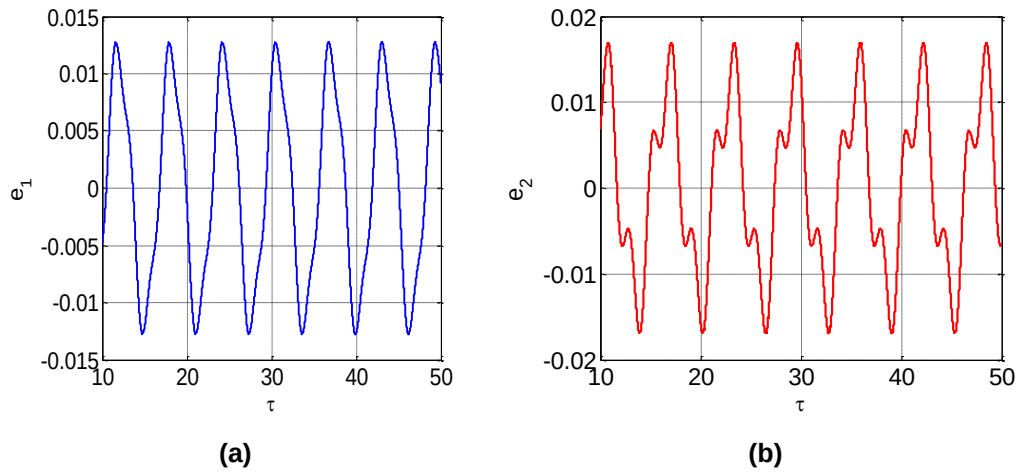


FIGURA 6.92: SDRE. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

Na Figura 6.92, é capaz de considerar a energia do controle preservar o Sistema na mesma órbita alcançada com o controle sem imprecisões, considerando as incertezas apenas no controle realimentado ($\tilde{u}$):

Para o controle OLFC:

$$\tilde{u} = \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} + r \tilde{x}_1 + c \tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a + \tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_3} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}}$$

Para o controle SDRE: $\tilde{u} = \frac{d_u}{(a_u + x_1)^2} - g_u \cos \Omega \tau + \frac{p_u}{(a_u + x_1)^3} \frac{d^{q_3} x_3}{dT^{q_3}}$

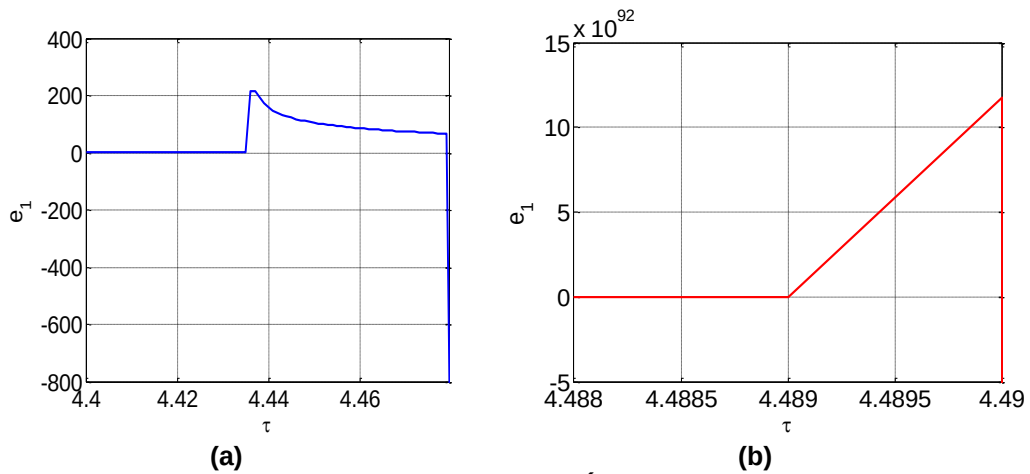


FIGURA 6.93: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

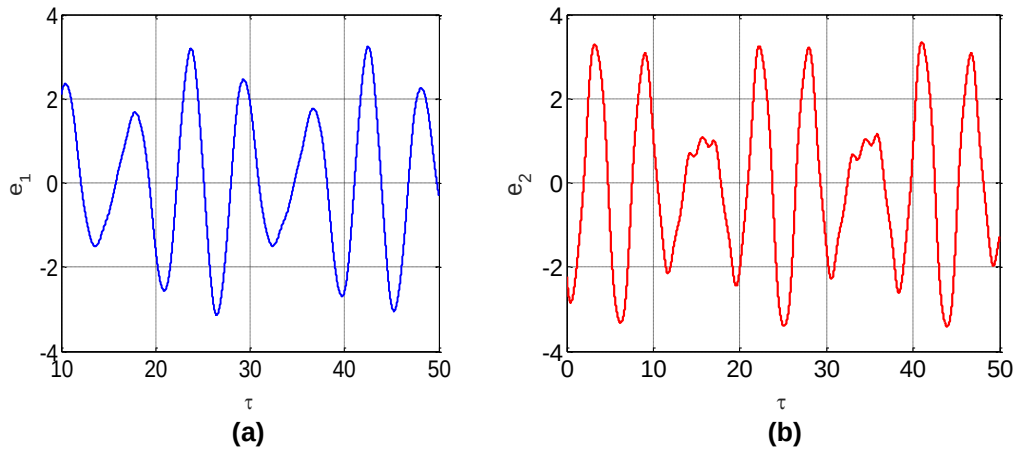


FIGURA 6.94: SDRE. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

Na Figura 6.93 verifica-se a força do controle em preservar o Sistema igual a órbita alcançada com o controle sem incertezas, considerando as oscilações no controle de realimentação (u_r) e no controle realimentado ($\tilde{u}$), junto ao controle realimentado na forma:

Para o controle OLFC:

$$\tilde{u} = \frac{d^{q_2} \tilde{x}_2}{dT^{q_2}} + r \tilde{x}_1 + c \tilde{x}_1^3 + \frac{d}{(a + \tilde{x}_1)^2} - g \cos \Omega \tau + \frac{p}{(a + \tilde{x}_1)^3} \frac{d^{q_3} \tilde{x}_3}{dT^{q_3}}$$

$$\text{e a matriz } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r_u & 0 \end{bmatrix}.$$

Para o controle SDRE:

$$\tilde{u} = \frac{d_u}{(a_u + x_1)^2} - g_u \cos \Omega \tau + \frac{p_u}{(a_u + x_1)^3} \frac{d^{q_2} x_3}{dT^{q_3}} \text{ e a matriz } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -r_u - c_u x_1^2 & 0 \end{bmatrix}.$$

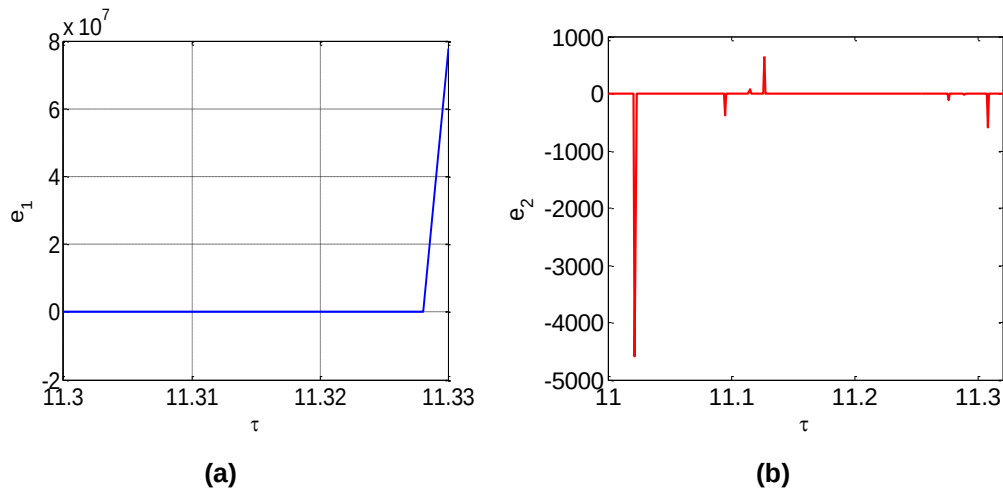


FIGURA 6.95: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA E_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

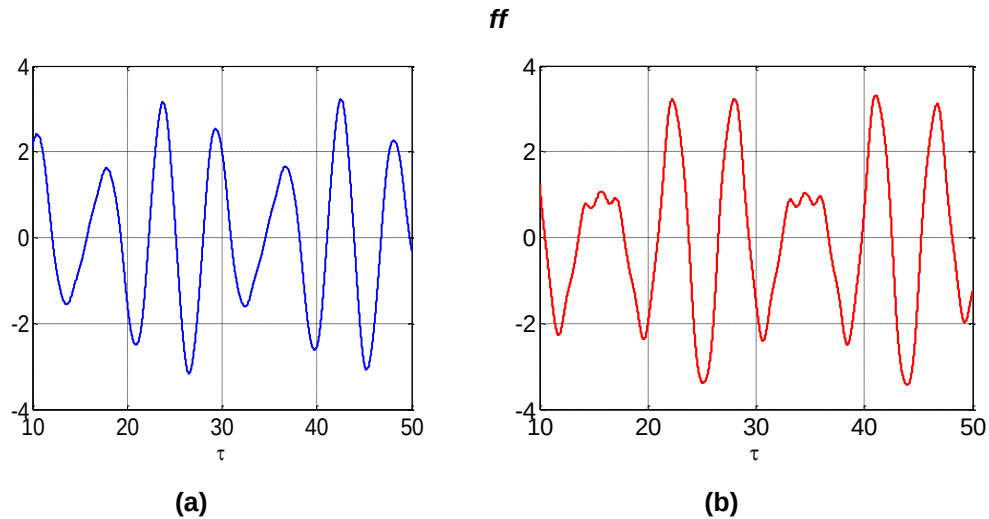


FIGURA 6.96:SDRE. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJA e_2 .

Como pode ser observado nos resultados o controle OLFC provou tornar-se mais eficiente para os casos em que o controle não está sujeito a falhas paramétricos ou quando apenas a matriz de estados A está sujeita a erros paramétricos, induzindo no controle realimentado.

Nas situações em que o controle realimentado é sujeito a erros paramétricos os dois controles OLFC e SDRE apresentaram ser sensíveis. Sendo que para o controle OLFC esta sensibilidade leva a instabilidade do Sistema Figuras 6.93a, 6.93b, 6.95a e 6.95b.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho discutiu-se e apresentou os principais resultados obtido no decorrer da pesquisa:

No capítulo 2 neste capítulo descreveu a criação do AFM, forças atuantes entre a ponteira e a amostra, elementos integrantes do AFM e o desempenho do AFM e uma descrição da posição do problema na literatura.

No capítulo 3, retratou o resumo dos métodos de controle que foram utilizados neste trabalho, cujo o propósito foi de modificar o movimento caótico em periódico porque o movimento caótico prejudica a figura formada pelo AFM.

No capítulo 4 ficou a obrigação de atingir um entendimento dos modelos matemáticos que simbolizam o modo intermitente e a habilidade de produzir as imagens que são obtidas de acordo com a característica do modelo matemático e das formas nos métodos de controle.

Que foram usados dois fatos em que a amostra está submersa em um meio hidrodinâmico e estabeleceu as forças de Van der Waals, o primeiro foi aplicado no modo intermitente e o segundo foi usado para o modo não contato, que são observados neste capítulo.

O capítulo 5 foi usado projeto de controle sem usar a ordem fracionária não gerando muito efeito junto com a inclusão do controle F_u que foi verificado nos resultados obtidos.

No capítulo 6 Como pode ser observado nos resultados o controle OLFC provou tornar-se mais eficientes para os casos em que o controle não está sujeito a falhas paramétricos ou quando apenas a matriz de estados A esta sujeita a erros paramétricos, induzindo no controle realimentado.

Nas situações em que o controle realimentado é sujeito a erros paramétricos os dois controles OLFC e SDRE apresentaram ser sensíveis. Sendo que para o controle OLFC esta sensibilidade leva a instabilidade do Sistema Figuras 6.93a, 6.93b, 6.95a e 6.95b.

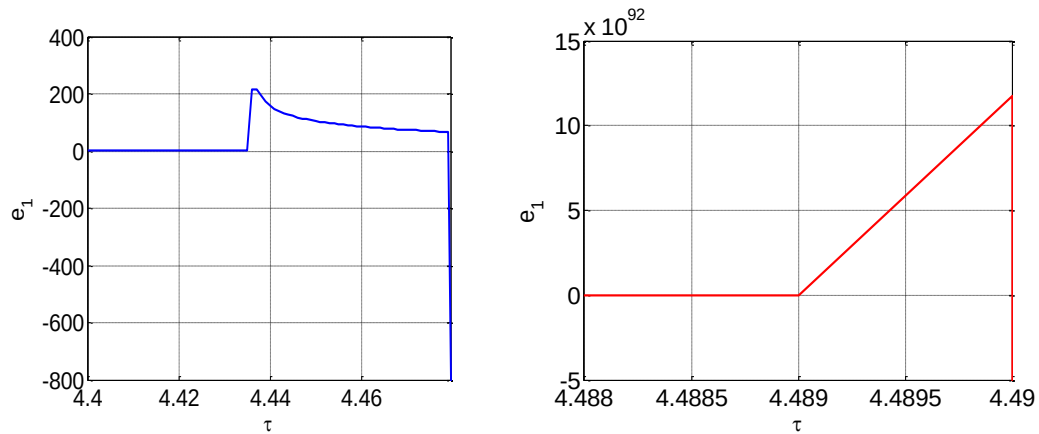


FIGURA 6.93: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

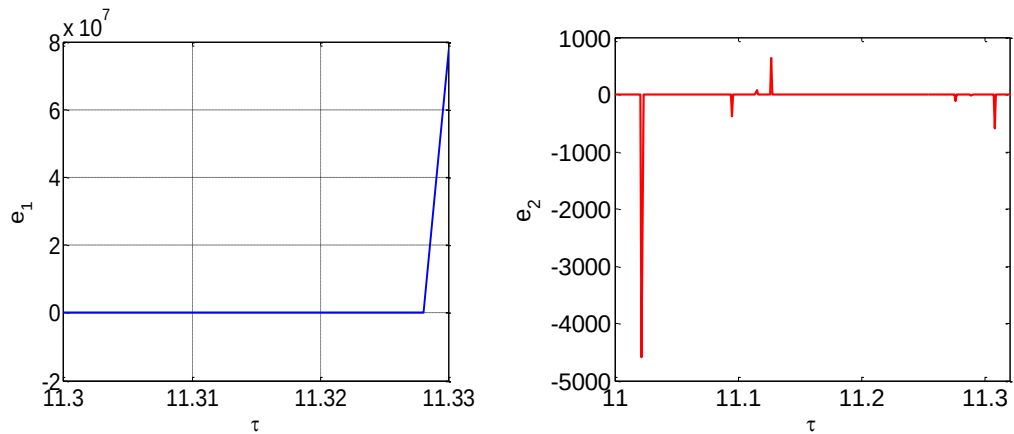


FIGURA 6.95: OLFC. (A) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_1 . (B) DESVIO DA TRAJETÓRIA DESEJADA e_2 .

REFERÊNCIAS.

ARAI Masaru, UEDA Eijun, LIANG Xiaobin, ITO Maliko, KANG Sungman e NAKAJIMA Ken. **Viscoelastic maps obtained by nanorheological atomic force microscopy with two different driving systems**, 2018.

BASSINELLO Daihane G., TUSSET Angelo M., ROCHA Rodrigo T., BALTHAZAR José M. **Dynamical Analysis and Control of a Chaotic Microelectromechanical Resonator Model**, 2018.

BAHRAMI Arash, NAYFEH Ali H. **On the dynamics of tapping mode atomic force microscope probes**, 2012.

BALTHAZAR, J. M., BUENO, A. M., TUSSET, A. M. AND PONTES, B. R. 2012A, **“On an Overview of Nonlinear and Chaotic Behavior and Their Controls of an Atomic Force Microscopy (AFM) vibrating Problem”**, In: Iva Lipovic. (Org.). Nonlinearity, Bifurcation and Chaos - Theory and Applications. 1ed: InTech, Vol. 1, pp. 45-68.

BALTHAZAR, J. M, PONTES, B.R., TUSSET, A. M., BUENO, A. M. FELIX, J. L. P., NOZAKI, R., RODRIGUES, K. S. and ILIUK, I., 2012b, **“Progressos recentes em NEMS: Comportamento dinâmico não-linear e caótico e de possível controle da microscopia de força atômica ('AFM'), por meio de microvigas em balanço e uma breve discussão sobre colheita de energia para dispositivos baseados em MEMS”**, In: Carlos Graeff. (Org.). “Nanotecnologia: ciência e engenharia”, Ed. Cultura Acadêmica, São Paulo, Brazil, Vol. 1, pp. 201-276.

BALTHAZAR J.M., TUSSET A.M., SOUZA S.L.T.D., BUENO A.M., 2013, **Microcantilever chaotic motion suppression in tapping mode atomic force microscope**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227, 8, 1730-1741.

BALTHAZAR JM, BASSINELLO DG, TUSSET AM, BUENO AM AND DE PONTES JUNIOR BR (2014) **Nonlinear control in an electromechanical transducer with chaotic behaviour. Meccanica**, 49(8), 1859-1867.

BERNARDINI D., REGA G., LITAK G., SYTA A., 2013, **“Identification of regular and chaotic isothermal trajectories of a shape memory oscillator using the 0-1 test”**, Proc. Inst. Mech. Eng. K J. Multi-body Dyn., 227, p. 17-22.

BERNARDINI, D. and LITAK, G. (2015). **An overview of 0-1 test for chaos. J. Brazilian Soc. Mech. Sci.** p. 1-8.

BINNIG G., QUATE C.F, GERBER C. **Atomic force microscope** Phys. Rev. Lett., 56 (1986), pp. 930-933.

BICYSKO P., DZIERKA A., JÓZWYAK G., RUDEK M., GOTSZALK T., P. JANUS GRABIEC P.L, RANGELOW L.W. **Contact atomic force microscopy using piezoresistive cantilevers in load force modulation mode**, 2018.

BOLLA, M.R., BALTHAZAR, J.M., PALACIOS, J.L., MOOK, D.T.. **On an Approximated analytical solution to a nonlinear vibrating problem, excited by a non-ideal motor**, Nonlinear Dynamics, 2007 (in press).

BOWEN, W. R.; HILALI, N. **Atomic Force Microscopy in Process Engineering–An Introduction to AFM for Improved Processes and Products**. Elsevier, 2009.

CADENA M. J., SUNG S.H., BOUDOURIS BRYAN W., 2016. **Nanoscale Mapping of Dielectric Properties of Nanomaterials from Kilohertz to Megahertz Using Ultrasmall Cantilevers..**

CHIN-Tsung Hsieh, HER-Terng Yau, CHENG-Chi Wang, YI-Sheng Hsieh. **Nonlinear behavior analysis and control of the atomic force microscope and circuit implementation**, 2018.

CASTÃO, K. A. L., **Análise Dinâmica Não Linear de Um Sistema Não-Ideal, utilizando Amortecedor Magneto Reológico**, Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru-SP, 2008.

CHAVARETTE, F.R., BALTHAZAR, J.M., RAFIKOV, M., HERMINI, A.H., **On Non-Linear 71 Dynamics and an Optimal Control Synthesis of the Potential of Action Membrane (Ideal and Non-Ideal Cases) of the Hodgkin-Huxley (HH) Mathematical Model**, Chaos, Solitons and Fractal, in press, 2007.

DAVID, S. A.; QUINTINO, D. D.; BALTHAZAR, J. M.; OLIVEIRA, C. **Macroeconomic dynamic model with fractional-order derivative**. ENOC 2014 - Proceedings of 8th European Nonlinear Dynamics Conference. Viena-Áustria: Institute of Mechanics and Mechatronics, Vienna University of Technology, p. 1-8.

DJIHA TCHAPTCHET E., DJUIDJE KENMOE G., **Velocity and forced excitation effects on atomic friction force with deformable substrate**, 2015.

El – Badawy, A.A., **Behavior Investigation of a nonlinear non – ideal vibrating system**, *Journal Vibration and Control*, vol. 13, p. 203 – 217, 2007.

EATON P., BATZIOU K. (2019) **Artifacts and Pratical Issues in Atomic Force Microscopy**. In: Santos N., Carvalho F. (eds) *Atomic Force Microscopy Methods in Molecular Biology*, vol 1886. Humana Press, New York, NY.

FARROKH Payam A., FATHIPOUR M., YAZDANPANA M.J. **High precision imaging for noncontact mode atomic force microscope using an adaptive nonlinear observer and output state feedback controller**, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* Vol. 4, No.3, September 2009, p. 429-442.

FELIX, Jorge Luis Palacio; BALTHAZAR, José Manoel; TUSSET, Ângelo Marcelo; PICCIRILLO, Vinicius; BUENO, Atila Madureira; BRASIL, Reyolando Manoel Lopes Rebello da Fonseca. **On Optimal Control of a Nonlinear Robotic Mechanism Using the Saturation Phenomenon**. In: Belhaq, Mohamed. (Org.). *Springer Proceedings in Physics*. 1ed: Springer International Publishing, 2015, v. 168, p. 145-165

GE, Zheng-Ming, and CHAN-Yi Ou. **"Chaos in a fractional order modified Duffing system."** Chaos, Solitons & Fractals 34.2 (2007): 262-291.

GOPAL, R., VENKATESAN, A., LAKSHMANAN, M. **Applicability of 0-1 test for strange non-chaotic attractors**, Chaos 23, 2013.

HAGHIGHATNIA S., SHANDIZ H., **Design of Fractional Order Sliding Mode Controller for Chaos Suppression of Atomic Force Microscope System**, 2019.

HORNSTEIN S, GOTTLIEB O., **Nonlinear dynamics, stability and control of the scan process in noncontacting atomic force microscopy**. Nonlinear Dyn (2008).

HUSSAIN, S., XU K., YE S., LEI L., LIU X., XU R., XIE L., CHENG Z. **Front. Phys. Local electrical characterization of two-dimensional materials with functional atomic force microscopy**, (2019).

IOSSAQUI, J. G., **Uso de Absorvedores de Vibrações Eletromecânicos Lineares e NãoLineares em Sistemas Não-Lineares e Não-Ideais**. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru-SP, 2009.

JAVIDJAM Emeneh, HEKMATSHOAR Mohamed Hossein, HEDAYATIFAR Leila e ABAD Sajjad Nasiri Khalil. **Effect of surface roughness on electrical conductivity and hardness of silve plated copper**, 2019.

KEIGHOBADI J, FARAJI J, RAFATNIA S. **Chaos control of atomic forcemicroscope system using nonlinear model predictive control**, 2017.

KEYYANI Aliasghar, ALIJANI Farbod, SADEGHIAN, MATUROVA Klara, GOOSEN Hans and KEULEN Fred Van. **Chaos: The speed limiting phenomenon in dynamic atomic force microscopy**, 2017.

KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. New York: John Wiley & Sons. 1996.

LANDOLSI Fakhreddine, H. GHORBEL Fathi, DICK Andrew J. **Analysis of the occurrence of stick slip in AFM-based nano-pushing**, 2012.

LAI Chia-Yun ,SANTOS Sérgio e CHIESA. **Systematic Multidimensional Quantification of Nanoscale Systems From Bimodal Atomic Force Microscopy Data**, *ACS Nano*, 2016.

LENCI S., REGA G., **Global Nonlinear Dynamics for Engineering Design and System Safety**, 2019.

LIAO Hsien-Shun, LEI Ka Kit e TSENG Yu Fang. **High-speed force mapping based on an astigmatic atomic force microscope**, 2019.

LITAK, G SYTA, A., WIERCIGROCH, M., 2009, **"Identification of chaos in a cutting process by the 0–1 test"**, Chaos Solitons Fractal 40, p. 2095-2101.

LITAK, G., BERNARDINI, D., SYTA, A., REGA, G., RYSAK, A., 2013, “**Analysis of chaotic non-isothermal solutions of thermomechanical shape memory oscillators**”, Eur. Phys. J. Special Topics, 222, p. 1637-1647.

LOZANO, J. R. and GARCIA R. **Theory of Multifrequency Atomic Force Microscopy. Physical Review Letters**. PRL 100, 076102, 2008.

MACHADO, J. T. **Numerical calculation of the left and right fractional derivatives**. Journal of Computational Physics 293, p. 96-103, 2015.

MAURICIO, M. H. P. **Microscopia de ponta de prova (Scanning Probe Microscopy): AFM – microscopia de força atômica**. 2011. Disponível em: <<http://www.dema.pucRio.br/cursos/micquant/SPM.pdf>>, acesso em fev., 2011.

Nanotecnologia: ciência e engenharia / CARLOS GRAEFF (Org.). – São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012.

NAKAJIMA Miyuki, UCHIDA Yuki, SATOH Nobuo e YAMAMOTO Hidekazu. **Nanoscale investigation of the silicon carbide double-diffused MOSFET with scanning capacitance force microscopy**, 2018 - The Japan Society of Applied Physics

NESTOROVIĆ Tamara, OVEISI Atta, JAVAD Faraji, PISHROBAT Mehran Hosseini, KEIGHOBADI Jafar. **Robust nonlinear control of atomic force microscope via immersion and invariance**, 2018.

NOZAKI, Ricardo, **Dinâmica não linear e caótica em um modelo matemático de um microscópio de força atômica**, Bauru: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2010, 84 pp., Dissertação (Mestrado)

NOZAKI, R., BALTHAZAR, J. M., TUSSET, A. M., PONTES, B. R. and BUENO, A. M., 2013, “**Nonlinear Control System Applied to Atomic Force Microscope Including Parametric Errors**”, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Vol. 24, pp. 223-231.

NOZAKI, R. **Análise de séries temporais com comportamento não linear obtidas por um sensor de um microscópio de força atômica**. 2016. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PETRÁŠ, I. **Fractional-order nonlinear systems: modeling, analysis and simulation**. Higher Education Press, Beijing, 2011.

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

PERUZZI NJ, CHAVARETTE FR, BALTHAZAR JM, TUSSET AM, Peticarrari ALPM and Brasil RMFL (2016). **The dynamic behavior of a parametrically excited time-**

periodic MEMS taking into account parametric errors. Journal of Vibration and Control.

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.; TUSSET, A. M.; BERNARDINI, D.; REGA, G.. **Nonlinear Dynamics of A Thermomechanical Pseudoelastic Oscillator Excited By Non-Ideal Energy Sources.** International Journal of Non-Linear Mechanics, v. 77, p. 12-27, 2015.

PICCIRILLO, V.; TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M.; SOUZA, S. L. T. D. **Chaotic behavior of a mems system characterized by nonlinear tools.** In: 23 ABCM International Congress of Mechanical Engineering/International Conference on Nonlinear Dynamics, Chaos, Control and Applications to Engineering, 2015, Rio de Janeiro. COBEM 2015/ ICONE, 2015.

PIRES, EJ Solteiro, et al. **"Particle swarm optimization with fractional-order velocity"** Nonlinear Dynamics 61.1-2 (2010).

RAJABIFAR Bahram, JADHAV Jyoti M., KIRAKOFE Daniel, MEYERS Gregory F., RAMAN Arvind. **Dynamic AFM on Viscoelastic Polymer Samples with Surface Forces**, 2018.

RAMAN A., MELCHER J., and TUNG R. **Cantilever Dynamics in Atomic Force Microscope.** Nanotoday, 3, 1-2, 20-27, 2008.

RASSADIN A.E., SAZANOVA T.S., STEPANOV A.V. e FOMIN L.A.. **Some notes about scanning probe microscopy**, nanoengineering and methods of quantum mechanics, 2018.

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

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., 4, p. 279-284, 2008.

RAFIKOV, M., BALTHAZAR, J.M., **On control and synchronization in chaotic and hyperchaotic system via linear feedback control.** Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, in press, 2007.

RODRIGUES, K. S., **Caos E Controle De Microviga De Um Microscópio De Força Atômica Em Balanço, Operando Em Modo Intermitente, Na Ressonância**, Bauru: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2011, 118 p., Dissertação (Mestrado).

RUPPERT Michael G., MOORE Steven I., ZAWIERTA Michal, FLEMING Andrew J Putrino Gino e YOUNG Yuen K., **Multimodal atomic force microscopy with optimized higher eigenmode sensitivity using on-chip piezoelectric actuation and sensing**, 2019.

RÜTZEL, S., LEE, S.I., RAMAN, A., **Nonlinear dynamics of atomic force microscope probes driven in Lennard-Jones potentials**. Proc. R. Soc. London A. 2003; 459: 1925–48.

SAFIUL Alam Mollick, RANVEER Singh, MOHIT Kumar, SATYARANJAN Bhattacharyya e TAPOBRATA Som, **Strong uniaxial magnetic anisotropy in Co films on highly ordered grating-like nanopatterned Ge surfaces**, 2018.

SHAWKY, A. M., et al. **"Position control of flexible manipulator using non-linear H^∞ with state-dependent Riccati equation"**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 221.3 (2007).

SEBASTIAN A., A. GANNEPALI. SALAPKA M.V.. **A review of the systems approach to the analysis of dynamic-mode atomic force microscopy**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 15(15), 952- 959 (2007).

SETTIMI Valeria, REGA Giuseppe. **Global dynamics and integrity in noncontacting atomic force microscopy with feedback control**, 2016.

SETTIMI Valeria, GOTTILIEB Oded, REGA Giuseppe, **Asymptotic analysis of a noncontact AFM microcantilever sensor with external feedback control**, 2015.

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

SINHA, A., 2005. **"Nonlinear dynamics of atomic force microscope with PI realimentado"**, Journal of Sound and Vibration.

SONG, Lei, JIANYING Yang, and SHIYUN Xu. **"Chaos synchronization for a class of nonlinear oscillators with fractional order"**. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* 72.5 (2010).

TAVAZOEI, M. S., & HAERI, M. (2009). **A note on the stability of fractional order systems**. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(5), 1566-1576.

TUSSET M.A., RIBEIRO A.M., LENZ B.W., ROCHA T.R., BALTHAZAR M. J. **Time delayed feedback control applied in an atomic force microscopy (AFM) model in fractional-order**, 2019.

TUSSET AM, JANZEN FC, PICCIRILLO V, ROCHA RT, BALTHAZAR JM and LITAK G (2017) **On nonlinear dynamics of a parametrically excited pendulum using both active control and passive rotational (MR) damper**. *Journal of Vibration and Control*, 1-13.

TUSSET A. M., PICCIRILLO A., BUENO A.M, BALTHAZAR M. J, SADO, D., FELIX, J. L. P., & BRASIL, R. M. L. R. D. F. (2016). **Chaos control and sensitivity analysis of a double pendulum arm excited by an RLC circuit based nonlinear shaker.** *Journal of Vibration and Control*, 22(17), 3621-3637.

TUSSET A.M, BUENO A.M, NASCIMENTO C. B, MAURICIO S.K. , BALTHAZAR J.M. **Nonlinear state estimation and control for chaos suppression in MEMS resonator**, 2013.

TUSSET, A. M., BALTHAZAR, J. M., **Microscopia De Força Atômica: Controle de uma Microviga Modelada Matematicamente com Comportamento Não-Linear e sob a ação de Amortecimento Hidrodinâmico**, 9TH Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications, DINCON 2010, 2010.

TUSSET, A.M., **Aplicação da teoria do controle ótimo em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magnetoreológico**, Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de engenharia mecânica, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2008.

VASIĆ Borislav, MATKOVIĆ Aleksandar e GAJIĆ Radoš. **Phase imaging and nanoscale energy dissipation of supported graphene using amplitude modulation atomic force microscopy**, 2017.

WANG C.C., PAI N.S. and YAU H.T., **Robust Control Method Applied in Self-Balancing Two-Wheeled Robot**, 2009.

WANG Yanyan, WU Sen. **Modeling and Simulation of an Atomic Force Microscopy System in the Z Direction**, 2018.

WANG, C. C., PAI, N. S. and YAU, H. T. 2009. **“Chaos control in AFM system using sliding mode control backstepping desing”**, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, pp 1-11.

WEI Wei, LEI Guo. **Chaos control in AFM via disturbance observe based control**, 2016.

WEYMOUTH A J, **Non-contact lateral force microscopy**, 2018.

WEN Xiang-Jun, ZHENG-MAO Wu, and JUN-GUO Lu. **"Stability analysis of a class of nonlinear fractional-order systems."** *IEEE Transactions on circuits and systems II: Express Briefs* 55.11 (2008): 1178-1182.

WEISENDANGER, R. *Scanning probe microscopy and spectroscopy, methods and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 637p. Weymouth A.J., **Non-contact lateral force microscopy**, 2017.

XU Yan, XU Wei, CHENG Qian e XU Zheng, **Depth sensitivity of subsurface imaging using atomic force acoustic microscopy: FEA Study**, 2018.

YABUNO Hiroshi, KURODA Masaharu, SOMEYA Takashi, NISHIMURA Kentaro, HAYASH Keiichi and ASHIDA Kiwamu. **Van der Pol-Type Self-Excited Microcantilever Probe for Atomic Force Microscopy** (2011).

YINGZI Li, ZIHANG Song, YINGXU Zhang, ZHENYU Wang, ZEYU Xu, RUI Lin e JIANQIANG Qian. **A double-electrolyte etching method of high-quality tungsten probe for undergraduate scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy experiments**, 2019.

YU, Cheng, and GUOZHU Gao. **"Existence of fractional differential equations"**. Journal of Mathematical Analysis and Applications 310.1 (2005): 26-29.

ZAKARIA Nurul Sabihah e ABDUL Azis Azlan, **Effect of Medium on Interaction Forces between Atomic Force Microscopy AFM Tip and Gold Nanoparticle**, 2018.

ZANETTE, S. I. et al. **Theoretical and experimental investigation of the forcedistance relation for an atomic force microscope with a pyramidal tip**. Surface Science 2000.

ZANETTE, S. I. **Introdução à Microscopia de Força Atômica**, 2010.

ZHANG, Y., ZHAO, Y., 2007. **"Nonlinear dynamics of atomic force microscopy with intermittent contact"** Chaos, Solitons and Fractals 34, 1021-1024.

ZHANG, W.M., MENG, G., ZHOU, Chen, J. B., 2009. **"Nonlinear Dynamics and Chaos of Micro" cantilever"-Based TM-AFMs with Squeeze Film Damping Effects"**, Sensors, 9, 3854-3874.

ZHUKOV A.A., **Applications of atomic force microscope manipulator operating in hybrid mode**, 2018.

APÊNDICE

Este apêndice trata de apresentar algumas definições como: o cálculo fracionário, o teste 0-1 e a demonstração do teorema citado na pagina 14. O conceito de Caos significa confusão e desordem, abordando técnicas complexas e justamente determinados, mostram um desequilíbrio que é sensível as exigências introduzidos, onde é articulado um comando adicional de reaparecimento, tornando não imagináveis na realidade no final das contas.

Cálculo Fracionário

A amostra está associada ao amortecimento, é capaz de verificar ainda que o comportamento não é somente gelatinoso, contudo é gelatinoso e elástico denominado de viscoelástico.

Onde o modo gelatinoso e elástico é capaz da execução do uso das derivadas de ordem fracionária para investigar o desempenho ativo do método (Bagley e Calico, 1991)

Em consequência das contradições primordiais das equações diferenciais ordinárias (ODE) e as equações diferenciais de ordem fracionária (FODE).

O maior número das propriedades ou resultados dos métodos ODE não é capaz de ser exatamente desenvolvida no fato dos métodos FODE (Yu et al., 2009).

A estrutura fracionária estabelece efeitos de memória que levam a medida do espaço de fase, ou em outras palavras inclui a memória no problema.

As equações diferenciais podem envolver operadores diferenciais de Riemann – Liouville junto a regra fracionária $q > 0$, onde constituem o método:

$$D^q x(t) = \frac{1}{\Gamma(\eta-q)} \int_{t_0}^t \frac{x^\eta(u)}{(t-u)^{q-\eta-1}} du \quad (1)$$

.

E η é o primeiro número inteiro não inferior, é fácil provar que a definição é a definição habitual de derivativos no qual $q = 1$, onde a ordem fracionária inclui conclusões de memória que expandem o espaço de fase

Para introduzir uma derivada fracionária no sistema dinâmico, utilizado amplamente por Grünwald-Letnikov e Riemman-Louville estas definições são aplicadas.

Os fatos distintos de um operador de ordem fracionária geral. Nesse sentido, a classe de funções descrita pela definição de Riemman-Louville é mais ampla (a função deve ser $m + 1$ continuamente diferenciável).

Introduzindo a primeira ordem da derivada, provaremos rapidamente o conceito de derivada não inteira.

Vamos conceituar a derivada de primeira e segunda ordem:

$$f'(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t-h)}{h} \quad (2)$$

$$f''(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f'(t) - f'(t-h)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t) - 2f(t-h) + f(t-2h)}{h^2} \quad (3)$$

Continuando, pode-se escrever uma forma geral da derivada da enésima ordem

$$f^n(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} f(t - jh) \quad n \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Em analogia à expansão original de Newton

$$(x + y)^r = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{r}{k} x^k y^{r-k} \quad (5)$$

$$f^n(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{n}{j} f(t - jh) \quad n \in \mathbb{N} \quad (6)$$

o que leva a definição de Grünwald – Letnikov:

$$\frac{d^q f}{dt^q} \equiv_L D_t^q f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^q} \sum_{j=0}^{\lceil \frac{t-a}{h} \rceil} (-1)^j \binom{n}{j} f(t - jh) \quad (7)$$

Na qual $q > 0$ e a constante binomial consegue ser estendido para números reais usando a função Euler Gamma

$$\binom{q}{j} = \frac{q!}{j!(q-j)!} = \frac{\Gamma(q+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(q-j+1)} \quad (8)$$

um par de colchetes $[\cdot]$ aparecendo no limite superior da soma indica a parte inteira, enquanto L é o comprimento da memória, respectivamente.

Usamos as técnicas de cálculo fracionário para pesquisar o procedimento da forma (8) junto a ordem fracionária $(-\frac{p}{(a+x_1)^3} x_2)$.

$$\frac{d^{q_1} u_1}{dT^{q_1}} = x_2$$

$$\frac{d^{q_2} x_2}{dT^{q_2}} = -rx_2 - bx_1 - cx_1^3 - \frac{d}{(a+x_1)^2} + \frac{e}{(a+x_1)^8} + g \cos \Omega \tau - \frac{p}{(a+x_1)^3} \frac{d^{q_2} x_3}{dT^{q_3}}$$

$$\frac{d^{q_3} x_3}{dT^{q_3}} = x_2$$

A Figura 8 mostra a variação K para a ordem da derivada para $q_1 = q_2 = 1$ e $0,5 \leq q_3 \leq 1$.

Onde $K_c = K$ é obtido pelo teste 0-1 (Gottwald, G. e Melbourne, 204).

O teste 0-1 para caos possui como entrada uma série temporal de medições e retorna um único valor escalar $K_c = K$ de 0 para atratores periódicos ou 1 para atratores caóticos.

O teste considera uma variável de sistema x_j , onde duas novas coordenadas (p , q) resolvidas da seguinte forma:

$$p(n, \bar{c}) = \sum_{j=0}^n x(j) \cos(j\bar{c}) \quad e \quad q(n, \bar{c}) = \sum_{j=0}^n x(j) \sin(j\bar{c}), \quad \text{onde } \bar{c} \in (0, \pi)$$

A transferência das informações é entregue por $p(n, \bar{c})$ e $q(n, \bar{c})$ é dado por:

$$M(n, c) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[(p(j+n, \bar{c}) - p(j, \bar{c}))^2 + (q(j+n, \bar{c}) - q(j, \bar{c}))^2 \right], \quad \text{onde } n = 1, 2, \dots, N$$

Assim sendo, conseguimos a especificação K_c medida de um período longo, logo:

$$K_c = \frac{\text{cov}(Y, M(\bar{c}))}{\sqrt{\text{var}(Y)\text{var}(M(\bar{c}))}} \quad e \quad M(\bar{c}) = [M(1, \bar{c}), M(2, \bar{c}), \dots, M(n_{max}, \bar{c})]$$

$$Y = [1, 2, \dots, n_{max}]$$

Dados quaisquer dois vetores x e y , a covariância $\text{cov}(x, y)$ e a variação $\text{var}(x)$, de n_{max} : elementos são definidos e usados como

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n_{max}} \sum_{n=1}^{n_{max}} (x(n) - \bar{x})(y(n) - \bar{y})$$

$$\text{var}(x) = \text{cov}(x, x)$$

Em todas as simulações escolhemos os parâmetros:

$$\Omega = 1, r = 0.1, b = 0.05, c = 0.35, d = \frac{4}{27}, e = 0.0001, g = 0.2, p = 0.005, a = 1.6,$$

$$x_{1_0} = 0 \text{ e } x_{2_0} = 0.$$

A figura a seguir mostra a variação de k da ordem da derivada para:

$$q_1 = q_2 = 1$$

$$0.5 \leq q_3 \leq 1$$

É possível ver que o comportamento é caótico não muda com a variação da ordem q_3 , que representa o comportamento viscoso e elástico do amortecimento de compressão.

No entanto, observe que quando $q_3 < 1$, o valor de K é maior pois temos $K = 0,9945$, para $q_3 = 0,53$, temos $K = 0,9818$, que indica uma mudança no comportamento caótico que é um grau mais significativo.

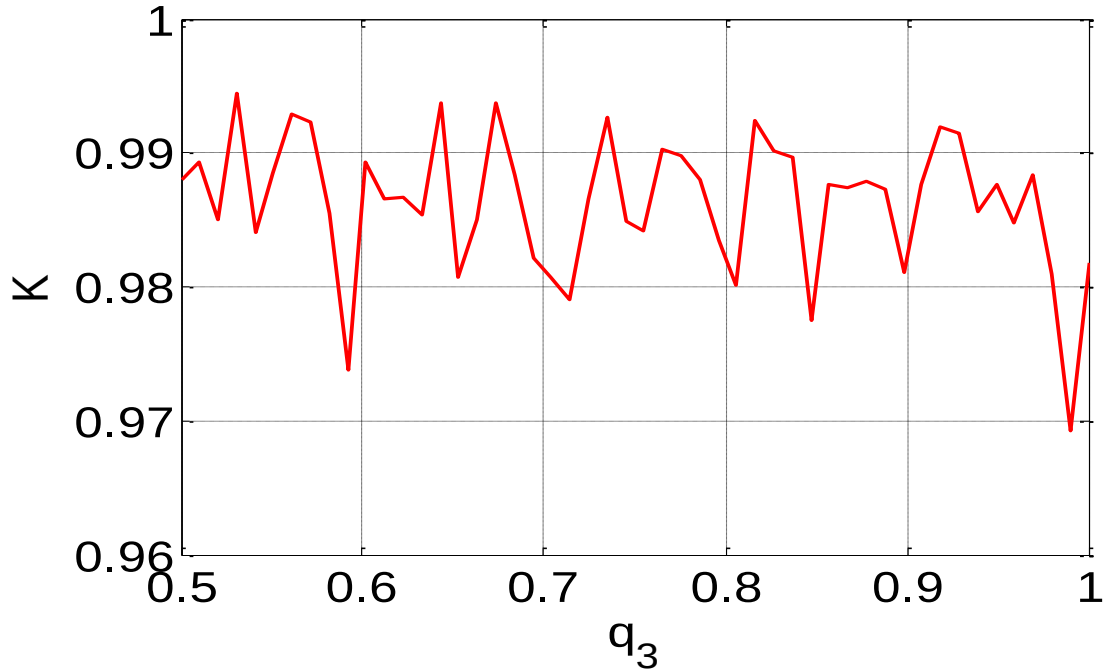


Figure 8. Variation of the K vs variation of the $0.5 \leq q_3 \leq 1$

Teste 0-1

O teste 0-1 é bastante usado em recursos onde o expoente de Lyapunov são complexos para computar e extremamente difícil para calcular.

Também é usado com êxito no estudo de técnicas caóticas (BERNARDINI *et al.*, 2013; LITAK *et al.*, 2009, 2013; FELIX *et al.*, 2014, 2015; PICCIRILLO *et al.*, 2015a, 2015b; BERNARDINI e LITAK, 2015).

Nas quais os vetores $X=[1,2,\dots,n]$, e $M(c)= [M(1,c),\dots, M(1, n)]$, ($c \in (0, \pi)$) é uma frequência fixa determinada aleatoriamente:

$$M(n, c) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(p(j+n) - p(j))^2 + (q(j+n) - q(j))^2]$$

$$p(i) = \sum_{j=0}^i \frac{(x_{j-\bar{x}})}{\sigma_x} \cos(jc); q(i) = \sum_{j=0}^i \frac{(x_{j-\bar{x}})}{\sigma_x} \sin(jc)$$

Na qual: $\bar{x}$ e σ_x é o valor médio e desvio quadrado da série x_i , e N é a dimensão da amostra. Para o caso $K \cong 0$ indica comportamento periódico e $K \cong 1$ indica um comportamento caótico.

Demonstração do teorema

O recurso de uma malha fechada é reproduzida a seguir:

$$\dot{x} = [A_e(x) + B_e(x)R_e^{-1}(x)B_e^T(x)P_e(x)]x = [A_c(x)]x$$

É garantida da teoria das equações de Riccati que a matriz $A_c(x)$ é fixa nos pontos de x.

Da teoria das equações de Riccati a matriz $A_c(x)$ é fixo nos pontos de x, onde a solução $P_e(x) \in C_1$ e logo a coluna $A_c(x) \in C_1$, usando o teorema do valor médio para $A_c(x)$ e exibindo coluna $A_c(x) = \text{col}(A_c(x))$. Então:

$$\text{col}^j(A_c(x)) = \text{col}^j(A_c(0)) + \frac{\partial \text{col}^j(A_c(Z_j))}{\partial x}, j = 1, \dots, n$$

E o vetor Z_j seria o ponto que está no segmento de linha junto a origem e o x determinando a igualdade de j na j-ésima. Substituindo a equação acima com a malha fechada:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_c(0)x + \left[\frac{\partial \text{col}^1(A_c(Z_1))}{\partial x} x \dots \frac{\partial \text{col}^n(A_c(Z_n))}{\partial x} x \right] x \\ &= A_c(0)x + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_i x_j \frac{\partial \text{col}^j(A_c(Z_j))}{\partial x} \end{aligned}$$

Executando as multiplicações e as divisões por $\|x\|$ e determinando:

$$\psi(x, z_1, \dots, z_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_i x_j \frac{x_i x_j}{\|x\|} \frac{\partial \text{col}^j(A_c(Z_j))}{\partial x}$$

Produzindo

$$\dot{x} = A_c(0)x + \psi(x, z_1, \dots, z_n)\|x\|$$

Na qual é usada a propriedade de sistemas lineares, onde:

$$\lim_{\|x\| \rightarrow 0} \psi(x, z_1, \dots, z_n) = 0$$

Em torno da origem junto a vizinhança a linearidade que possui na matriz de coeficientes contínuas e permanentes atuam em condições de alta ordem, determinando permanência do lugar assintótica.

Súmula Curricular

Apresenta-se, uma breve sumário sobre o histórico acadêmico.

A.1 GRADUAÇÃO:

Instituição: Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus Rio Claro.

Curso: Licenciatura Plena em Matemática.

Ano de Conclusão: 2001.

A.2 MESTRADO:

Instituição: Universidade Estadual Paulisa (UNESP)- Campus Rio Claro.

Curso: Mestrado em Física.

Ano de Conclusão: 2005.

A.3 DOUTORADO:

Instituição: Universidade Estadual Paulisa (UNESP), Faculdade de Engenharia, Campus Bauru.

Curso: Doutorado em Engenharia Elétrica.

Início: Primeiro semestre de 2016.

Ano de conclusão: 2020.

A.4 TRABALHO EM EVENTO INTERNACIONAL PUBLICADO

Angelo M. Tusset, Jose M. Balthazar, Jeferson Jose de Lima, Rodrigo T. Rocha, Ferderic C. Janzen e Patricia S. Yamaguchi, On an Optimal Control Applied in Atomic

Force Microscopy (AFM) Including Fractional-Order. Paper No DETC 2017-67536, pp. V 004T09A003; 9 pages doi: 10.1115/DETC2017-67536, ASME- the American Society of Mechanical Engineer, 2017.

A.5 ARTIGO SUBMETIDO

Nonlinear Control System Applied in an Atomic Force Microscopy (AFM) Model in Fractional- Order, Patricia S. Yamaguchi, José M. Balthazar, Angelo M. Tusset, Mauricio A. Ribeiro, 2019.