

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIM BASQUE PIRES

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA DE
UM SISTEMA APORTICADO ACOPLADO A UM DISSIPADOR DE ENERGIA NÃO
LINEAR**

PONTA GROSSA

2023

DIM BASQUE PIRES

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA DE
UM SISTEMA APORTICADO ACOPLADO A UM DISSIPADOR DE ENERGIA NÃO
LINEAR**

**ANALYSIS OF THE PIEZOELECTRIC ENERGY COLLECTION CAPACITY OF A
APORTICADO SYSTEM COUPLED TO A NON-LINEAR ENERGY SINK**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia de
Produção da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Angelo Marcelo Tuset

PONTA GROSSA

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



DIM BASQUE PIRES

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA DE UM SISTEMA
APORTICADO ACOPLADO A UM DISSIPADOR DE ENERGIA NÃO LINEAR**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 01 de Setembro de 2023

Dr. Angelo Marcelo Tusset, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Giane Goncalves Lenzi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Tumolin Rocha, Doutorado - King Abdul Aziz University (Kau)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/09/2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa e para a conclusão desta dissertação de mestrado.

Primeiramente, quero agradecer a Deus por me guiar e fortalecer nos momentos mais necessários!

Quero agradecer meu ao meu orientador Ângelo Marcelo Tusset, pela orientação paciente, pelo apoio constante e pelos valiosos insights que foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Sua orientação me proporcionou uma base sólida para a abordagem e metodologia adotadas.

Agradeço também aos membros da banca examinadora por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho e fornecer comentários construtivos que ajudaram a aprimorá-lo.

Minha gratidão se estende à minha família, por encorajamento e apoio emocional, dedico minha mais profunda gratidão. Em especial agradecer minha esposa que me apoiou e incentivou nos momentos de desafio e foi essencial para manter minha motivação e foco.

Por fim, quero expressar minha gratidão a todos os professores, pesquisadores e autores cujo trabalho serviu como referência e inspiração para este estudo. Seus insights pavimentaram o caminho para a construção do conhecimento aqui apresentado.

Muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade o estudo matemático e computacional de um sistema de geração de energia elétrica por meio da utilização de materiais piezoelétricos acoplados em um sistema aporticado. Esse sistema é enquadrado na nomenclatura de coleta de energia, sendo a metodologia de geração de energia elétrica por meio de reaproveitamento de energias dissipadas por um sistema já existente, no caso deste trabalho a energia dissipada é em forma de vibração do sistema. O ponto de partida para este trabalho foi a necessidade mundial de encontrar meios sustentáveis de geração de energia, e a necessidade de armazenamento de eletricidade em sistemas de difícil acesso, como marca passo ou sondas isoladas, onde a manutenção se torna inviável, por isso a busca por meios de coleta de energia se tornou abrangente sendo um campo amplamente pesquisado na atualidade, então foi decidido analisar matematicamente e computacionalmente as variáveis do sistema aporticado. Foi realizada análise das variáveis para determinar qual tem maior influência na geração de energia do sistema e determinar o ponto ótimo matemático existente no range de pesquisa. A finalidade da pesquisa é determinar o ponto ótimo para geração de energia elétrica no sistema apontando qual variável é mais significativa e como ela influencia no sistema como um todo.

Palavras-chave: otimização; coleta de energia, piezoeletricidade.

ABSTRACT

The purpose of this work is the mathematical and computational study of an electric power generation system through the use of piezoelectric materials coupled to a porticoed system, this system is framed in the nomenclature of energy collection, being the methodology of electric power generation through reuse of energy dissipated by an existing system, in the case of this work the energy dissipated is in the form of system vibration. The starting point for this work was the world's need for electrical means of power generation, and the need to store electricity in systems that are difficult to access, such as pacemakers or serviced probes, where maintenance becomes impracticable, which is why the The search for means of energy collection has become comprehensive, being a field widely researched today, so it was decided to mathematically and computationally analyze the variables of the port system. It was performed to analyze the variables to determine which has the greatest influence on the system's energy generation and to determine the existing mathematical optimum point in the search interval. The purpose of the research is to determine the optimal point for generating electricity in the system, pointing out which variable is most significant and how it influences the system as a whole.

Keywords: optimization; energy harvesting; piezoelectricity.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Coef.	Coeficiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras Regulamentação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Cristalina Perovskita	21
Figura 2 - Efeito Direto	22
Figura 3 - Efeito Inverso.....	22
Figura 4: Modelo experimental construído por Gazeri.....	25
Figura 5: Sistema Não Ideal (NIS) e Não Linear de Captura de Energia Piezoelétrico.	25
Figura 6: Modelo matemático de um pórtico com material piezoelétrico acoplado em uma de suas colunas.	26
Figura 7: Representação do NIS sem controle acoplado.	27
Figura 8: Modelo Físico do Sistema (NIS).....	28
Figura 9: Pórtico com Controle Passivo (NES) acoplado.....	34
Figura 10: Representação Física do Modelo Apórtico com NES acoplado. ..	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Variação em $\varepsilon_1 = [0,01:2]$ versus $\varepsilon_2 = [1:10]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	39
Gráfico 2 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	40
Gráfico 3 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_3 versus x_4 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	41
Gráfico 4 - Variação em $\varepsilon_1 = [0,01:2]$ versus $\theta = [0,01:0,4]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	43
Gráfico 5 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	44
Gráfico 6 – Variação em $\varepsilon_1 = [0,01:2]$ versus $\Theta = [0,01:1,2]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 7 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	46
Gráfico 8 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	48
Gráfico 9 – Variação em $\varepsilon_1 = [0,01:2]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 10– (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	50
Gráfico 11 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_3 versus x_4 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	52
Gráfico 12 – Variação em $\varepsilon_2 = [1:10]$ versus $\theta = [0,01:0,4]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	53
Gráfico 13 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	54
Gráfico 14 - Variação em $\varepsilon_2 = [1:10]$ versus $\Theta = [0,01:1,2]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	56
Gráfico 15 - a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	57
Gráfico 16 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	59
Gráfico 17 – Variação em $\varepsilon_2 = [1:10]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	60
Gráfico 18 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	61
Gráfico 19 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_3 versus x_4 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT	63
Gráfico 20 – Variação em $\theta = [0,01:0,3]$ versus $\Theta = [0,01:0,8]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	64
Gráfico 21 – Variação em $\theta = [0,31:0,4]$ versus $\Theta = [0,81:1]$. (a) Teste 0-1. (b)	
Potência	65

Gráfico 22 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2. (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2. (c) Variação da tensão elétrica no PZT	66
Gráfico 23 – Variação em $\theta = [0,01:0,4]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência	67
Gráfico 24 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2. (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2. (c) Variação da tensão elétrica no PZT	68
Gráfico 25 – Variação em $\Theta = [0,01:1,2]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência	70
Gráfico 26 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2. (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2. (c) Variação da tensão elétrica no PZT	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problematização	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Justificativa	15
1.4	Estrutura da Tese	16
2	DESENVOLVIMENTO	17
2.1	Revisão da literatura	17
2.1.1	Geração de energia em macro escala	17
2.1.2	Geração de energia em micro escala	19
2.1.3	Coleta de energia	19
2.1.4	Piezoelasticidade e Material Piezoelétrico	20
2.1.5	Sistema de Captura de Energia	22
2.1.6	Modelo matemático	24
2.1.7	Equações de Movimento	27
2.1.8	Controle Passivo de Vibrações	33
2.1.9	Teste 0-1	36
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
3.1	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e ε_2	38
3.2	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e θ	42
3.3	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e Θ	45
3.4	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e ρ	49
3.5	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_2 e θ	53
3.6	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_2 e Θ	55
3.7	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_2 e ρ	60

3.8	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros θ e Θ	64
3.9	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros θ e ρ	67
3.10	Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros Θ e ρ	69
3.11	Análise dos resultados	72
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo essencial para o desenvolvimento tecnológico, crescimento da economia e melhoria da qualidade de vida da população. Os combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, ainda são a fonte mais utilizada para a produção de energia elétrica. No entanto, o uso de combustíveis fósseis está relacionado com o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, que são responsáveis por problemas ambientais como poluição do ar e mudanças climáticas (ALVAREZ *et al.*, 2017; CAO *et al.*, 2017).

Uma tecnologia promissora que contribui para a produção de energia elétrica de forma sustentável é a coleta de energia, que consiste na captura de energia desperdiçada ou não utilizada do ambiente. A energia é capturada de diversas fontes disponíveis no ambiente, como solar, vento, vibração, calor, fluxo de água, entre outras. Dessa forma, a coleta de energia limpa e renovável é uma alternativa sustentável e contribui para aliviar os impactos ambientais que são gerados da produção de energia a partir de combustíveis fósseis (LIMA, 2012.).

Desde a sua descoberta, os materiais piezoelétricos, que pertencem ao grupo das cerâmicas ferroelétricas, têm sido aplicados em tecnologias avançadas nas mais diversas áreas, um exemplo é a coleta de energia, pois estes materiais são capazes de sentir e coletar vibrações (EIRAS *et al.*, 2016; VALLEM *et al.*, 2021).

Tais materiais apresentam piezoelectricidade, que é a capacidade de converter vibrações mecânicas em tensão elétrica. O processo onde a energia elétrica é obtida a partir de uma tensão mecânica aplicada no material é denominado efeito piezoelétrico direto. Em contrapartida, o processo em que ocorre deformação mecânica no material como resultado de uma tensão elétrica aplicada, é conhecido como efeito piezoelétrico indireto (LAY *et al.*, 2021; QUIAN *et al.*, 2020).

Na coleta de energia, os coletores capturam e armazenam a energia para ser utilizada em dispositivos eletrônicos, cuja demanda está em ascensão nos últimos tempos, e por esta razão, há preocupações acerca do fornecimento de energia a estes dispositivos. A duração das baterias é limitada e a recarga ou substituição delas pode ser difícil em alguns casos, fato que traz limitações ao uso destes dispositivos.

Diante disso, os coletores de energia se apresentam como uma solução eficiente e ecológica a este desafio (AKIN-PONNLE *et al.*, 2022; JI *et al.*, 2018). Há vários sistemas de coleta de energia, como sistemas piezoelétricos, triboelétricos,

hermoelétricos, piroelétricos, fotovoltaicos e sistemas de captação de energia baseados na evaporação da água (RYU *et al.*, 2019).

1.1 Problematização

Como são fontes não renováveis, os combustíveis fósseis são recursos finitos e há estimativas de que as reservas disponíveis não serão suficientes para satisfazer a demanda global em meados do século XXI (STRIELKOWSKI *et al.*, 2021). A preocupação com a segurança energética e proteção ambiental realçou a importância e necessidade de produzir energia elétrica a partir de fontes renováveis, como hídrica, solar, eólica, biomassa e geotérmica (CHE; LE, 2022; BEHROUZI *et al.*, 2016).

Neste contexto, esta dissertação tem como foco principal o estudo da utilização de materiais com características piezoelétricas para micro geração de energia. O trabalho visa utilizar a energia dissipada por meio de vibrações e transforma-la em energia elétrica, no intuito de suprir as demandas crescente por sistemas autoalimentados oriundos da propagação dos dispositivos que fazem parte do movimento *Internet of Things* (IoT). Que são aparelhos e dispositivos interconectados entre si por meio de sinais de internet, porém nem sempre contam com fonte de energia próxima para estar alimentando, tornando assim mais necessária a micro geração local de energia, a fim de diminuir a necessidade por baterias mais potentes e a manutenção destas baterias.

Para realização deste estudo, foi considerado um modelo matemático que descreve um sistema aporcado, que conta com um motor em trabalho contínuo contando uma massa desbalanceada para que o sistema trabalhe em uma faixa de vibração mais específica.

Entre os métodos de coleta de energia, o presente trabalho optou pela utilização do método de coleta vibracional por meio de materiais piezoelétricos. Segundo Koga *et al.* (2017) as pesquisas sobre coletores de energia por vibração despertam grande interesse e são amplamente citadas na literatura. Shi *et al.* (2018) afirmam que a coleta de energia vibracional por materiais piezoelétricos possui como vantagens a sua configuração, a eficiência de conversão eletromecânica e a potência de saída.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar a utilização de materiais com características piezoelétricas para micro geração de energia em sistemas apertados.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Determinar a eficiência do sistema propostos por meio de simulações numéricas, utilizando o software Matlab;
- Utilizar técnicas de controle passivo para melhorar a coleta de energia no sistema estudado;
- Analisar como o sistema se comporta utilizando massas com valores diferentes para o sistema de controle passivo.

1.3 Justificativa

Considerando que os dispositivos eletrônicos que utilizam tais fontes de energia estão entre os que mais promovem a inovação tecnológica, como por exemplo os dispositivos da *Internet of Things* (IoT). são essenciais para controlar e coletar informações. Eles são aplicados nas mais diversas áreas, como biomedicina e saúde, meio ambiente, segurança pública e indústria. Assim, a demanda por eletrônicos dispositivos tem aumentado recentemente, por isso há preocupações sobre o fornecimento de energia para esses dispositivos.

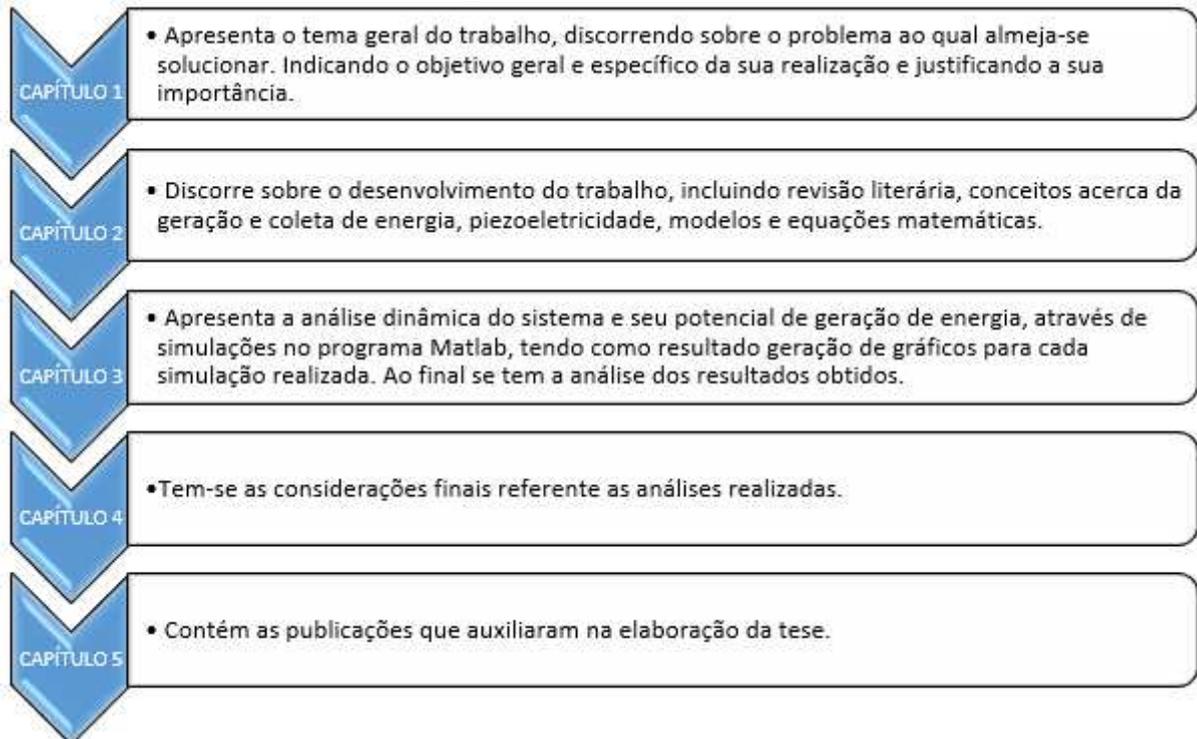
E levando em consideração que a Engenharia de Produção detém as áreas do conhecimento para contribuir e alavancar essas inovações, tais como: Pesquisa operacional principalmente no que diz respeito a Modelagem, Simulação e Otimização para tomada de decisões.

Com respeito ao Desenvolvimento Sustentável (ODS), cabe destacar que este trabalho atende ao objetivo “Energia Limpa e Acessível”, pois considera a produção de energia por meio de fontes renováveis e sem impacto ambiental; “Indústria, Inovação e Infraestrutura

1.4 Estrutura da Tese

A elaboração deste trabalho utilizou-se de métodos específicos para que fosse possível: delimitar o problema, realizar as observações e interpretá-las com base nas relações encontradas, fundamentar-se nas teorias existentes e alcançar o propósito final.

Fluxograma 1 - Estrutura da Tese



Fonte: Autor (2023)

2 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção será apresentada a revisão da literatura já consolidada, sobre o método utilizado para realizar as análises e o sistema estudado.

2.1 Revisão da literatura

Para entender melhor o grande aumento nas pesquisas de geração de energia elétrica, precisamos entender o contexto de macro geração, ou seja, a geração de energia para grandes demandas, como é o caso de hidroelétricas, que foi o precursor desse tipo de pesquisa. Para que assim possamos correlacionar a energia presente em todo no nosso dia a dia com a internet das coisas e a micro geração de energia, que serve entre outros motivos para aumentar a vida útil de baterias.

2.1.1 Geração de energia em macro escala

Devido aos incentivos o panorama energético do Brasil vem se transformando ao decorrer das décadas, pois com a pressão mundial para a busca de meios mais sustentáveis e o risco da utilização de uma matriz que depende muito de um só recurso como é o caso das hidroelétricas, fez com que fossem diversificadas as fontes geradoras brasileiras, como a utilização de campos eólicos e painéis solares (CUNHA *et al.*, 2017).

Segundo Rodrigues (2019), com o crescimento na demanda de energia elétrica e as preocupações com os problemas ambientais, países e empresas buscam a sustentabilidade energética para garantir um futuro mais competitivo. Nesse cenário é necessário se atentar aos tipos de fontes de energia disponíveis.

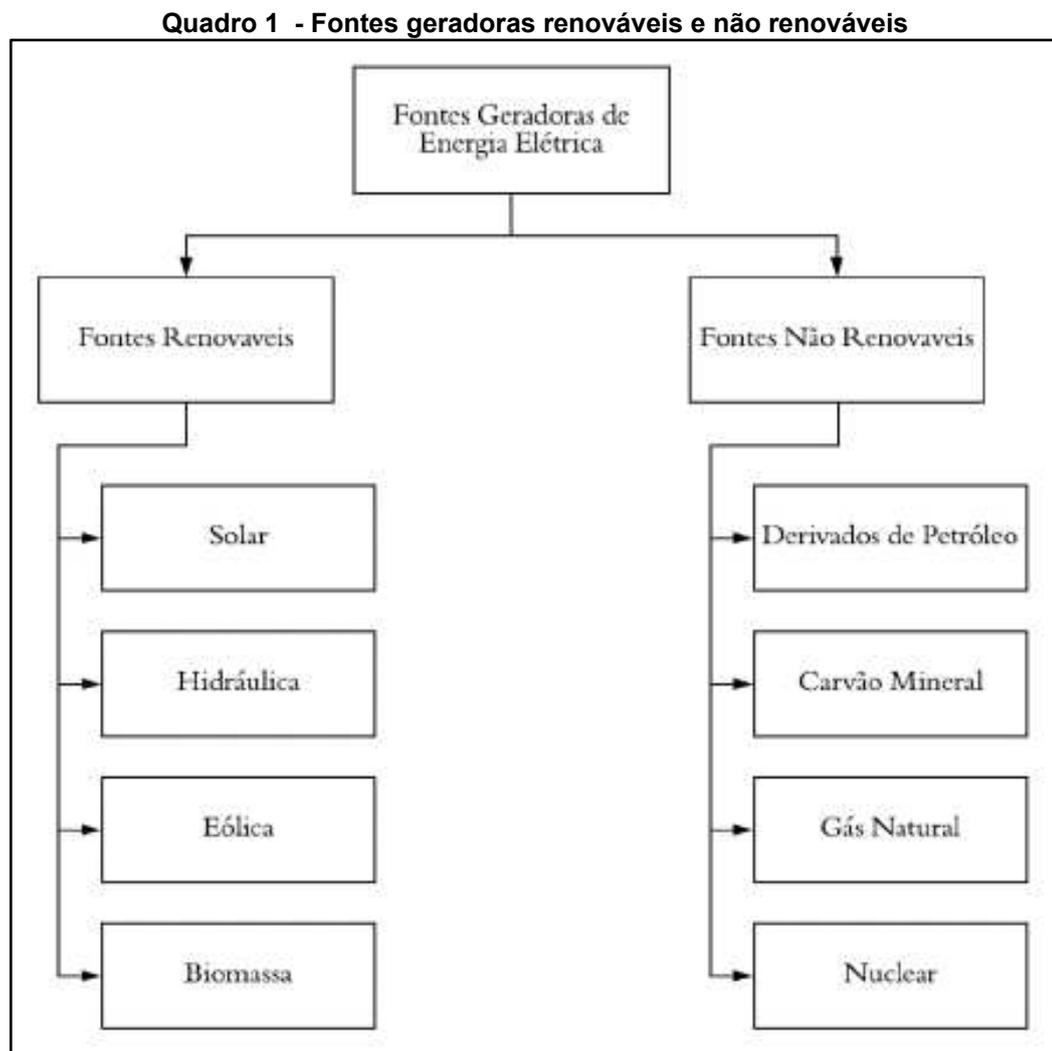
Além de ser necessário a análise de viabilidade para a implantação de um sistema, como o caso da energia eólica que depende diretamente da incidência de ventos, é necessário fazer uma análise socioeconômica, para garantir que todos os pilares da sustentabilidade sejam atendidos (CUNHA *et al.*, 2017).

A utilização de energias renováveis por empresas, deve ser vista como parte da estratégia empresarial, pois possibilita a utilização de marketing sustentável, fazendo com que a imagem da empresa seja mais atrativa a vários nichos no mercado mundial, ao mesmo tempo que reduzem seus custos operacionais (VASCONCELOS *et al.*, 2018).

As fontes geradoras de energia dividem-se em dois principais tipos, sendo eles fontes renováveis e não renováveis (BARBOSA; AZEVEDO, 2013).

Para que as empresas tenham um melhor marketing sustentável, é necessário que utilizem fontes renováveis e façam relatórios de sustentabilidade (VASCONCELOS *et al.*, 2018).

É possível observar no Quadro 1 as principais fontes geradoras renováveis e não renováveis segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018).



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Conforme visto no Quadro 1, existem meios sustentáveis para a produção de energia elétrica em escala macro que podem ser utilizados também em micro escala, como é o caso da energia solar e eólica. Porém em algumas situações se tornam inviáveis devido à falta de espaço ou algum outro limitador que impeça a produção de

energia por meios mais comuns, como o caso de sistemas embarcados, sensores submersos, marcapassos, entre outros.

2.1.2 Geração de energia em micro escala

A geração de energia elétrica em microescala é necessária quando existem sistemas isolados que não tem acesso a rede convencional. Sendo necessário utilização de baterias e ou geradores locais, esta característica pode ser observada mais comumente nos dias atuais devido a IoT (Internet of Things) com aparelhos interconectados por redes de comunicação sem fio e que por sua vez necessitam de baterias para serem alimentados. (KHAN *et al.*, 2021).

Segundo Wang (2021) atualmente devido ao grande uso de dispositivos no nosso dia a dia, vem se tornando cada vez mais necessário a utilização de baterias com maior duração de carga. Uma estratégia para a suprir esta necessidade é a utilização de micro sistemas geradores de energia elétrica.

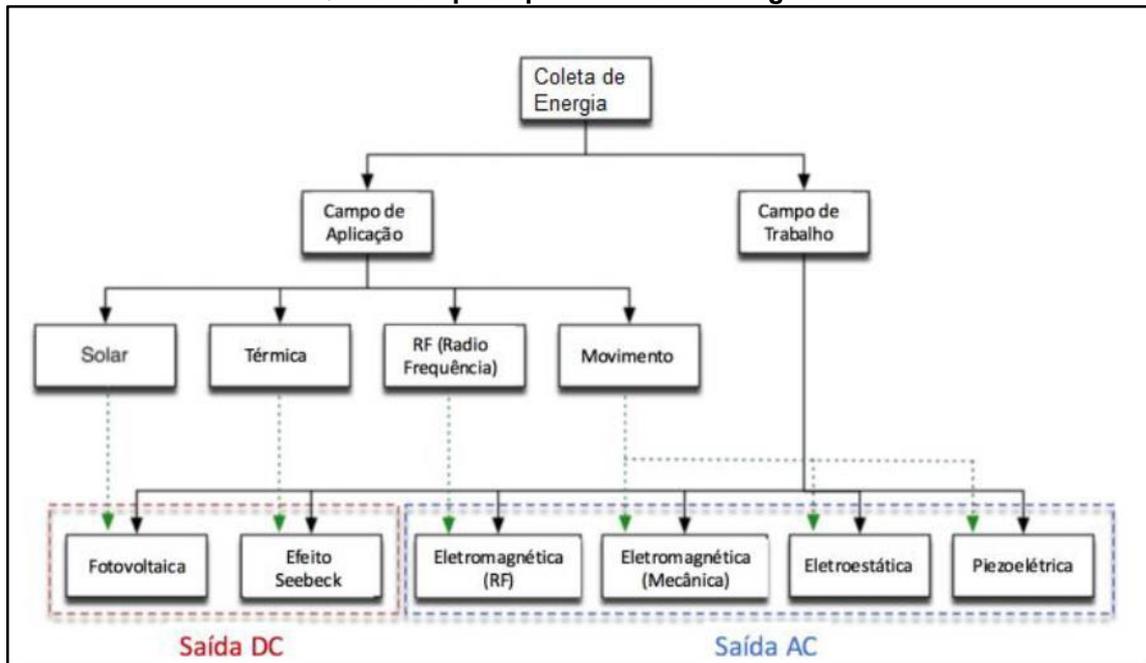
Um dos sistemas de micro geração de energia elétrica estudados atualmente é a Coleta de Energia (Energy Harvesting).

2.1.3 Coleta de energia

O termo coleta de energia é utilizado para classificar um sistema que coleta pequenas quantidades de energia do ambiente e transforma em energia elétrica para alimentar sistemas que tem um baixo consumo (ELVIN; ERTURK, 2013).

Existem vários métodos de coleta de energia, tais como coleta de energia mecânica, térmica, ondas eletromagnéticas, entre outras (ELVIN; ERTURK, 2013). É possível observar no Quadro 2, os princípios de coleta energética, onde eles são aplicados e qual tipo de corrente elétrica eles fornecem, corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC).

Quadro 2 - princípios de coleta energética



Fonte: Adaptado de Moraes *et al.* (2014)

Uma característica muito importante é que, quando não se pode utilizar alimentação por meio de fios e existe a necessidade da utilização de sistemas que utilizam acumuladores eletroquímicos, como pilhas ou baterias, que devido a possuírem um tempo de vida limitado, necessitam de substituição, algo que pode ser muito oneroso e também arriscado, como no caso de dispositivos implantados no corpo (RANGEL, 2014). Para estes casos a geração de energia por materiais piezoelétricos tem se mostrado promissor (ILIUK, 2016).

2.1.4 Piezoeletricidade e Material Piezoelétrico

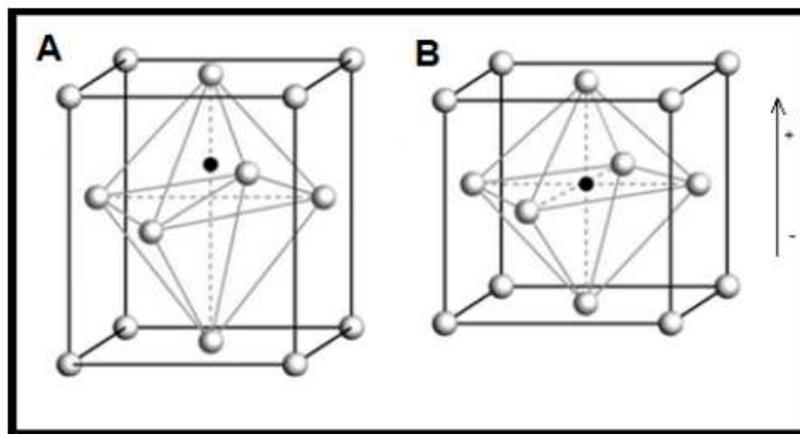
Segundo Pereira (2010), a piezoeletricidade é baseada na capacidade de alguns materiais de gerarem cargas elétricas quando submetidos a uma deformação mecânica. Isto ocorre, pois estes materiais pertencem ao grupo das cerâmicas denominado materiais ferroelétricos.

Os materiais ferroelétricos possuem estrutura cristalina do tipo Perovskita que pode ser encontrada na natureza, nos materiais quartzos, além da possibilidade de síntese em laboratório, como os cristais cerâmicos criados a base de titânio de chumbo ($PbTiO_3$) e zirconato de chumbo ($PbZrO_3$).

As cerâmicas piezoelétricas possuem estrutura cristalina do tipo Perovskita, que dependendo da temperatura em que o material se encontra, podem apresentar simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples (JAFJE, 1971).

Segundo Jaffe (1971), quando a temperatura é inferior a temperatura crítica, também conhecida como temperatura de Curie, a estrutura cristalina Perovskita apresenta simetria tetragonal, onde o centro de simetria das cargas positivas e negativas não coincidem, dando origem a um dipolo elétrico, como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura Cristalina Perovskita
A) Temperatura inferior a crítica. B) Temperatura superior a crítica.



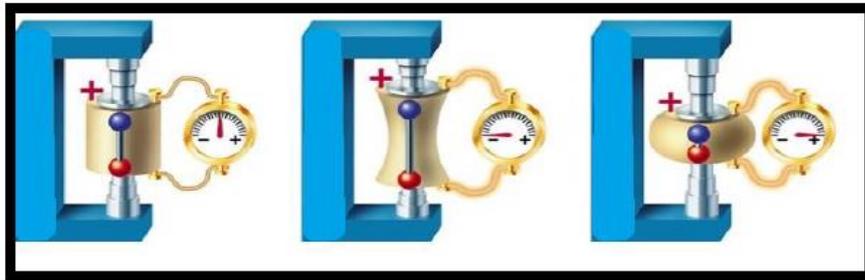
Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Devido a este dipolo, é possível observar 2 tipos de efeitos piezoelétricos, que possuem muitas aplicações na área de engenharia, tanto para geração de energia, quanto para controle de sistemas (PEREIRA, 2010).

Segundo Jaffe (1971) existem 2 tipos de efeito piezoelétrico, sendo eles:

Efeito direto, que se caracteriza quando uma força mecânica atua sobre o material e este por sua vez gera um dipolo elétrico produzindo energia elétrica, como pode ser observado na Figura 2.

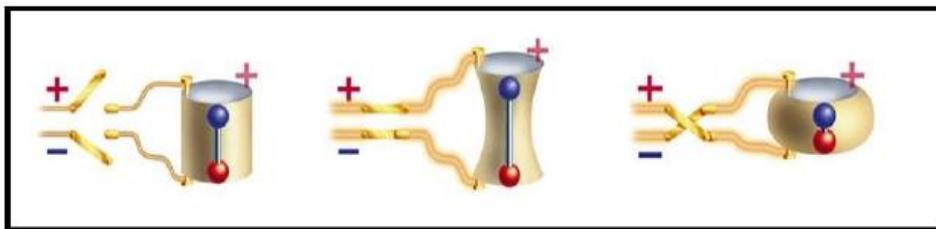
Figura 2 - Efeito Direto



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Efeito inverso, que se caracteriza quando uma tensão elétrica é aplicada ao material, fazendo com que ele se deforme mecanicamente dependendo do tipo da tensão, gerando assim energia mecânica, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Efeito Inverso



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Os materiais que mostram piezeletricidade estão amplamente disponíveis em muitas formas, podendo ser naturais ou artificialmente produzidas, como um exemplo podemos citar: cristal de quartzo, cana de açúcar, sal de Rochelle.

Também os materiais que mostram piezeletricidade são os materiais piezocerâmicos, como por exemplo o titanato zirconato de chumbo PZT, $PbTiO_3$, compósitos como $BaTiO_3$, as películas finas produzidas através de um processo de pulverização de óxido de zinco ZnO sobre uma tela para impressão de filmes finos baseados em pós piezocerâmicos, assim como os polímeros tais como polyvinylidene fluoride (PVDF) e material nanoestruturado (ROCHA, 2016).

2.1.5 Sistema de Captura de Energia

Segundo Williams e Yates (1996), o princípio da captura da energia cinética é que a energia elétrica é gerada através do movimento ou a deformação física de uma estrutura que faz parte de um sistema de captura de energia. Deste modo, o

deslocamento ou deformação física pode ser convertida em energia elétrica por meio de métodos de transdução da energia de vibrações, como: piezoelétrico, eletrostático, eletromagnético, entre outros. Cada método alcança níveis diferentes de eficiência, dependendo do tipo de escala de tamanho e frequência de vibração a que é submetido (PRIYA; INMAN, 2009).

De acordo com Priya e Inman (2009), dentre os modelos mais estudados na área de coleta de energia, destaca-se os que utilizam de materiais piezoelétricos como forma de converter energia mecânica em energia elétrica. Nesta direção o sistema que mais vindo sendo analisado é a viga em balanço (cantilever), uma das estruturas preferidas para a conversão de energia cinética em energia elétrica.

Segundo Dutoit e Wardle (2007) este tipo de estrutura pode ter uma ou as duas superfícies da viga cobertas por uma película de material piezoelétrico, sendo esta última configuração é dita ser do tipo bimorph, uma das mais estudadas na literatura.

Geralmente em sistemas de captura de energia piezoelétrico, a estrutura é planejada de forma a ser flexionada com a vibração do ambiente ou do próprio sistema em si. Assim, a película de material piezoelétrico é comprimida e ocorre a conversão de energia, (COTTONE; VOCCA; GAMMAITONI, 2009).

Segundo Jalili (2010) na Coleta de Energia (Energy Harvesting) por meio de materiais piezoelétricos afixados em sistemas mecânicos que apresentam vibração, um dos principais aspectos é que o sistema apresenta um melhor desempenho, na coleta de energia, quando é excitado em sua frequência natural. Quando há alteração nesta frequência para fora da faixa natural, ocorre uma redução significativa na potência capturada.

Ao longo dos anos, muitos estudos vêm sendo realizados no intuito de aumentar a faixa de frequência desse tipo de sistema, melhorando assim a operação com os materiais piezoelétricos.

Conforme DuToit e Wardle (2007) demonstrou, às leis constitutivas dos materiais piezoelétricos apresentam uma forte dependência entre a tensão (esforço mecânico) aplicada e o campo elétrico desenvolvido. Para descrever melhor o sistema de captura de energia é necessário compreender o papel das não linearidades piezoelétricas no acoplamento eletromecânico, durante o processo de design (TRIPLETT; QUINN, 2009).

Com isso, a previsão da potência elétrica de saída pode ser melhorada e o desempenho do sistema pode ser otimizado.

De acordo com o trabalho proposto por Stanton, McGehee e Mann (2010) com a imposição de não linearidades nos sistemas de captura do tipo viga engastada em balanço, detectou que a principal vantagem da inclusão das não linearidades nos sistemas de captura de energia é a capacidade de conversão de energia sobre uma ampla faixa de frequência das vibrações.

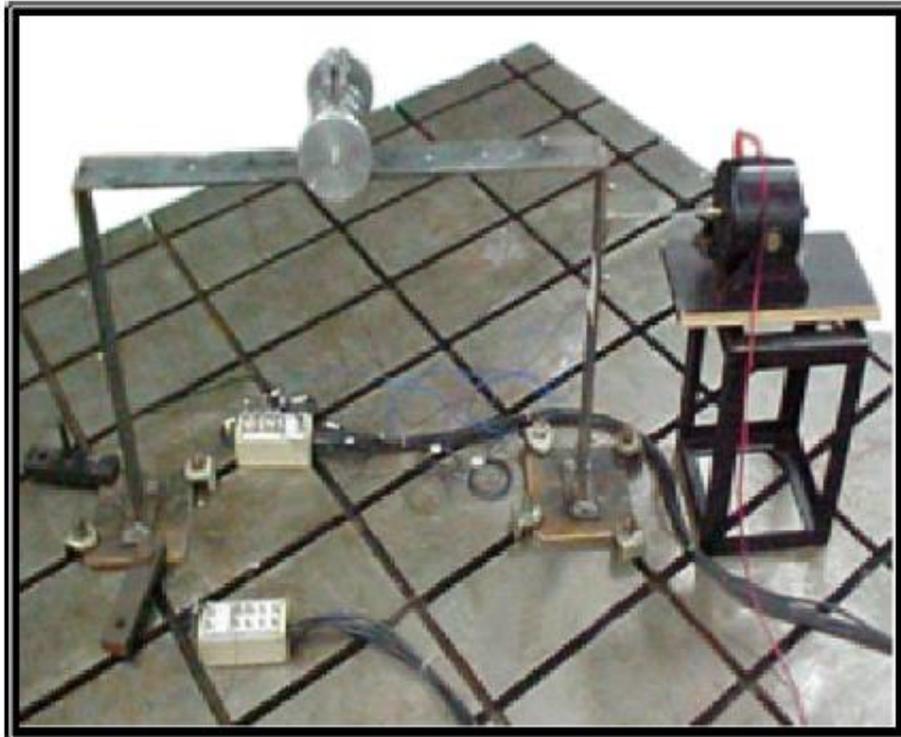
Um dos meios estudados, é a utilização de controles passivos para alterar o regime de vibração destes sistemas, fazendo assim atingir as faixas de vibração desejada. Dois métodos possíveis são: um subsistema acoplado com função absorvedor de energia com característica não linear, ou um pêndulo simples.

2.1.6 Modelo matemático

Neste trabalho, utilizou-se o estudo realizado por Iliuk (2016) para propor um sistema absorvedor de energia com característica não linear, do inglês Nonlinear Energy Sink (NES), porém com intuito de capturar esta energia e armazená-la em baterias para uso em outras funcionalidades.

O modelo foi aqui estudado é uma estrutura aporticada que, inicialmente foi construído por Garzeri (2001), como pode ser observado na Figura 4. Para realizar o experimento, foi necessário um motor de Corrente Contínua (CC) com potência limitada para excitar o sistema, pois o mesmo necessita de uma excitação externa do tipo Não Ideal para que ocorra perturbação no sistema e acarrete em oscilações.

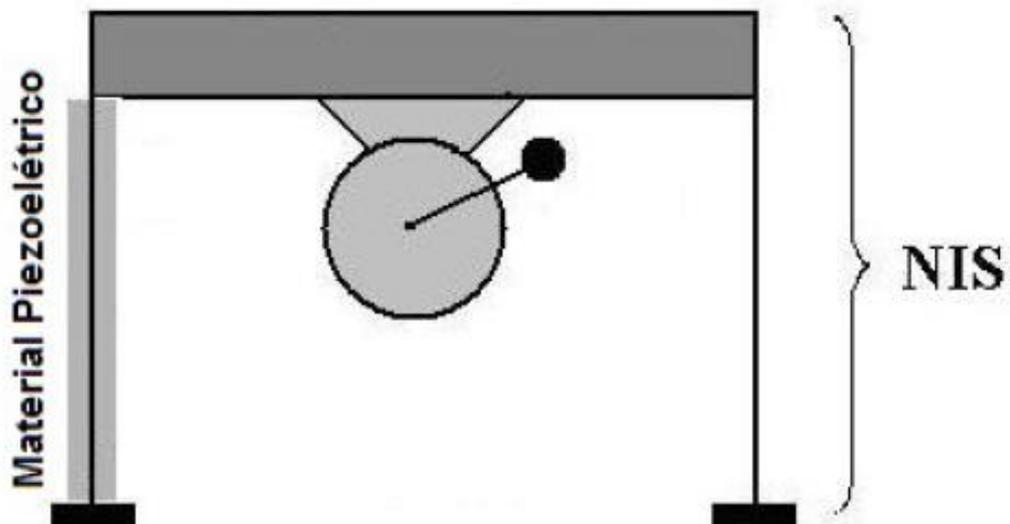
Figura 4: Modelo experimental construído por Gazeri.



Fonte: Garzeri (2001)

Pode se observar na Figura 5 o sistema de captura de energia piezoelétrico esquematizado, onde o sistema compreende as não linearidades inerentes do material utilizado.

Figura 5: Sistema Não Ideal (NIS) e Não Linear de Captura de Energia Piezoelétrico.



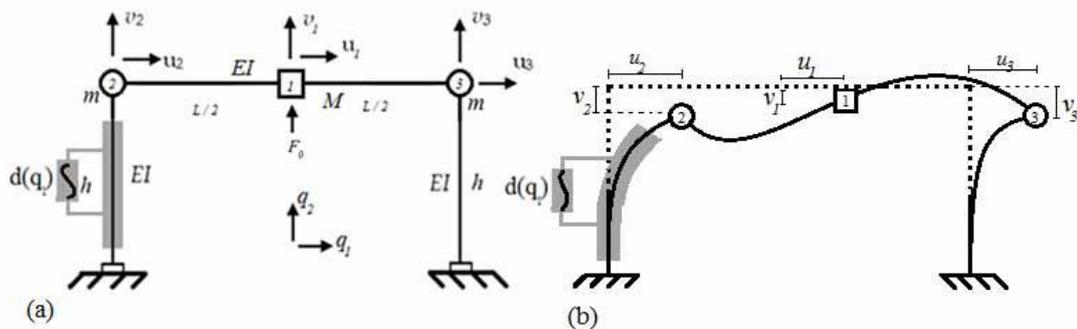
Fonte: Iliuk (2016)

Na Figura 6 tem-se um exemplo de como ocorrem os efeitos piezoelétricos nos materiais.

De acordo com Rocha *et al.* (2016), o desenvolvimento de técnicas de conversão de energia utilizando materiais piezoelétricos em estruturas do tipo aporticada tem merecido uma atenção especial de vários pesquisadores.

Em Rocha *et al.* (2018), Mook *et al.* (1985), Felix *et al.* (2018), e Rocha *et al.* (2016), é considerada a captação de energia piezoelétrica usando sistema aporticado simples de dois graus de liberdade excitado por um motor CC não ideal. A captação de energia foi realizada por meio de material piezoelétrico. A Figura 6 ilustra o sistema aporticado utilizado.

Figura 6: Modelo matemático de um pórtico com material piezoelétrico acoplado em uma de suas colunas.

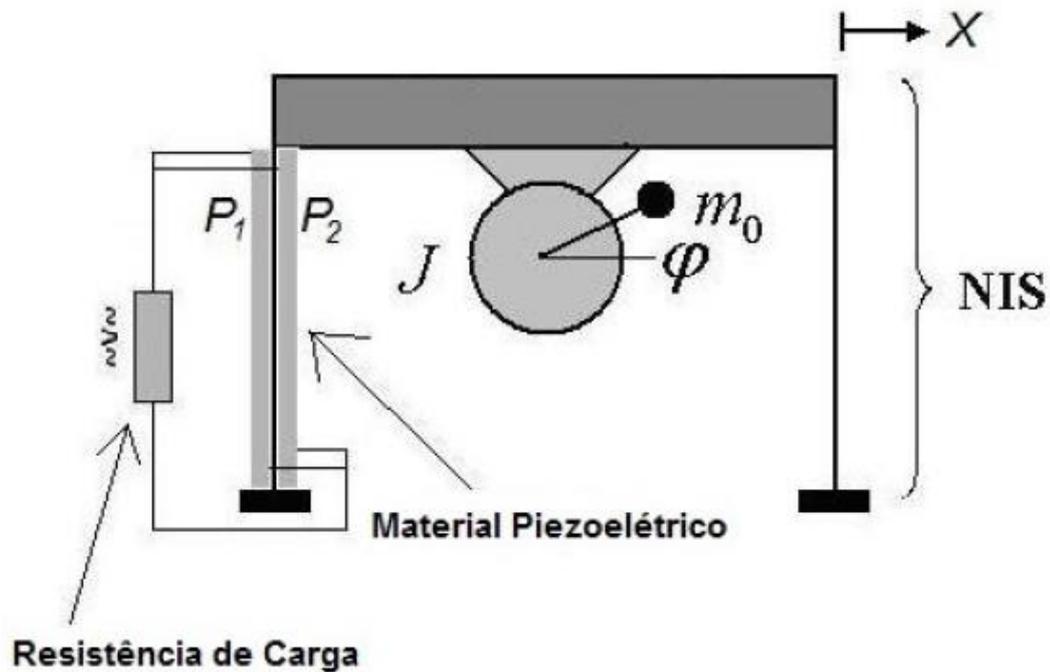


Fonte: Rocha *et al.* (2016)

O sistema não ideal proposto neste trabalho para captura de energia (energy harvesting), conforme modelo apresentado na Figura 7, foi concebido com base na estrutura aporticada não linear estudada por Brasil (1990).

O movimento horizontal da estrutura aporticada é considerado sob uma excitação não ideal devido a um motor elétrico de corrente contínua (CC) com uma massa desbalanceada que fornece potência limitada. Uma extensa análise sobre a teoria dos sistemas não-ideais foi realizada por (KONONENKO,1969).

Figura 7: Representação do NIS sem controle acoplado.



Fonte: Iliuk (2016)

Considerou-se a aplicação, em ambos os lados de uma das colunas da estrutura, das camadas de material piezoelétrico (piezocerâmico) em uma configuração conhecida na literatura como bimorph (DUTOIT; WARDLE, 2007). Os elementos piezoelétricos são conectados, por meio de eletrodos, a uma carga elétrica, como um resistor, por exemplo.

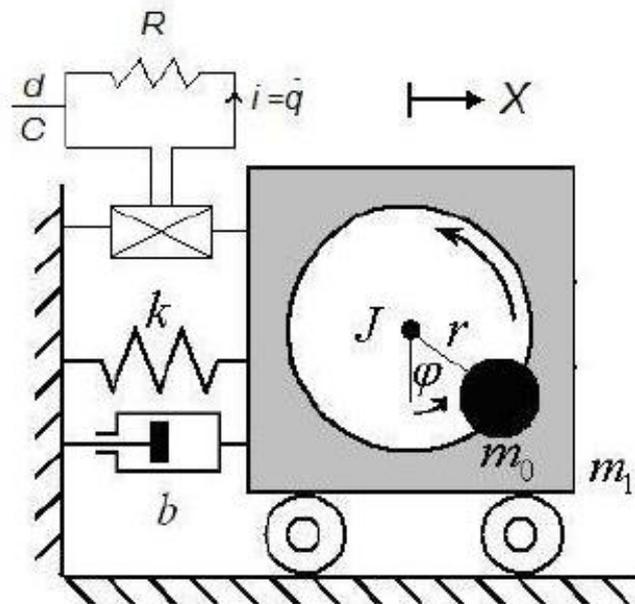
Utilizou-se o método das equações de Lagrange para obtenção das equações do movimento do sistema eletromecânico não linear, e o termo de acoplamento para o material piezoelétrico no conjunto de equações foi o mesmo defendido por Triplett e Quinn (2009).

Em seguida, adimensionalizaram-se as equações, para que fosse possível trabalhar com números puros. Na forma de espaço de estados, as equações foram simuladas numericamente, permitindo a avaliação dos resultados.

2.1.7 Equações de Movimento

O modelo físico de um sistema de captura de energia não ideal no presente trabalho encontra-se na Figura 8.

Figura 8: Modelo Físico do Sistema (NIS).



Fonte: Iliuk (2016)

O Sistema Não Ideal (NIS) consiste em uma massa desbalanceada m_0 , a massa da estrutura m_1 , da rigidez da mola k , do amortecimento linear b , do deslocamento horizontal do sistema $X(t)$, do deslocamento angular do rotor $\varphi(t)$, do momento de inércia J , da excentricidade r , onde $k = -k_l X + k_{nl} X^3$ representa a rigidez do sistema, tendo k_l como o coeficiente da mola linear e k_{nl} o coeficiente da mola não linear (mola cúbica).

De acordo com Tusset *et al.* (2013) o torque resistivo aplicado ao motor é representado pela função $H(\dot{\varphi})$ e o torque de acionamento da fonte de energia (motor) é representado por $L(\dot{\varphi})$.

As camadas de material piezoelétrico aplicadas são representadas por P_1 e P_2 . De acordo com Triplett e Quinn (2009), a carga elétrica desenvolvida no circuito acoplado é dada por q e o termo $\frac{d(x)}{C} q$ representa o acoplamento piezoelétrico do componente mecânico, com um coeficiente de acoplamento dependente da tensão mecânica aplicada $d(X)$.

Através do material piezoelétrico temos a tensão elétrica V representada pela Eq. 1, onde C representa a capacitância do material piezoelétrico em Farads (F). Pode-se definir então que a tensão elétrica como $V = -R\dot{q}$, em Volts (V), sendo R a resistência elétrica da carga em Ohms (Ω) e \dot{q} a corrente elétrica em Ampéres (A).

$$V = -\frac{d(X)}{C} X + \frac{q}{C} \quad (1)$$

Para que não houvesse perda nas principais características dinâmicas do sistema, foi necessário fazer a representação dos sistemas dinâmicos na forma de modelos matemáticos de equações diferenciais. Foi utilizado as equações de Lagrange para conseguir chegar nas equações considerando as energias do sistema.

A energia cinética do sistema é:

$$T = \frac{1}{2}(m_0 + m_1)\dot{X}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}m_0(\dot{X} - r\dot{\varphi}\sin\varphi)^2 + \frac{1}{2}m_0(\dot{X} - r\dot{\varphi}\cos\varphi)^2 \quad (2)$$

A energia potencial do sistema é:

$$V = \frac{1}{2}k_l X^2 + \frac{1}{4}k_{nl}X^4 + m_0 g r \sin\varphi \quad (3)$$

onde g é a aceleração da gravidade.

A equação de Lagrange é:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} = N_i \quad (4)$$

onde a função lagrangeana é $L = T - V$ e $i = 1; 2$ são os graus de liberdade.

Assim tem-se 2 graus de liberdade: $i = 1$, relacionado com o movimento horizontal da estrutura, e $i = 2$, relacionado com a rotação angular do motor.

Para $i = 1$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{X}} &= (m_0 + m_1)\dot{X} + m_0 r \dot{\varphi} \cos\varphi \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{X}}\right) &= (m_0 + m_1)\ddot{X} - m_0 r (\dot{\varphi}^2 \sin\varphi - \ddot{\varphi} \cos\varphi) \\ \frac{\partial L}{\partial X} &= -k_l X - k_{nl} X^3 \end{aligned} \quad (5)$$

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

Para $i = 2$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} &= J\dot{\varphi} + m_0 r^2 \dot{\varphi} + m_0 r \dot{X} \cos \varphi \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) &= (J + m_0 r^2) \ddot{\varphi} - m_0 r (-\ddot{X} \cos \varphi + \dot{X} \sin \varphi) \\ \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= m_0 r \dot{X} \dot{\varphi} \sin \varphi \\ N_2 &= L(\dot{\varphi}) - H(\dot{\varphi})\end{aligned}\tag{6}$$

Utilizando-se as equações de Lagrange, Eq.5 e Eq.6, obtêm-se as equações do movimento para o NIS:

$$\begin{aligned}(m_0 + m_1)\ddot{X} + b\dot{X} + k_l X + k_{ln} X^3 \\ = m_0 r (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) + \frac{d(X)}{C} q \\ (J + m_0 r^2) \ddot{\varphi} m_0 r \ddot{X} \cos \varphi = L(\dot{\varphi}) - H(\dot{\varphi}) \\ R\dot{q} - \frac{d(X)}{C} X + \frac{q}{C} = 0\end{aligned}\tag{7}$$

De acordo com Iliuk (2012) a função que define a fonte de energia não ideal pode ser definida como uma função exponencial ou como uma função linear, as quais representam as curvas características da relação entre o torque versus velocidade do motor de corrente contínua.

Então, pode-se considerar a função exponencial como apresentada na Eq. 8:

$$L(\dot{\varphi}) - H(\dot{\varphi}) = V_1 e^{-V_2 \dot{\varphi}}\tag{8}$$

A função que define a fonte de energia na forma linear é representada pela Eq. 9:

$$L(\dot{\varphi}) - H(\dot{\varphi}) = V_1 - V_2 \dot{\varphi}\tag{9}$$

onde V_1 está relacionado com a tensão aplicada à armadura do motor de corrente contínua, ou seja, um possível parâmetro de controle do problema, e V_2 é uma constante para cada modelo de motor CC considerado. A função linear foi utilizada nesta tese.

É possível tornar a Eq. 7 uma forma adimensional, introduzindo os seguintes parâmetros adimensionais, normalizando convenientemente as coordenadas e o tempo de acordo com Tusset *et al.* (2012).

$$\tau = \omega_1 t; x = \frac{rX}{\omega_1^2}; \omega_1 = \sqrt{\frac{k_l}{(m_0+m_1)}};$$

$$\alpha_1 = \frac{b}{(m_0+m_1)\omega_1}; \beta_1 = \frac{k_l}{(m_0+m_1)\omega_1^2}; \beta_3 = \frac{k_{nl}r^2}{(m_0+m_1)\omega_1^6};$$

$$\delta_1 = \frac{m_0\omega_1^2}{(m_0+m_1)}; \rho_1 = \frac{m_0r^2}{(J+r^2m_0)\omega_1^2}; \rho_2 = \frac{V_1}{(J+r^2m_0)\omega_1^2};$$

$$\rho_3 = \frac{V_2}{(J+r^2m_0)\omega_1}; v = \frac{q}{q_0}; \rho = RC \sqrt{\frac{k_l}{(m_0+m_1)}};$$

$$\hat{d}(x) = \left(\frac{r}{q_0}\right) d(r); \theta = \left(\frac{r}{q_0}\right) d_{lin}; \Theta r d_{nlin};$$

$$\hat{d}(x) = \theta(1 + \Theta|x|);$$

A função proposta por Triplett e Quinn (2009), $\hat{d}(x) = \theta(1 + \Theta|x|)$, representa o coeficiente piezoelétrico de acoplamento não linear adimensional, sendo dividido em uma parte linear (representada por θ) e uma parte não linear (representada por Θ).

Com isso, é possível reduzir as equações que regem o movimento, levando em consideração uma função linear para a fonte de excitação como a Eq. 9, obtendo-se assim a Eq. 10:

$$\begin{aligned}
x + \alpha_1 x' - \beta_1 x + \beta_3 x^3 - \theta(1 + \Theta|x|)v &= \delta_1 \varphi \operatorname{sen} \varphi + \delta_1 \varphi'^2 \cos \varphi \\
\varphi &= \rho_1 \cos \varphi x + \rho_2 - \rho_3 \varphi' \\
\rho v' &= \theta(1 + \Theta|x|)x + v
\end{aligned} \tag{10}$$

Usando-se novas variáveis, definidas como: $x_1 = x$; $x_2 = x'$; $x_3 = \varphi$; $x_4 = \varphi'$; $x_5 = v$; as equações podem ser reescritas na representação em forma de espaço de estados na Eq. 11:

$$\begin{aligned}
x'_1 &= x_2; \\
x'_2 &= \alpha_1 x_2 + \beta_1 x_1 - \beta_3 x_1^3 + \theta(1 + \Theta|x|)x_5 + \delta_1 \operatorname{sen}(x_3)x'_4 + \\
&\delta_1 \cos(x_3)x_4^2; \\
x'_3 &= x_4; \\
x'_4 &= \rho_1 \operatorname{sen}(x_3)x'_2 + \rho_2 - \rho_3 x_4; \\
x'_5 &= \frac{\theta(1 + \Theta|x_1|x_1)}{\rho} - \frac{x_5}{\rho};
\end{aligned} \tag{11}$$

Com a tensão elétrica previamente definida como $V = -R\dot{q}$, a energia capturada a partir do componente mecânico é $\frac{V^2}{R}$, fazendo com que a energia elétrica adimensional capturada a partir do sistema, conforme Priya e Inman (2009), seja dada pela Eq. 12:

$$P = \rho v'^2 \tag{12}$$

Para o cálculo da potência média, faz-se uso da integração da potência total obtida sobre o período, como demonstrado na Eq. 13.

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int P(\tau) d\tau \tag{13}$$

2.1.8 Controle Passivo de Vibrações

Neste capítulo é apresentado a estratégia de controle passivo para melhorar a eficiência da captura de energia elétrica do sistema não ideal (NIS).

Para utilizar a captura de energia como fonte de energia em aplicações reais, é necessário que o sistema mantenha constância, para que a captura seja realizada de forma uniforme. Sendo assim é possível utiliza-la para alimentação de microssores, biossores implantáveis, entre outros. Sendo assim, uma estratégia de controle é necessária para obter os resultados desejados.

Como possível solução para esse problema, a utilização de controles passivos pode melhorar a energia capturada, removendo o movimento caótico do sistema e mantendo a oscilação em uma órbita periódica estável. A principal vantagem da técnica de controle passivo é que esta elimina a necessidade de se utilizar qualquer componente eletrônico para controlar o sistema, havendo apenas um componente mecânico “massa” acoplado à estrutura principal.

Neste trabalho o controle passivo é obtido por meio de uma subestrutura não linear, totalmente passiva, com propriedades de dissipador não linear de energia, do inglês *nonlinear energy sink* (NES).

Segundo Vakakis *et al.* (2009), a transferência de energia, ou fenômeno do bombeamento de energia, do inglês *energy pumping*, que ocorre entre o oscilador principal e o NES, é empregada para alterar drasticamente a dinâmica do sistema primário ao qual o NES está acoplado.

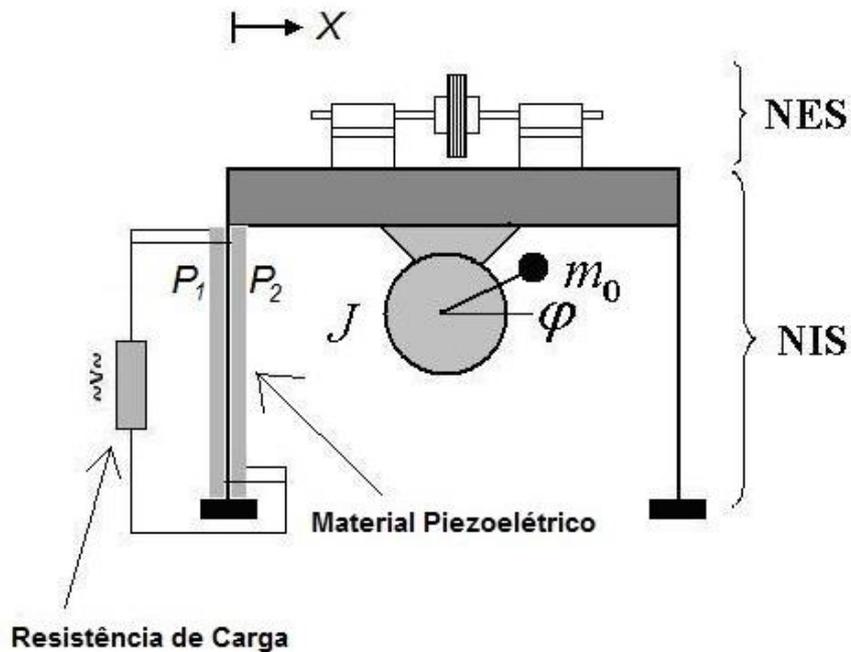
O NES possui a capacidade intrínseca de rápida localização da vibração ou choque aplicado ao sistema, e assim pode capturar ou dissipar essa energia. Isso permite utilizar o NES como uma poderosa estratégia de controle para um grande número de aplicações, como: isolamento de choque e vibrações, *energy harvesting* passivo, supressão de instabilidades aeroelásticas, entre outros.

Segundo Tusset *et al.* (2012) considerando que o NES não requer qualquer injeção de energia no sistema para controlar a estrutura o NES é uma estratégia eficaz de controle passivo.

O movimento horizontal da estrutura aporcada é considerado sob uma excitação não ideal, tendo acoplado ao oscilador principal um dissipador de energia

não linear (NES) na forma de um controlador passivo, como demonstrado na Figura 9.

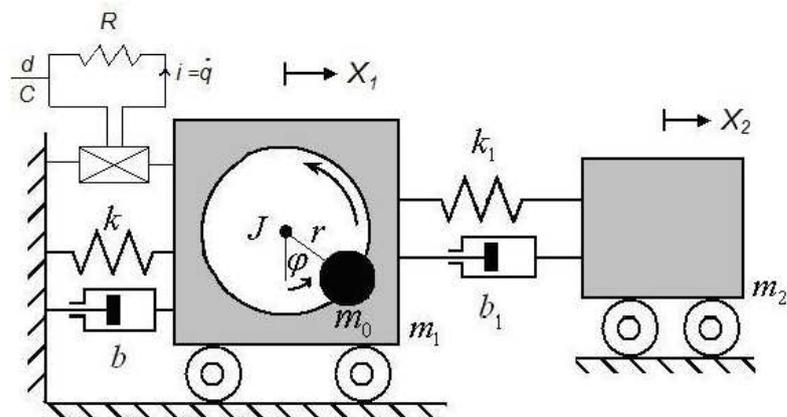
Figura 9: Pórtico com Controle Passivo (NES) acoplado.



Fonte: Iliuk (2016)

O modelo físico do sistema com o controle passivo na Figura 10 é representado pelo sistema não ideal (NIS), com o oscilador NES acoplado.

Figura 10: Representação Física do Modelo Aporticado com NES acoplado.



Fonte: Iliuk (2016).

O modelo matemático do sistema com controle é obtido a partir da Eq. 10, com a inclusão da massa do NES m_2 , da rigidez não linear k_1 , do amortecimento linear b_1 .

Considera-se o deslocamento $X_1(t)$ do NIS e o deslocamento do oscilador NES $X_2(t)$. Assim, as equações acopladas que regem o movimento do sistema são dadas pela Eq. 14.

$$\begin{aligned}
(m_0 + m_1)\ddot{X}_1 + b\dot{X}_1 + b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - k_l X_1 + k_{nl} X_1^3 + k_l(X_1 + X_2)^3 \\
= m_0 r (\ddot{\varphi} \sin(\varphi) + \dot{\varphi}^2 \cos(\varphi)) + \frac{d(X_1)}{C} q \\
m_2 \ddot{X}_2 - b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - k_l(X_1 + X_2)^3 = 0 \\
(J + r^2 m_0) \ddot{\varphi} - r m_0 \ddot{X}_1 \sin(\varphi) = V_1 - V_2 \dot{\varphi} \\
Rq - \frac{d(X_1)}{C} X_1 + \frac{q}{C} = 0
\end{aligned} \tag{14}$$

Introduzindo-se os seguintes parâmetros adimensionais e normalizando-se convenientemente as coordenadas e o tempo de acordo com Tusset *et al.* (2013),

obtem-se: $\tau = \omega_1 t$, $x = \frac{r X_1}{\omega_1^2}$, $z = \frac{r X_2}{\omega_1^2}$, $\omega_1 = \sqrt{\left(\frac{k_l}{(m_1 + m_0)}\right)}$, $\alpha_1 = \frac{b}{(m_1 + m_0) \omega_1}$, $\beta_1 = \frac{k_l}{(m_1 + m_0) \omega_1^2}$, $\beta_3 = \frac{k_{nl} r^2}{(m_1 + m_0) \omega_1^6}$, $\delta_1 = \frac{m_0 \omega_1^2}{(m_1 + m_0)}$, $\rho_1 = \frac{m_0 r^2}{(J + r^2 m_0) \omega_1^2}$, $\rho_2 = \frac{V_1}{(J + r^2 m_0) \omega_1^2}$, $\rho_3 = \frac{V_2}{(J + r^2 m_0) \omega_1}$, $\alpha_2 = \frac{b_1}{m_2 \omega_1}$, $\alpha_3 = \frac{k_1 r^2}{m_1}$, $\varepsilon_1 = \frac{m_1 b_1}{m_2 \omega_1}$, $\varepsilon_2 = k_1 r^2$, $v = \frac{q}{q_0}$, $\rho = \frac{RC}{\omega_1}$ e $d(X_1) = \theta(1 + \theta|x|)$.

Onde a variável de controle (e) depende diretamente da massa m_2 do NES. Reduzindo-se as equações que regem o movimento para a forma adimensional, obtém-se a Eq. 15:

$$\begin{aligned}
\ddot{x} - \beta_1 x + \alpha \dot{x} + \alpha_2(\dot{x} - \dot{z}) + \beta_3 x^3 + \alpha_3(x - z)^3 - \theta(1 + \theta|x|)v \\
= \delta_1 \ddot{\varphi} \sin \varphi + \delta_1 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi \\
\ddot{z} - \varepsilon_1(\dot{x} - \dot{z}) - \varepsilon_2(x - z)^3 = 0 \\
\ddot{\varphi} = \rho_1 \cos \varphi \ddot{x} - \rho_3 \dot{\varphi} + \rho_2 \\
\rho \dot{v} - \theta(1 + \theta|x|)x + v = 0
\end{aligned} \tag{15}$$

Usando-se as novas variáveis definidas como:

$$x_1 = x; x_2 = x'; x_3 = z; x_4 = z'; x_5 = \varphi; x_6 = \varphi'; x_7 = v$$

As equações podem ser reescritas na representação em forma de espaço de estados:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= \frac{1}{\Delta} \left(\beta_1 x_1 - \alpha_1 x_2 - \alpha_2 (x_2 - x_4) - \beta_3 x_1^3 - \alpha_3 (x_1 - x_3)^3 + \right. \\
 &\quad \left. + \theta(1 + \theta|x_1|)x_7 + \delta_1 \cos(x_5)x_6^2 + \delta_1 \sin(x_5)(-\rho_3 x_6 + \rho_2) \right) \quad (16) \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= \varepsilon_1 (x_2 - x_4) + \varepsilon_2 (x_1 - x_3)^3 \\
 \dot{x}_5 &= x_6 \\
 \dot{x}_6 &= \frac{1}{\Delta} \left(-\rho_3 x_6 + \rho_2 + \rho_1 \cos(x_5)(\beta_1 x_1 - \alpha_1 x_2 - \alpha_2 (x_2 - x_4) - \beta_3 x_1^3 - \right. \\
 &\quad \left. - \alpha_3 (x_1 - x_3)^3 + \theta(1 + \theta|x_1|)x_7 + \delta_1 \cos(x_5)x_6^2 \right) \\
 \dot{x}_7 &= (\theta(1 + \theta|x_1|)x_1 - x_7)/\rho
 \end{aligned}$$

2.1.9 Teste 0-1

O teste 0-1 que foi proposto por Gottwald e Melbourne (2006) sendo aplicado em séries temporais, com base nas propriedades estatísticas de uma única coordenada. Basicamente, o teste 0-1 consiste em estimar um único parâmetro K_c . O teste considera uma variável do sistema $x(j)$, onde duas novas coordenadas (p , q) são definidas como se segue em equações (6) a equação coordenada p e em equações (17) a equação coordenada q .

$$\begin{aligned}
 p(n, \bar{c}) &= \sum_{j=0}^n x(j) \cos(j\bar{c}) \\
 q(n, \bar{c}) &= \sum_{j=0}^n x(j) \sin(j\bar{c}) \quad (17)
 \end{aligned}$$

onde, $\bar{c} \in (0, \pi)$ é uma constante. O desvio quadrático médio das novas variáveis $p(n, \bar{c})$ e $q(n, \bar{c})$ é dado por:

$$M(n, c) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[(p(j+n, \bar{c}) - p(j, \bar{c}))^2 + (q(j+n, \bar{c}) - q(j, \bar{c}))^2 \right] \quad (18)$$

where, $n = 1, 2, \dots, N$

O parâmetro K_c pode ser obtido no limite de um tempo muito longo pela Eq. (19):

$$K_c = \frac{\text{cov}(Y, M(\bar{c}))}{\sqrt{\text{var}(Y) \text{var}(M(\bar{c}))}} \quad (19)$$

onde, $M(\bar{c}) = [M(1, \bar{c}), M(2, \bar{c}), \dots, M(n_{\max}, \bar{c})]$ e $Y = [1, 2, \dots, n_{\max}]$.

Dados dois vetores x ou y , a covariância $\text{cov}(x, y)$ e a variância $\text{var}(x)$ de n_{\max} elementos são geralmente definidos como (BERNARDINI et al., 2013):

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n_{\max}} \sum_{n=1}^{n_{\max}} (x(n) - \bar{x})(y(n) - \bar{y}) \quad (20)$$

$$\text{var}(x) = \text{cov}(x, x) \quad (21)$$

onde \bar{x} e \bar{y} são a média de $x(n)$ e $y(n)$, respectivamente. Como resultado final, obtém-se o valor do parâmetro K_c tomando a mediana de 100 valores diferentes do parâmetro $\bar{c} \in (0, \pi)$ na Eq. (18). Se o valor de K_c for próximo de 0, o sistema é periódico. Por outro lado, se o valor de K_c for próximo de 1, o sistema é caótico. Em

todas as simulações, foi usado $n = 10000$ e $j = \frac{n}{100}, \dots, \frac{n}{10}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentadas a análise dinâmica do sistema e seu potencial de geração de energia, considerando as variáveis de controle: ε_1 , ε_2 , θ , Θ e ρ .

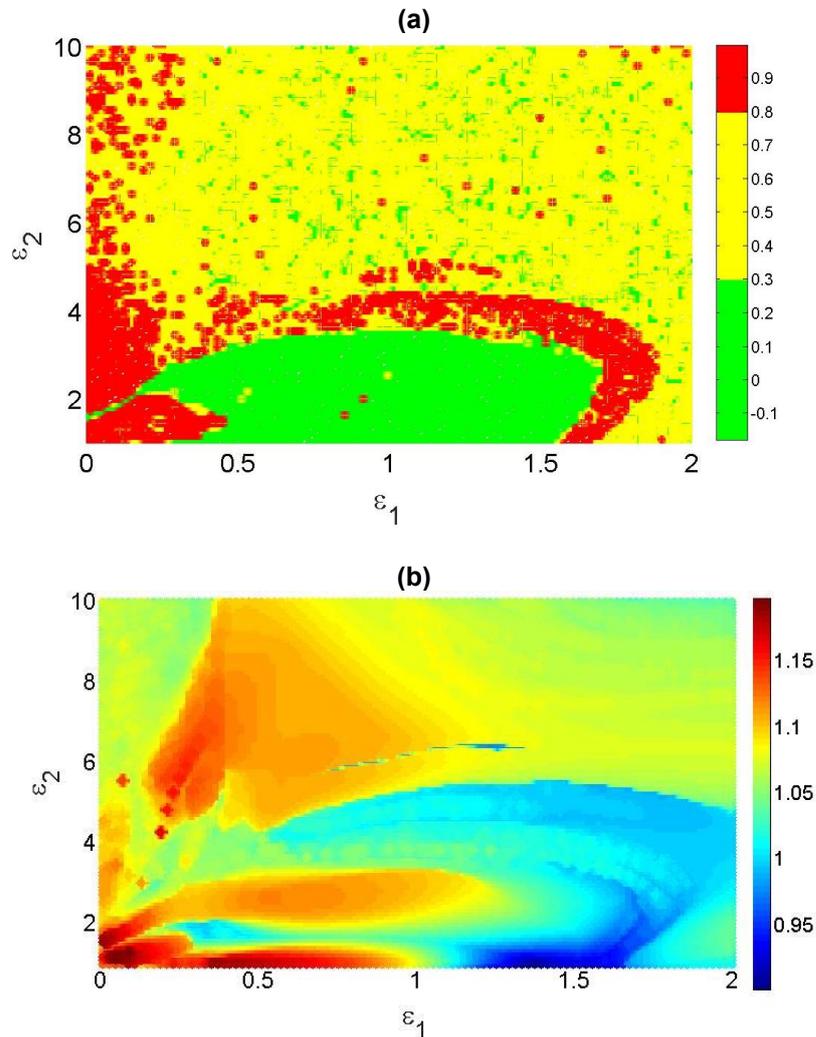
Para simulações numéricas é considerada a Eq. (3), método Runge-Kutta de 4ª ordem, com passo de integração ($h=0,01$), e parâmetros: $\alpha_1=0,1$, $\alpha_2=0,1$, $\alpha_3=0,5$, $\beta_1=1$, $\beta_3=0,2$, $\delta_1=8,373$, $\rho_1=0,05$, $\rho_2=100$, $\rho_3=200$, $\varepsilon_1=1$, $\varepsilon_2=5$, $\theta=0,20$, $\Theta=0,60$ e $\rho=1$.

Para a análise dinâmica são consideradas as variações de K_c do teste 0-1, conforme equação (9), sendo definido que o sistema tem comportamento caótico para $K_c \geq 0,8$, comportamento não definido para $0,3 \leq K_c \leq 0,79$, e periódico para $K_c < 0,3$. O cálculo da potência média considera a utilização da equação (4).

3.1 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e ε_2

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1=0,1$, $\alpha_2=0,1$, $\alpha_3=0,5$, $\beta_1=1$, $\beta_3=0,2$, $\delta_1=8,373$, $\rho_1=0,05$, $\rho_2=100$, $\rho_3=200$, $\varepsilon_1=[0,01:2]$, $\varepsilon_2=[1:10]$, $\theta=0,20$, $\Theta=0,6$ e $\rho=1$. No Gráfico 1 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 1– Variação em $\varepsilon_1 = [0.01:2]$ versus $\varepsilon_2 = [1:10]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.

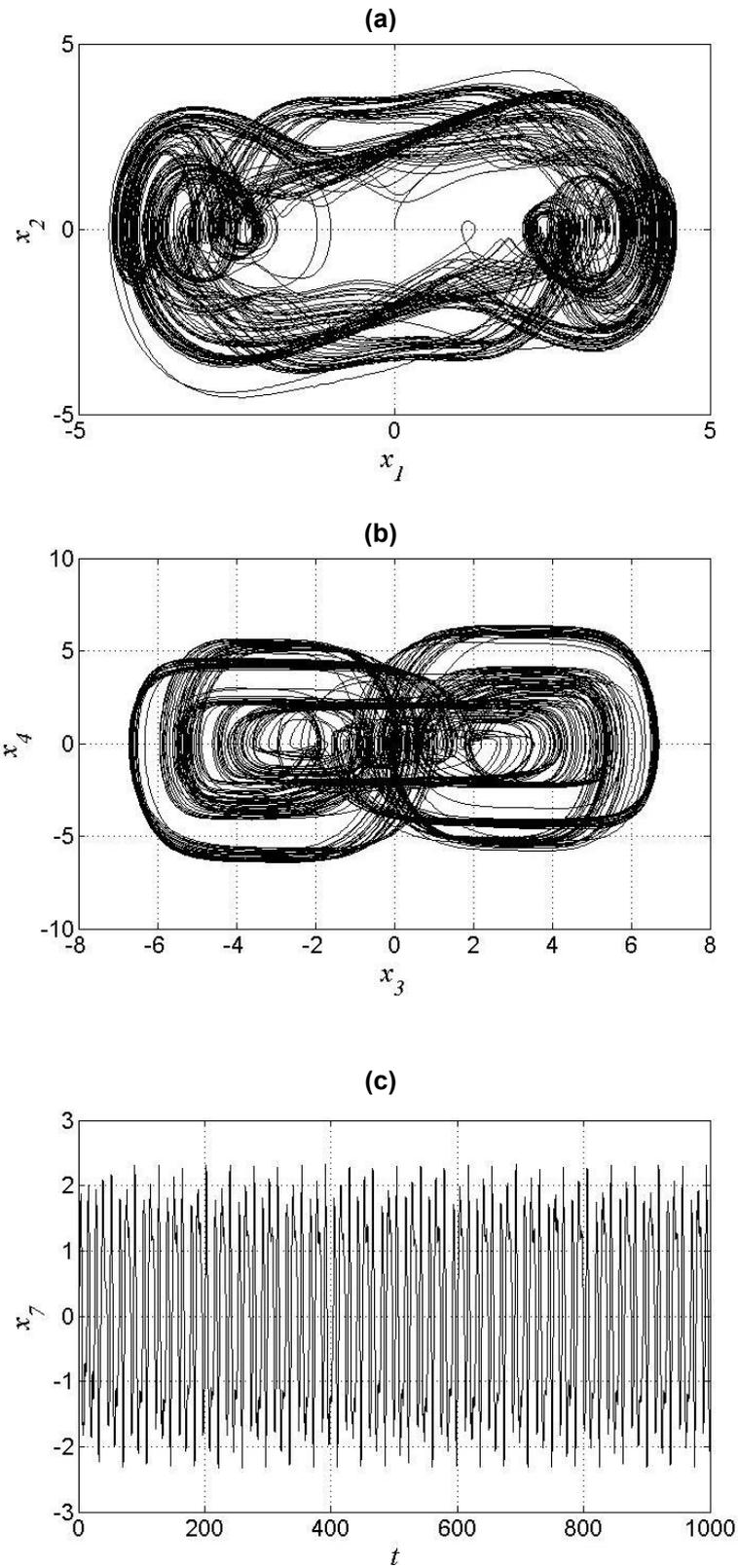


Fonte: Autor (2023)

Considerando os resultados apresentados no Gráfico 1, pode-se observar que conforme o têm-se o maior valor de geração de energia para o comportamento caótico e para variações de energia próxima do máximo em regiões em que o sistema tem comportamento periódico.

No Gráfico 2 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 1,198$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0,0502$, $\varepsilon_2 = 1,182$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 1,00$.

Gráfico 2 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.

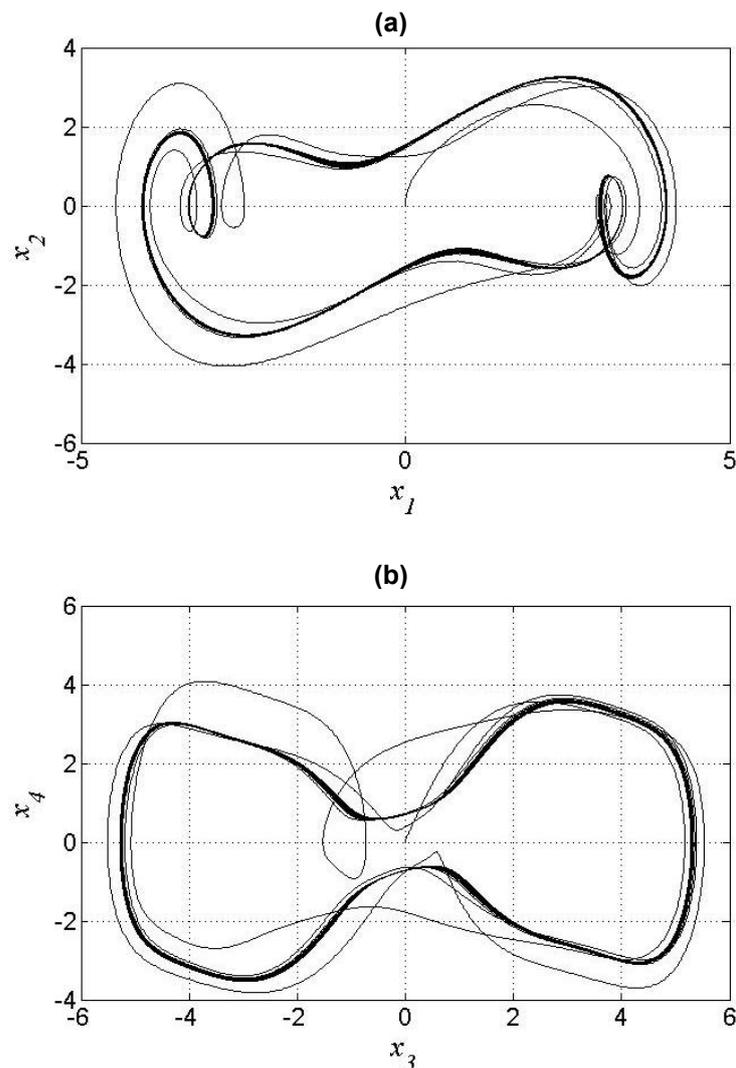


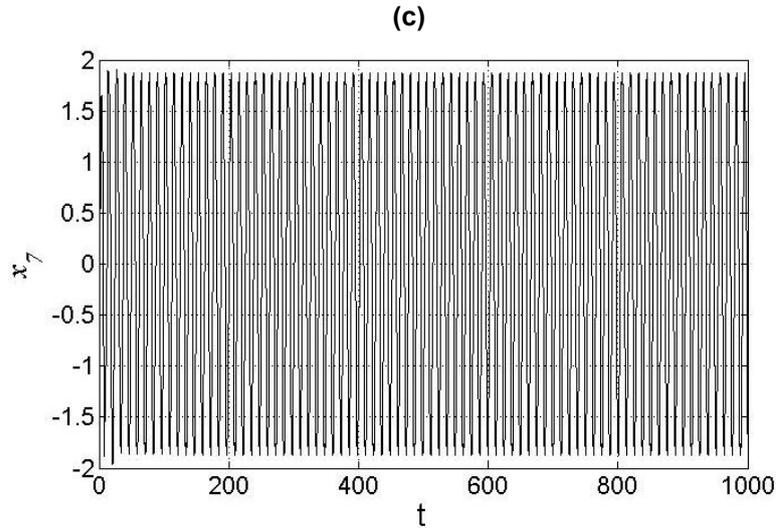
Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 2 fica evidente o comportamento caótico do sistema, e de acordo com o gráfico 1a, tem-se $K_c \approx 0,9892$, o que confirma o comportamento caótico.

No Gráfico 3 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com comportamento periódico $K_c \approx 0$, e com geração de energia $P_{avg} = 1,184$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0,3919$, $\varepsilon_2 = 1$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 1,00$.

Gráfico 3 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_3 versus x_4 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.





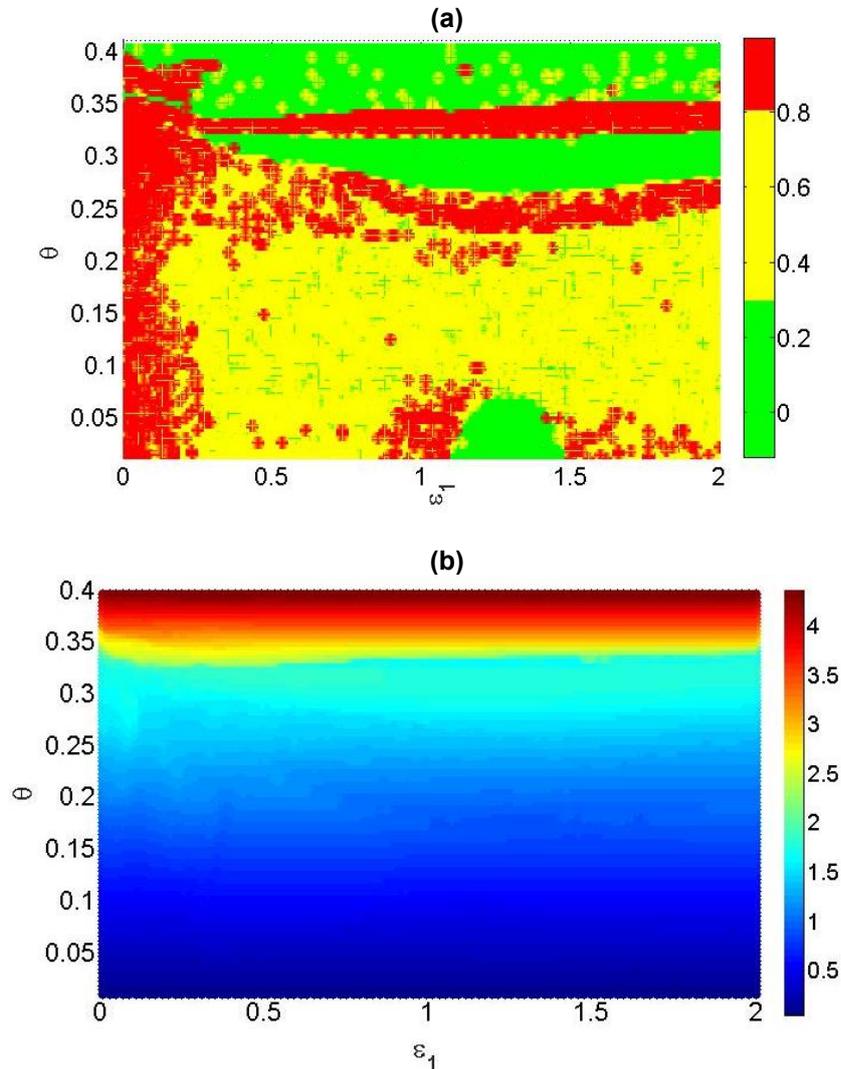
Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 3a fica evidente o comportamento periódico do sistema, e de acordo com o teste 0-1, tem-se $K_c \approx 0$, o que confirma o comportamento periódico.

3.2 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e θ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = [0,01:2]$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = [0,01:0,4]$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 1$. No Gráfico 4 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 4 - Variação em $\varepsilon_1 = [0,01 : 2]$ versus $\theta = [0,01 : 0,4]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.

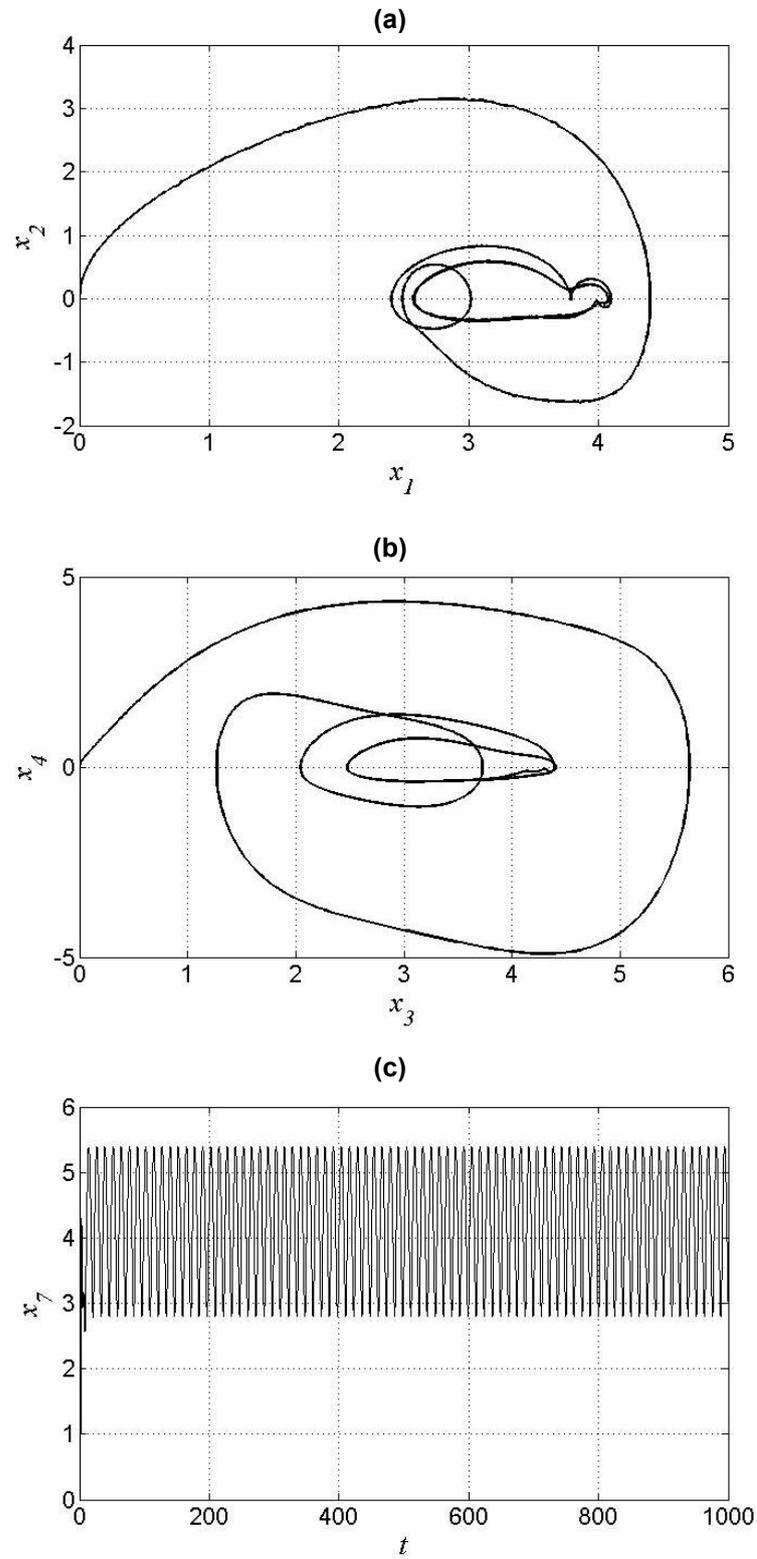


Fonte: Autor (2023)

Considerando os resultados apresentados no Gráfico 4, pode-se observar que conforme aumenta-se o valor de θ , aumenta-se o valor de geração de energia, e conforme Gráfico 4a, o sistema tem um comportamento periódico.

No Gráfico 5 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 4,238$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0,0502$, $\varepsilon_2 = 0,8944$, $\theta = 0,3961$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 1,00$.

Gráfico 5 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT



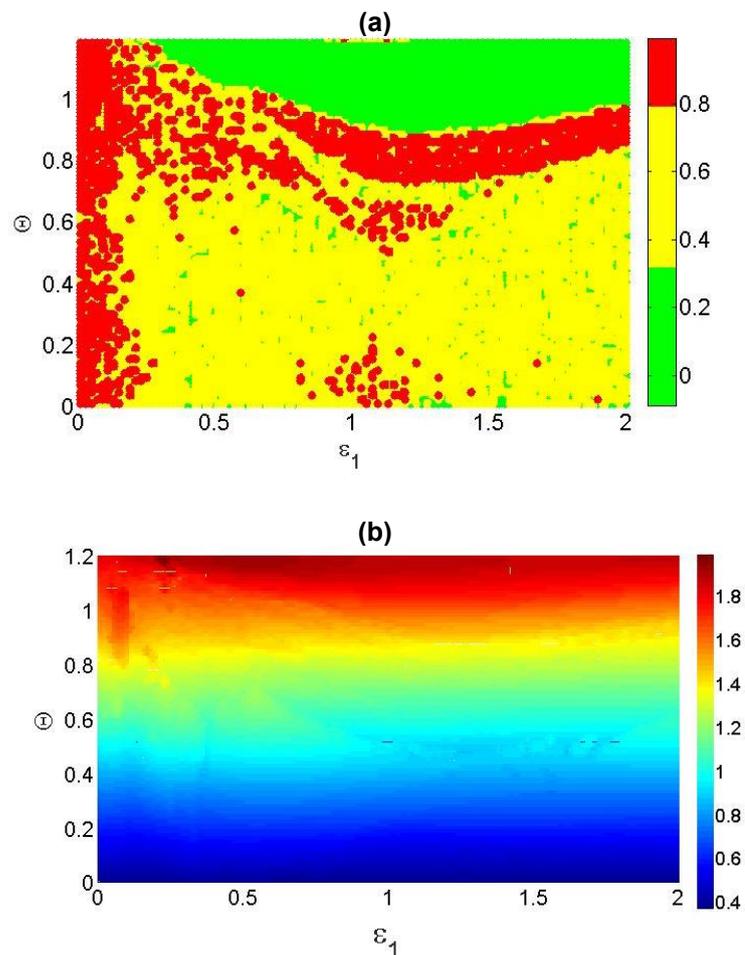
Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 5 fica evidente o comportamento periódico do sistema, e de acordo com o Gráfico 4a, tem-se $K_c \approx 0$, o que confirma o comportamento periódico.

3.3 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e Θ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = [0.01:2]$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,20$, $\Theta = [0.01:1.2]$ e $\rho = 1$. No Gráfico 6 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 6 – Variação em $\varepsilon_1 = [0.01:2]$ versus $\Theta = [0.01:1.2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.

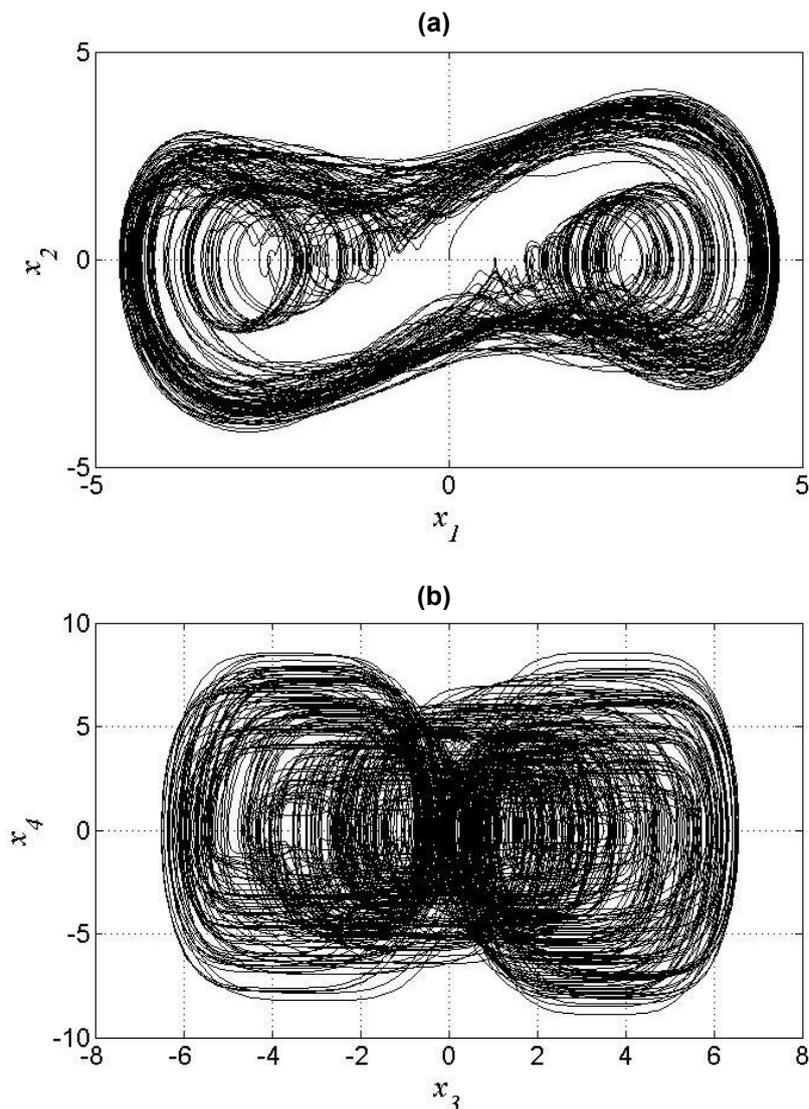


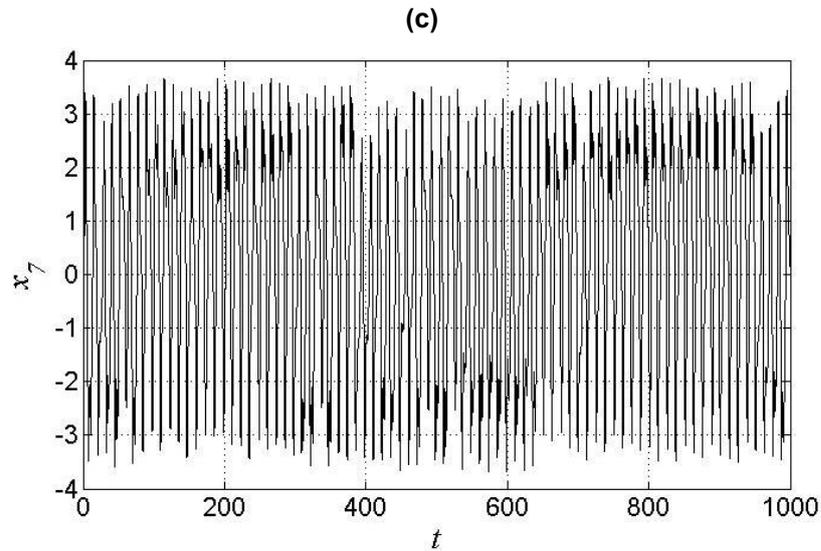
Fonte: Autor (2023)

Considerando os resultados apresentados no Gráfico 6, pode-se observar que conforme aumenta-se o valor Θ a potência média também tem acréscimo, comportamento similar ao observado para análise com ε_2 , e que o maior potencial de energia se encontra na faixa de comportamento periódico do sistema.

No Gráfico 7 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com comportamento caótico $K_c \approx 0.9767$: $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.1$, $\alpha_3 = 0.5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0.2$, $\delta_1 = 8.373$, $\rho_1 = 0.05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0.01$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0.20$, $\Theta = 1.152$ e $\rho = 1.00$.

Gráfico 7 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



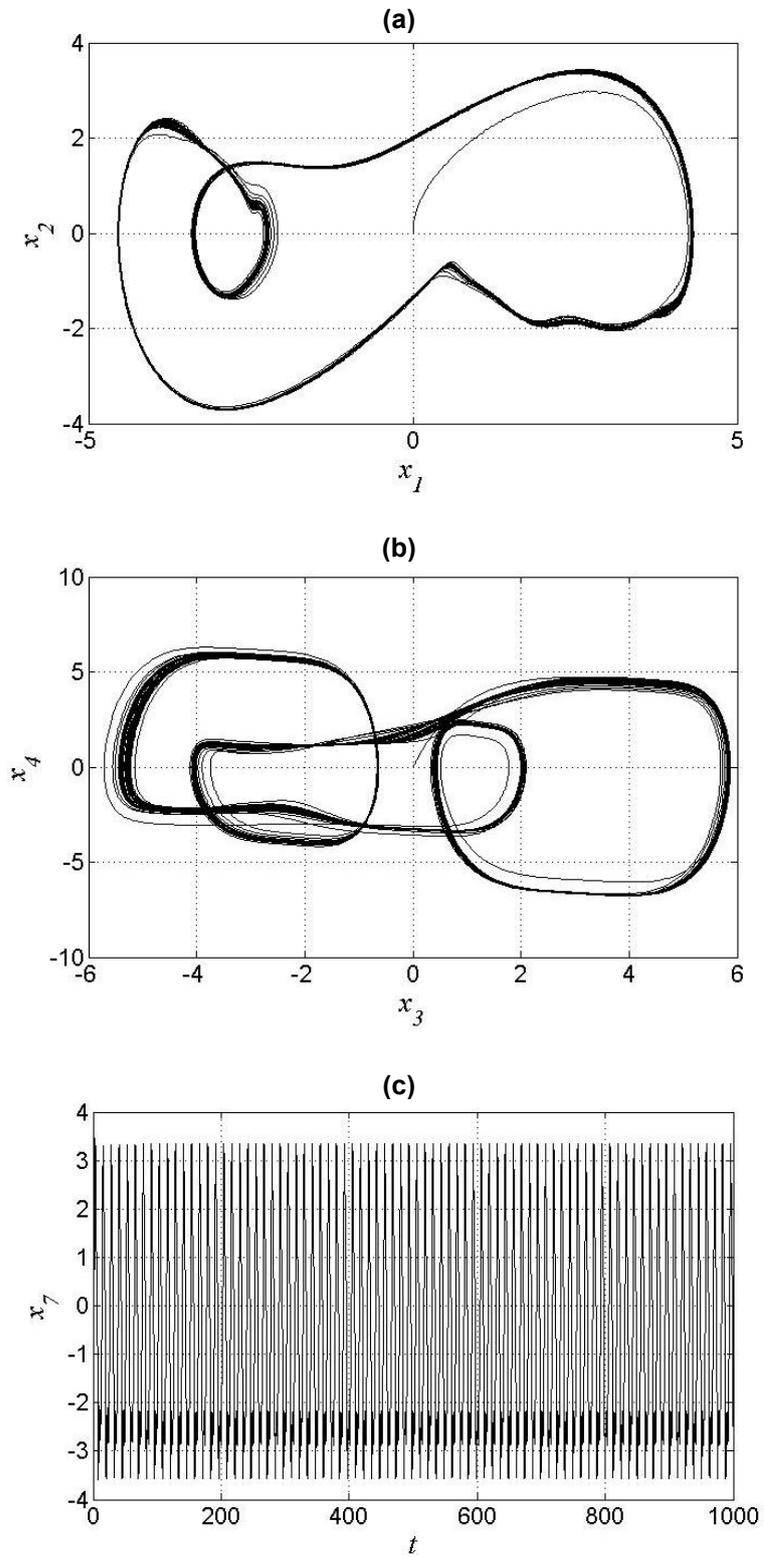


Fonte: Autor (2023)

Como pode ser observado no diagrama de fase Gráfico 7b o sistema tem um comportamento caótico, e conforme o Gráfico 6b o potencial de energia é de $P_{avg} = 1,587$.

No Gráfico 8 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 1,965$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0,2311$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 1,188$ e $\rho = 1,00$.

Gráfico 8 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.

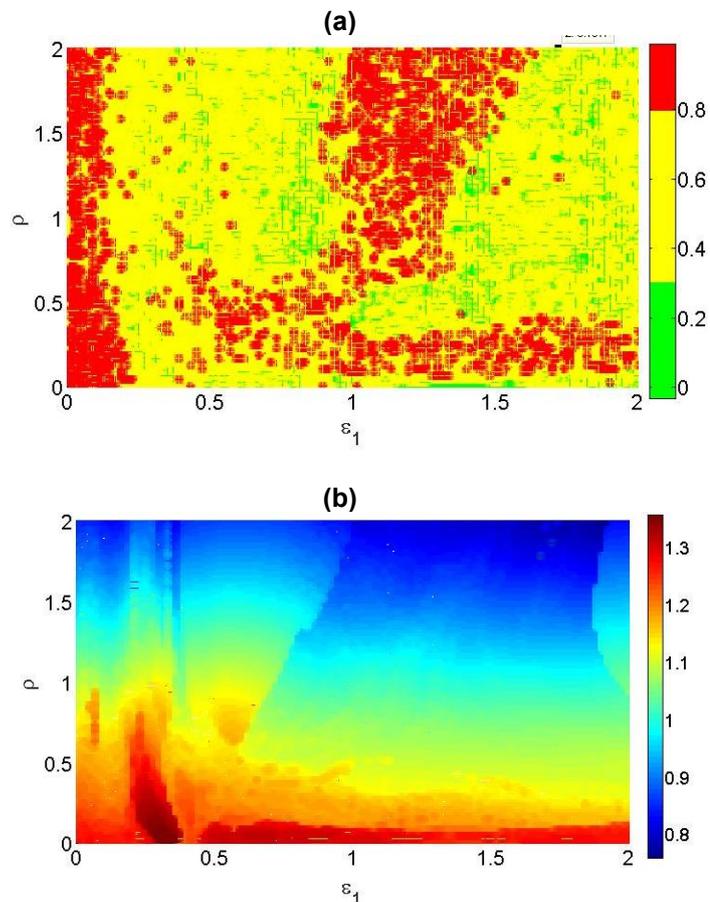


Analisando o Gráfico 8 fica evidente o comportamento periódico do sistema, e de acordo com o Gráfico 6a, tem-se $K_c \approx 0.01$, o que confirma o comportamento periódico.

3.4 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_1 e ρ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = [0,01:2]$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = [0,01:2]$. No Gráfico 9 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 9 – Variação em $\varepsilon_1 = [0,01:2]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.

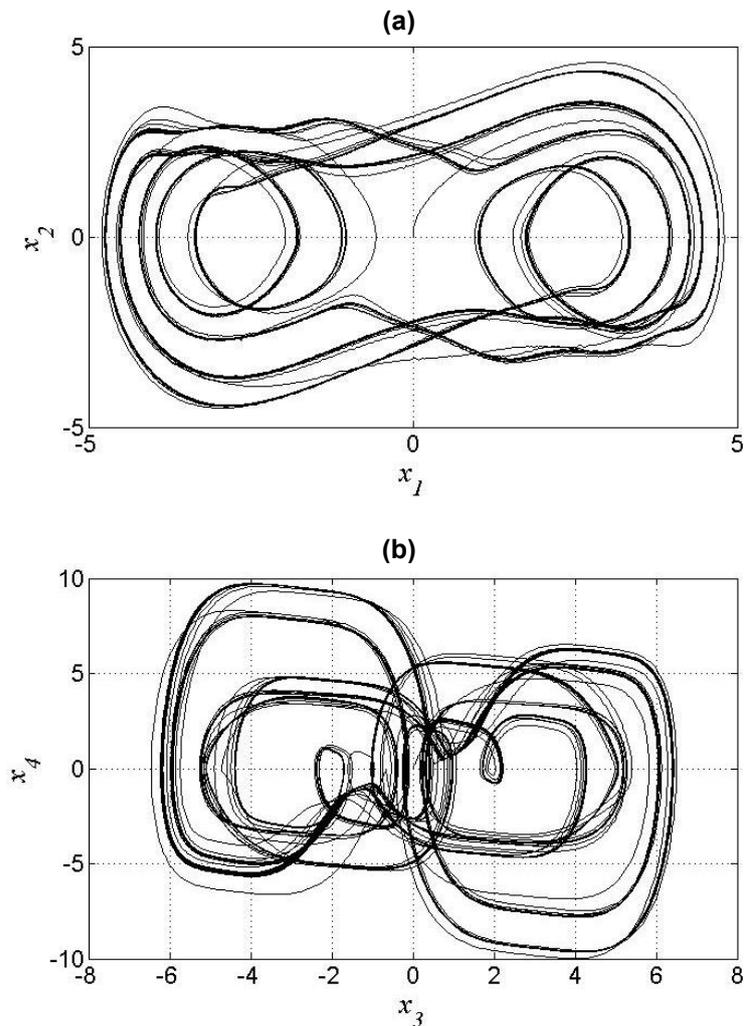


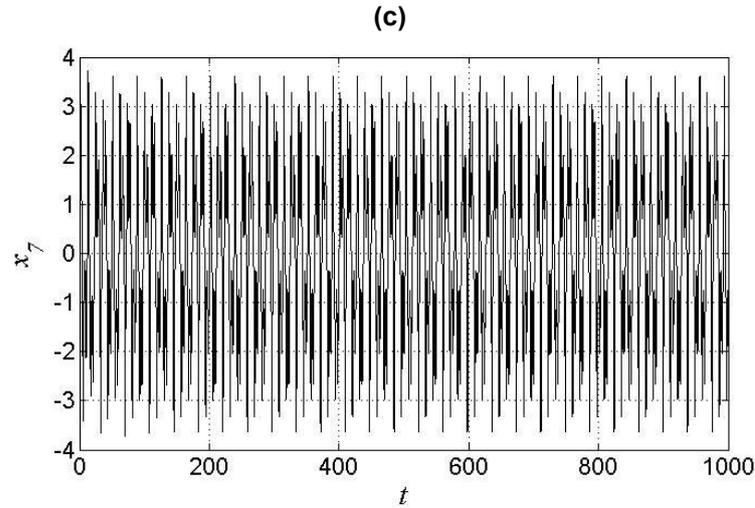
Fonte: Autor (2023)

Considerando os resultados apresentados no Gráfico 9, pode-se observar que conforme é reduzido o valor de ρ , têm-se o maior valor de geração de energia, levando o sistema para um comportamento quase periódico.

No Gráfico 10 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 1,355$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0,03316$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 0,01$.

Gráfico 10– (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



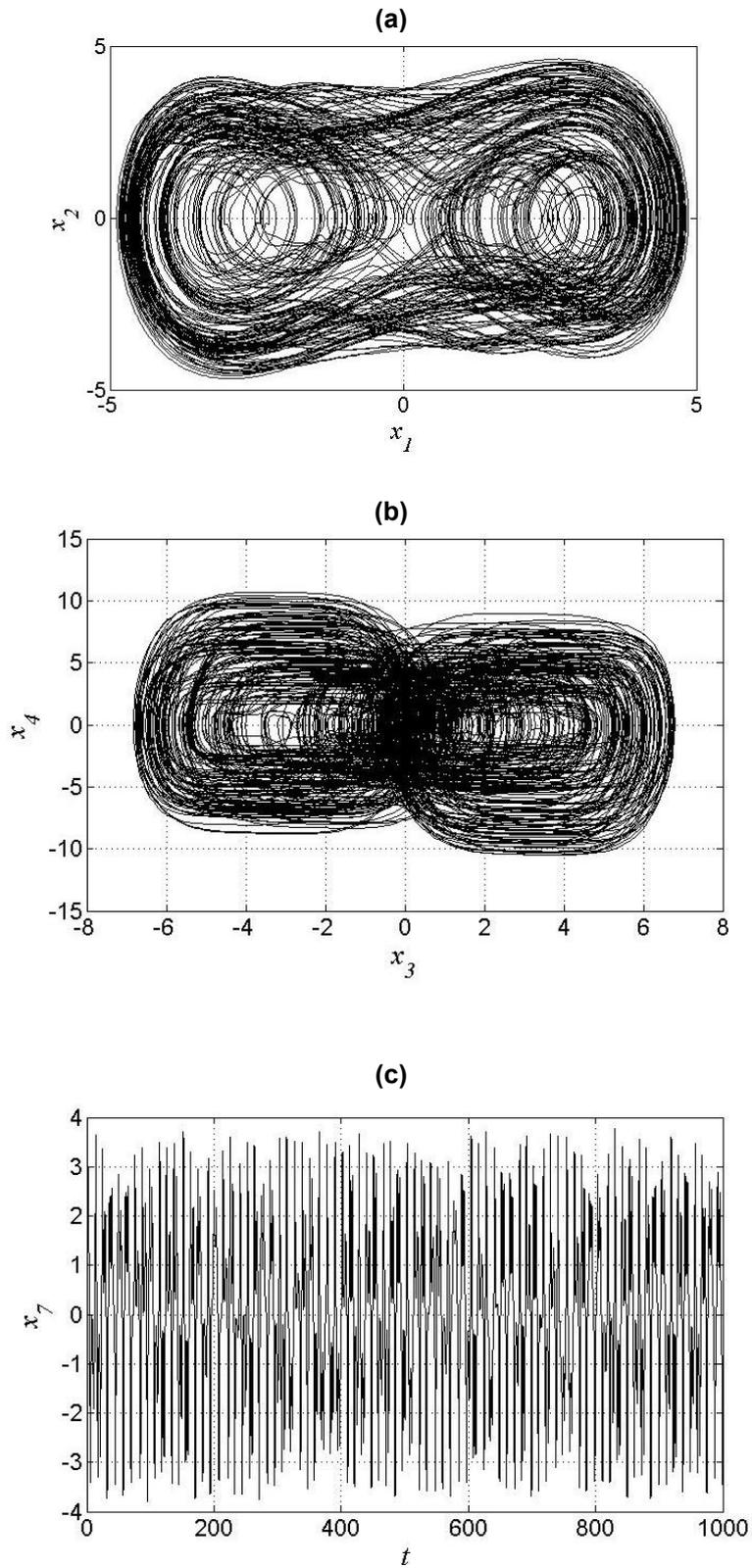


Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 10 podemos observar uma tendência para um comportamento quase-periódico, e de acordo com o Gráfico 9a, tem-se $K_c \approx 0,5764$ confirmando o comportamento quase periódico, tendendo a caótico.

No Gráfico 11 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com comportamento caótico $K_c \approx 0,9385$, e com geração de energia $P_{avg} = 1,253$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 0,0904$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 0,0703$.

Gráfico 11 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_3 versus x_4 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



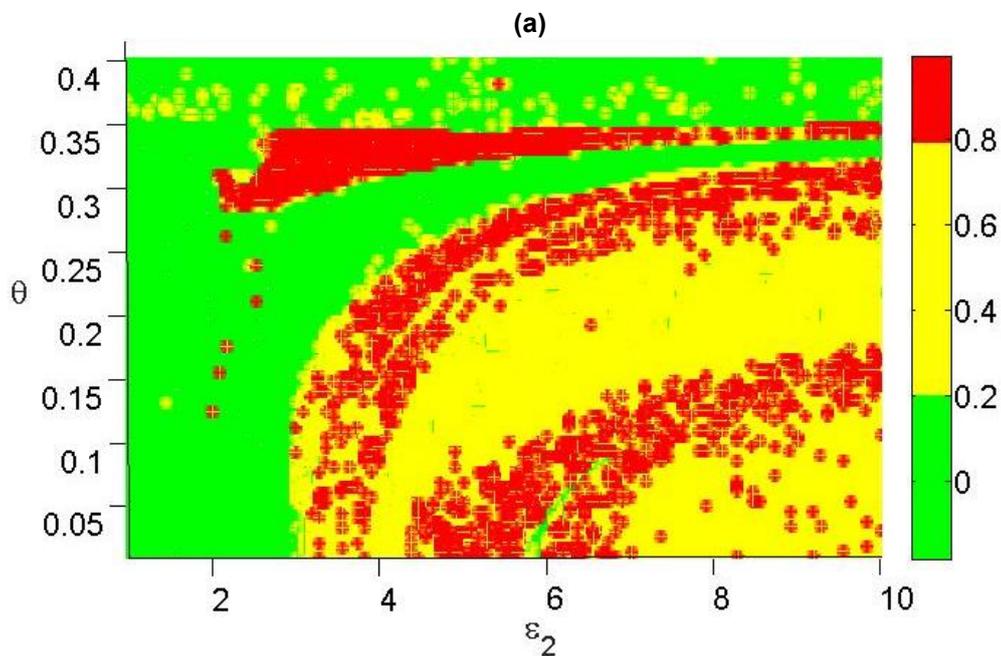
Fonte: Autor (2023)

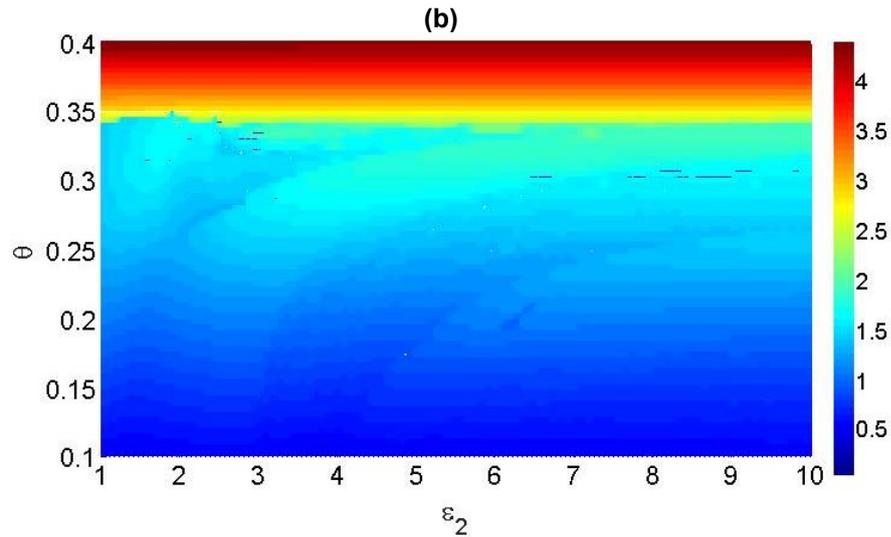
Analisando o Gráfico 11 fica evidente o comportamento caótico do sistema, e de acordo com o teste 0-1, tem-se $K_c \approx 0,9385$, o que confirma o comportamento caótico.

3.5 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_2 e θ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = [1:10]$, $\theta = [0,01:0,4]$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 1$. No Gráfico 12 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 12 – Variação em $\varepsilon_2 = [1:10]$ versus $\theta = [0,01:0,4]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.

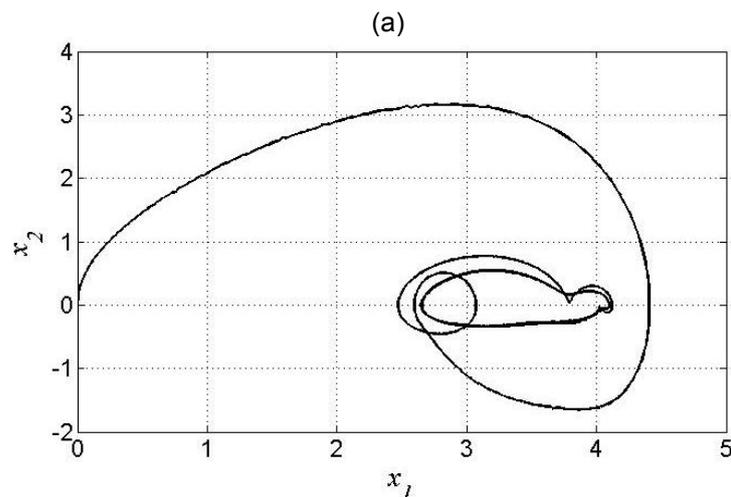


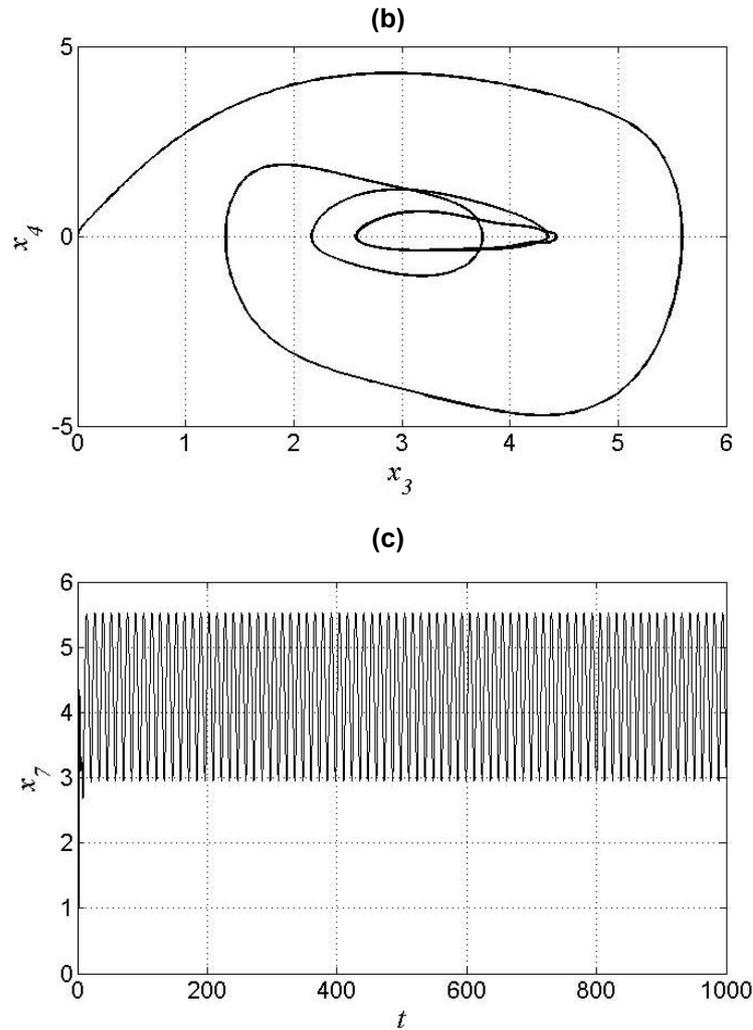


Fonte: Autor (2023)

No Gráfico 13 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 4,238$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,4$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 1$.

Gráfico 13 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.





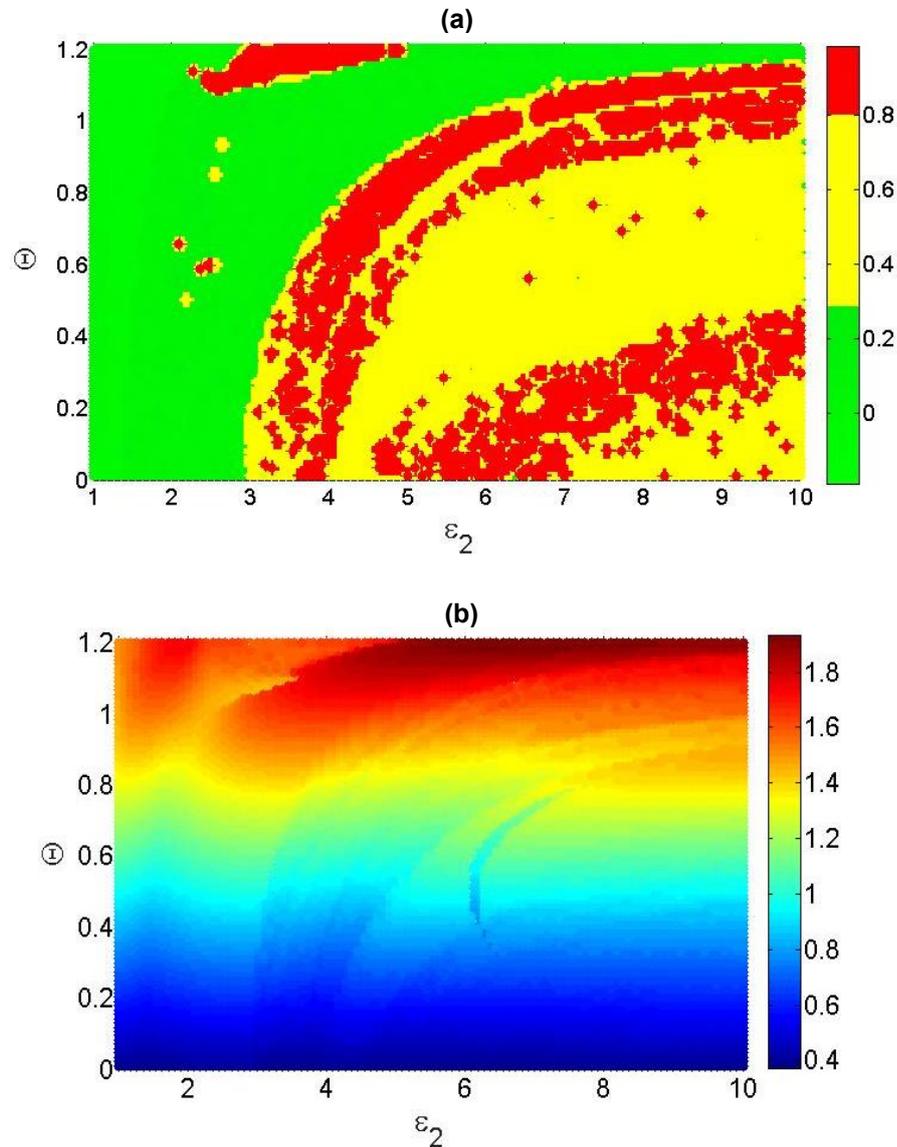
Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 13 podemos observar um comportamento periódico, e de acordo com o gráfico 12a, tem-se $K_c \approx 0,01$, o que confirma o comportamento periódico.

3.6 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_2 e Θ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = [1:10]$, $\theta = 0,20$, $\Theta = [0.01:1.2]$ e $\rho = 1$. No Gráfico 14 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 14 - Variação em $\varepsilon_2 = [1:10]$ versus $\Theta = [0.01:1.2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.



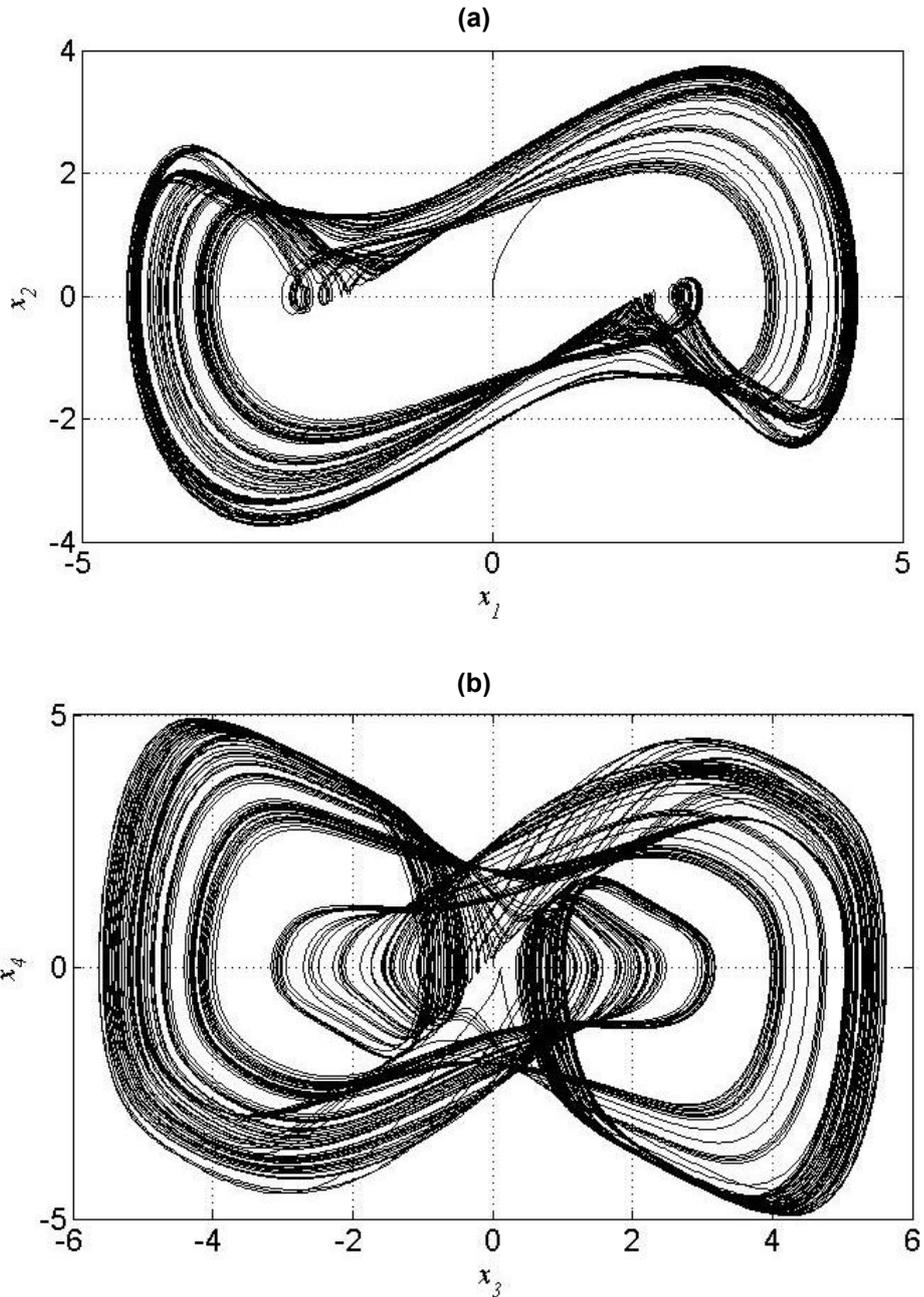
Fonte: Autor (2023)

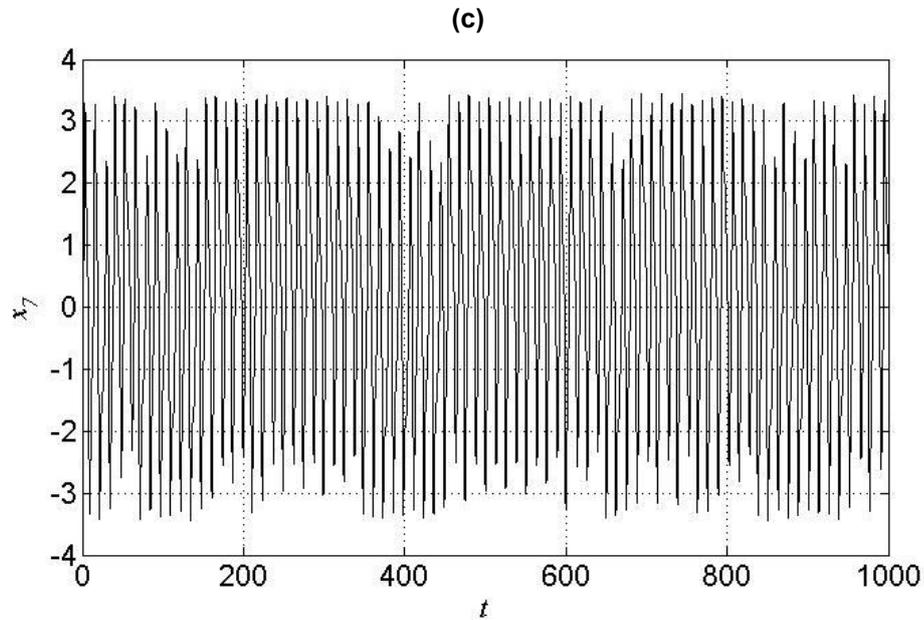
Considerando os resultados apresentados no Gráfico 14, pode-se observar que conforme aumenta-se o valor Θ a potência média também tem acréscimo, e que o maior potencial de energia se encontra na faixa de comportamento periódico do sistema.

No Gráfico 15 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com comportamento caótico $K_c \approx 0,9708$: $\alpha_1 = 0,1$,

$\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$,
 $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 3,364$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 1,176$ e $\rho = 1,00$.

Gráfico 15 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



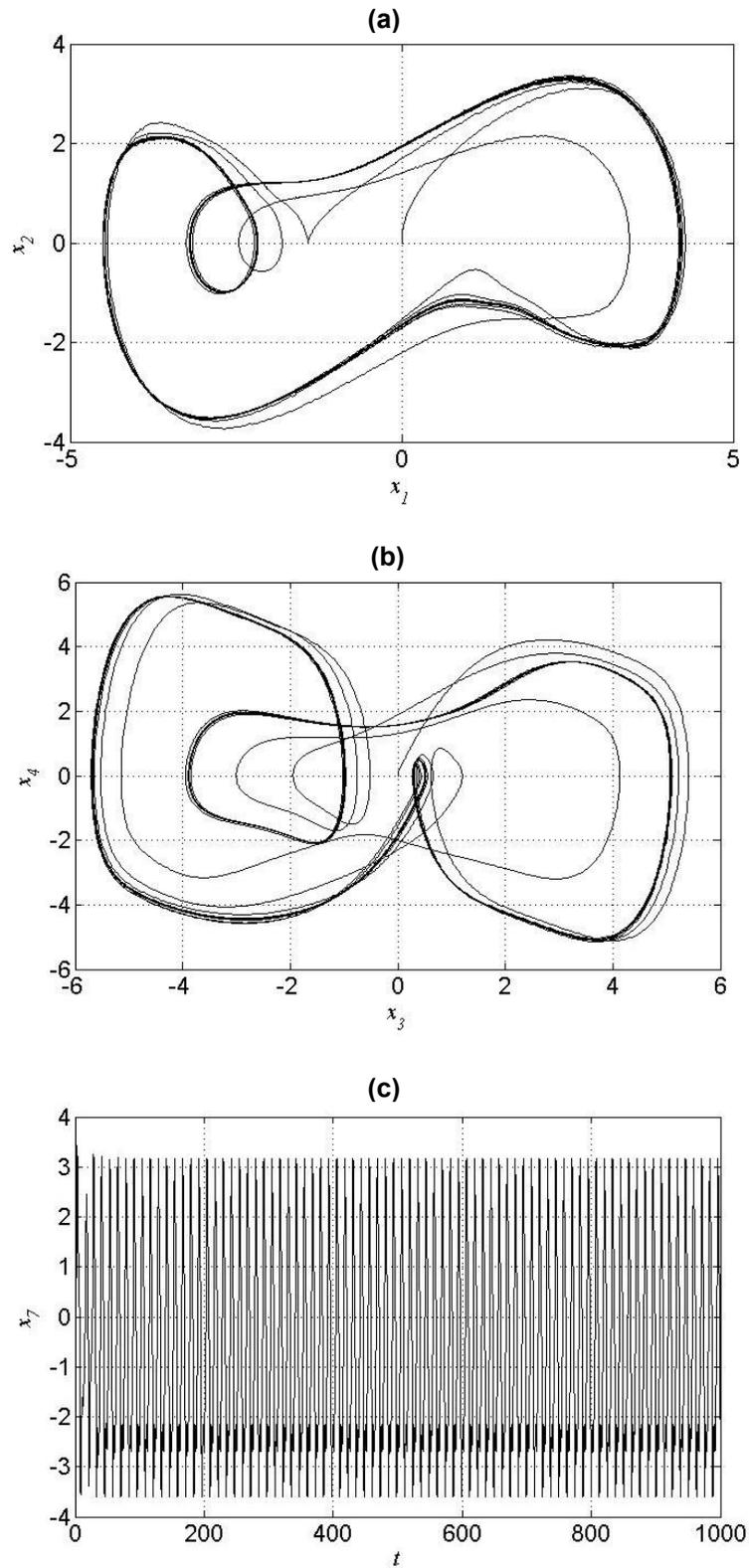


Fonte: Autor (2023)

Como pode ser observado no diagrama de fase Gráfico 15b o sistema tem um comportamento caótico, e conforme o Gráfico 14b o potencial de energia é de $P_{avg} = 1,587$.

No Gráfico 16 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 1,93$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 1,2$ e $\rho = 1$.

Gráfico 16 - (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.

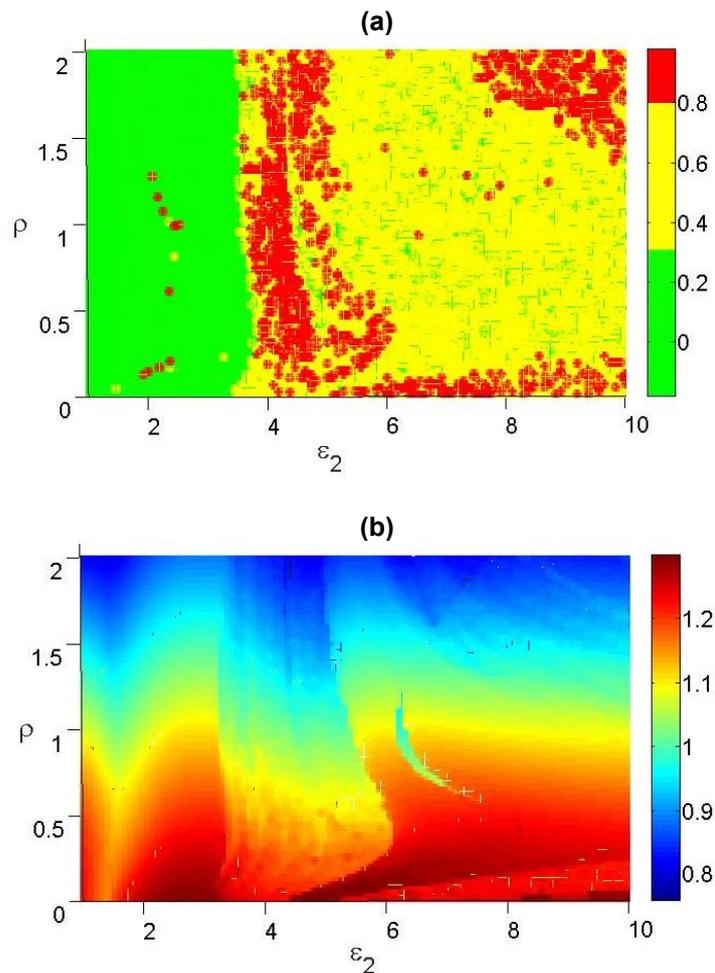


Analisando o Gráfico 16 fica evidente o comportamento periódico do sistema, e de acordo com o Gráfico 14a, tem-se $K_c \approx 0.01$, o que confirma o comportamento periódico.

3.7 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros ε_2 e ρ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = [1:10]$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = [0,01:2]$. No Gráfico 17 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 17 – Variação em $\varepsilon_2 = [1:10]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.

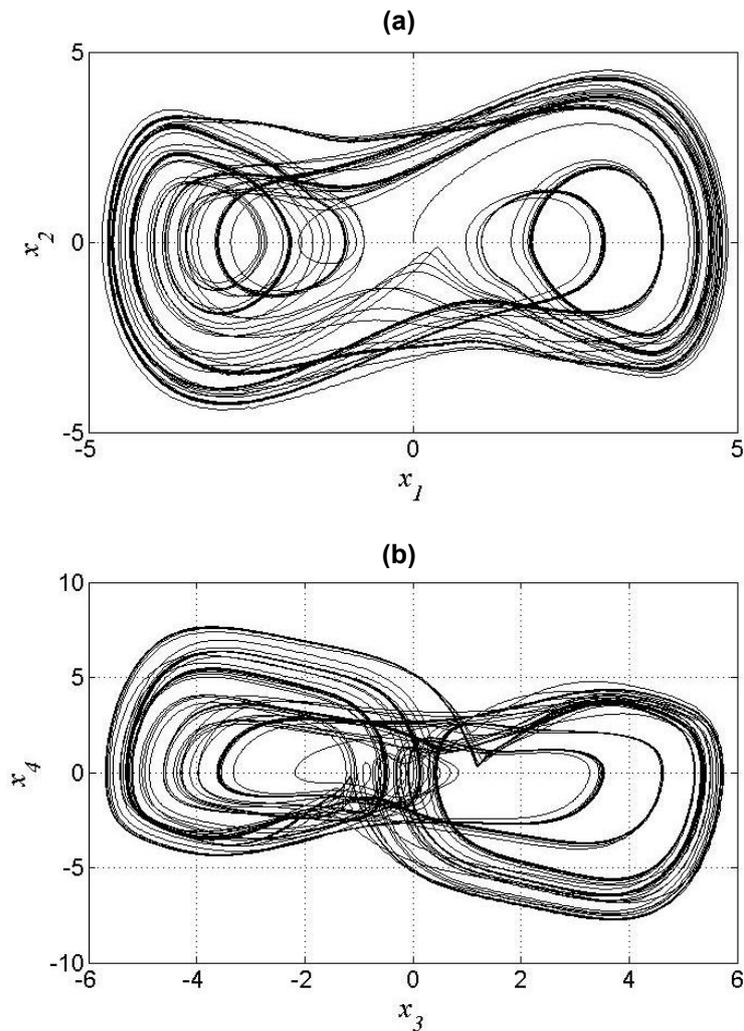


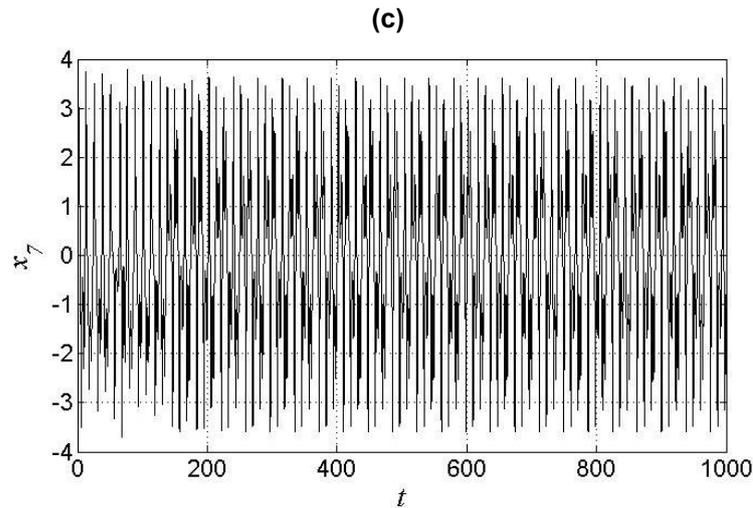
Fonte: Autor (2023)

Considerando os resultados apresentados no Gráfico 17, pode-se observar que conforme é reduzido o valor de ρ , têm-se o maior valor de geração de energia, levando o sistema para um comportamento quase periódico.

No Gráfico 18 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 1,299$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 4,909$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 0,0301$.

Gráfico 18 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



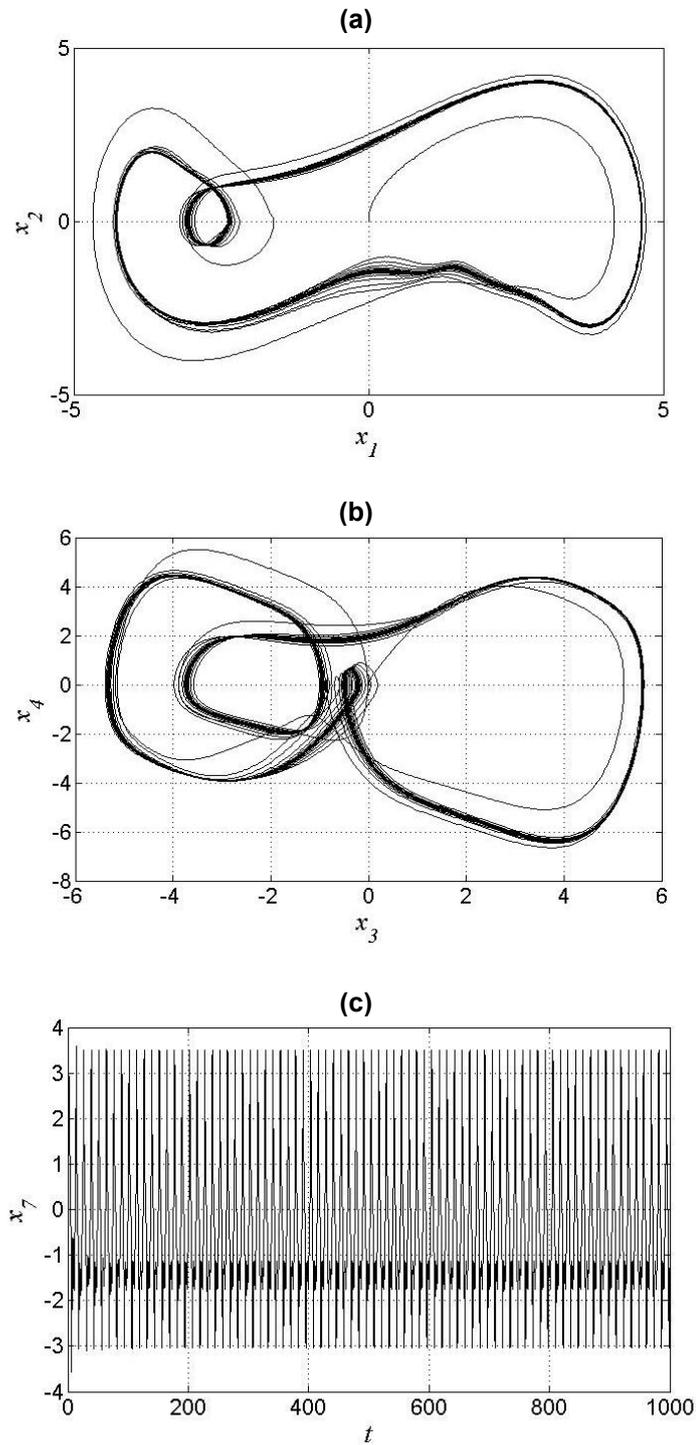


Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 18 podemos observar uma tendência para um comportamento quase periódico, e de acordo com o Gráfico 15a, tem-se $K_c \approx 0,469$, o que confirma o comportamento quase periódico, tendendo a caótico.

No Gráfico 19 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com comportamento periódico $K_c \approx 0,02$, e com geração de energia $P_{avg} = 1,291$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 6,455$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 6,636$, $\theta = 0,20$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 0,01$.

Gráfico 19 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_3 versus x_4 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



Fonte: Autor (2023)

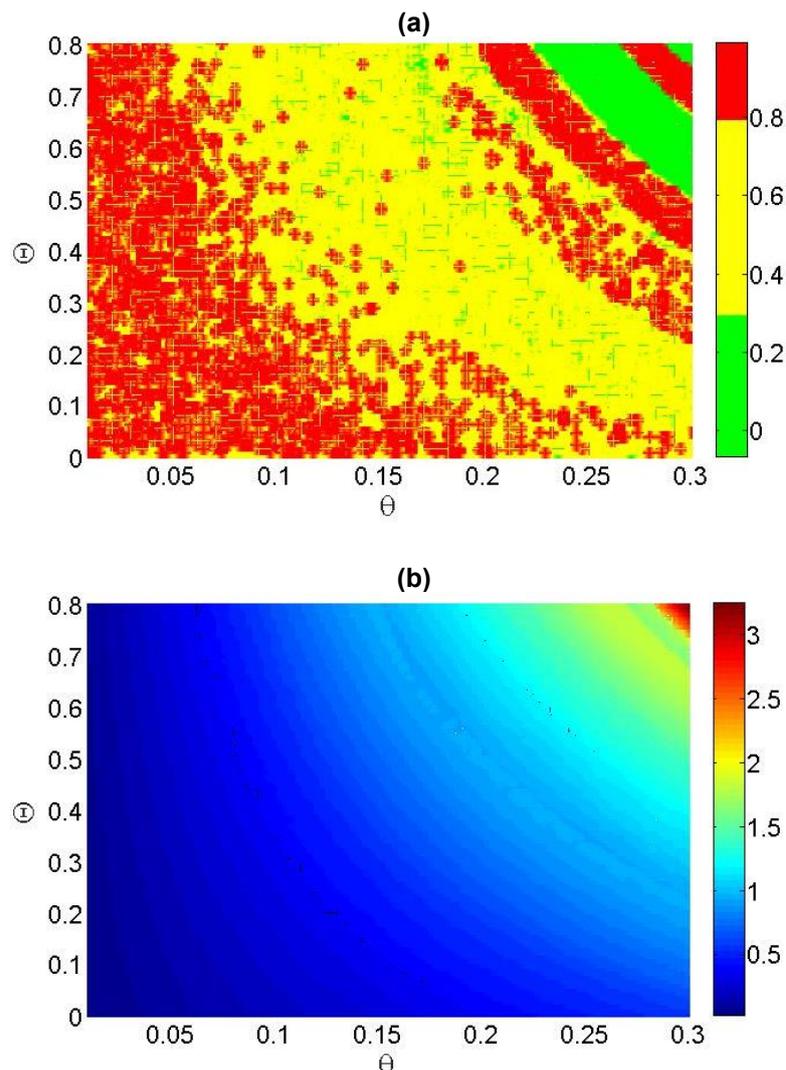
Analisando o Gráfico 19 fica evidente o comportamento periódico do sistema, e de acordo com o teste 0-1, tem-se $K_c \approx 0,02$, o que confirma o comportamento

periódico. Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros Θ e ρ .

3.8 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros θ e Θ

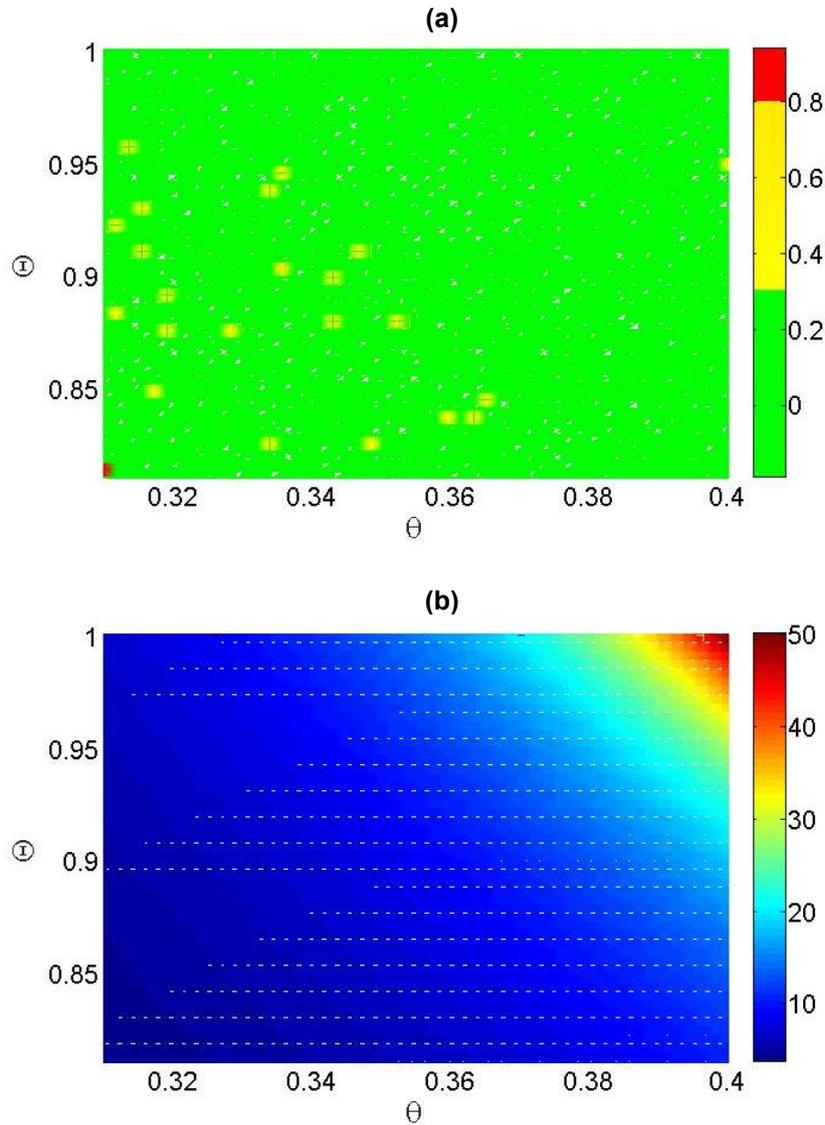
Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = [0,01:0,4]$, $\Theta = [0,01:1]$ e $\rho = 1$. Nos Gráficos 20 e 21 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

Gráfico 20 – Variação em $\theta = [0,01:0,3]$ versus $\Theta = [0,01:0,8]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.



Fonte: Autor (2023)

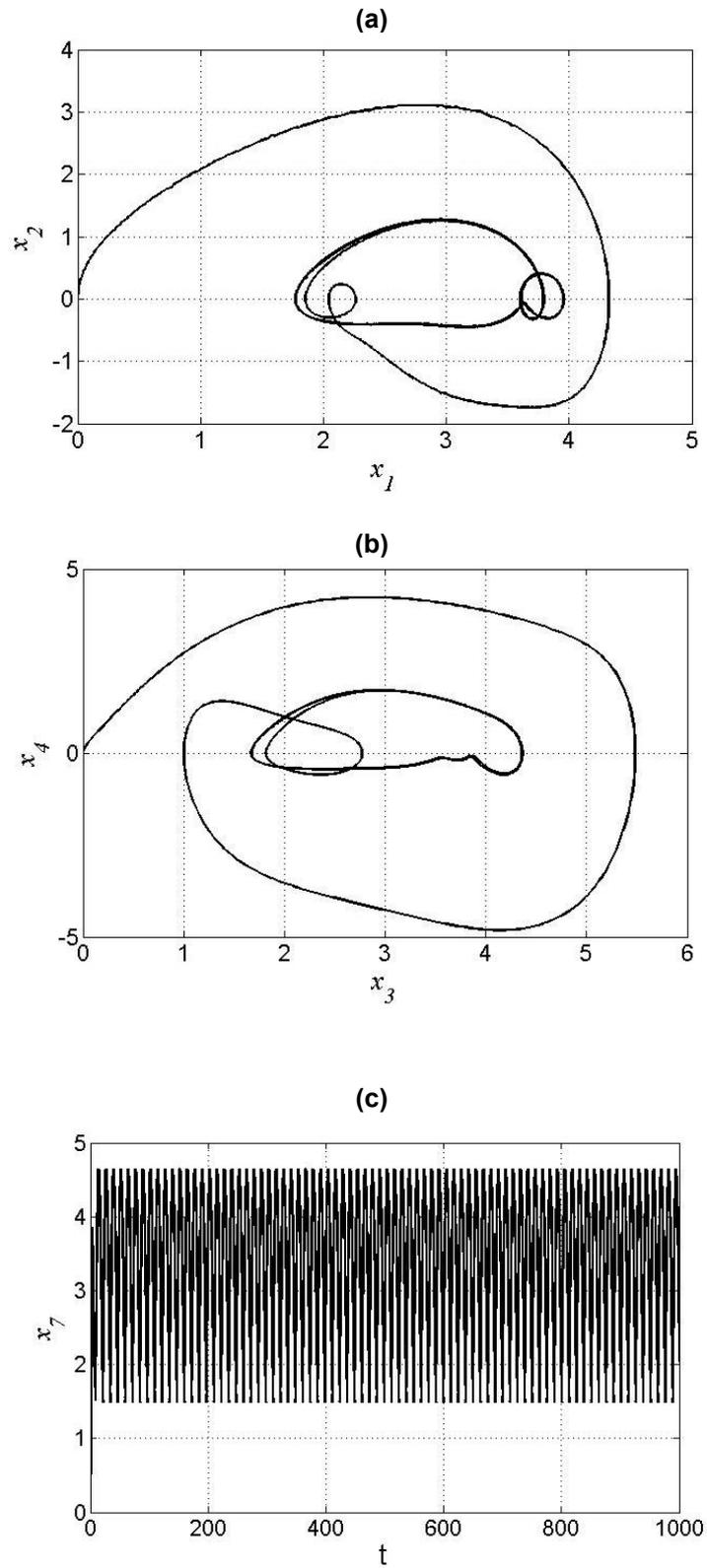
Gráfico 21 – Variação em $\theta = [0,31:0,4]$ versus $\Theta = [0,81:1]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.



Fonte: Autor (2023)

Como pode ser observado nos Gráficos 20 e 21 a geração de energia aumenta conforme aumenta-se os valores de θ e Θ . Pode-se observar no Gráfico 21 que o aumento das variáveis leva o sistema a um comportamento periódico, e o a um deslocamento extremamente alto, que pode comprometer a estrutura, sendo assim prudente ajustar o θ e Θ de forma a não desestabilizar o sistema. Considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,3$, $\Theta = 0,8$ e $\rho = 1$. Obtêm-se: $P_{avg} = 3,014$ e $K_c \approx 0,01$

Gráfico 22 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.

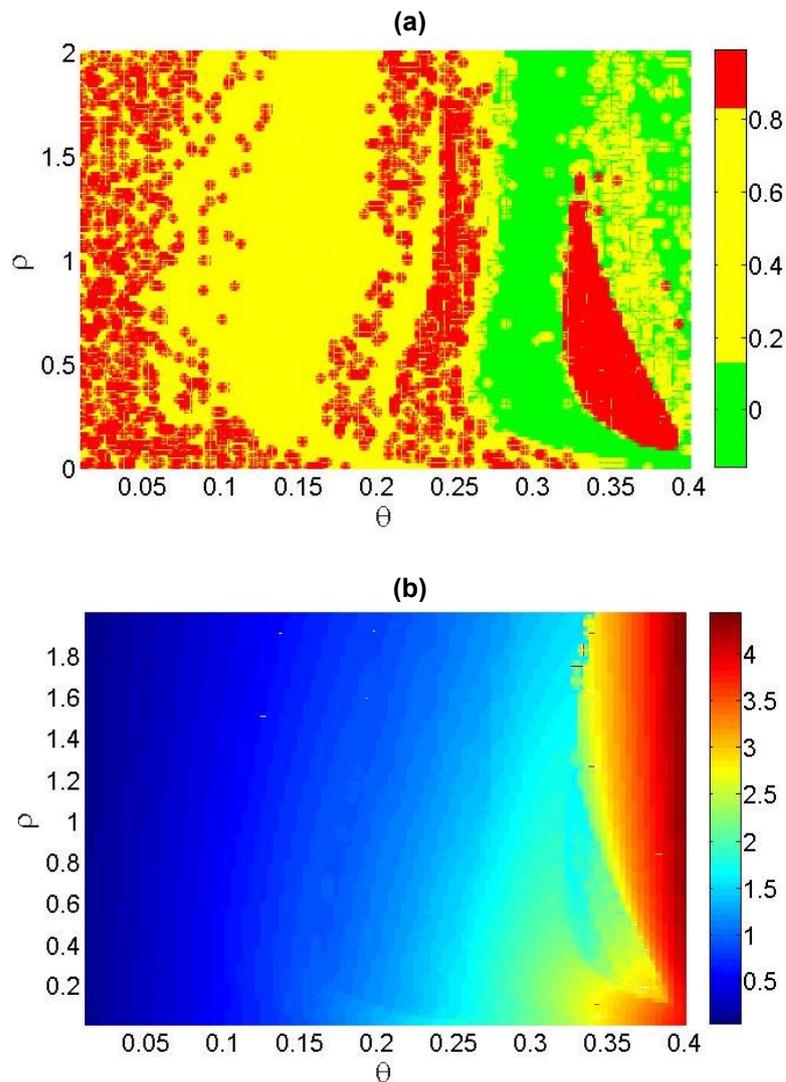


Analisando o Gráfico 22 podemos observar um comportamento periódico.

3.9 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros θ e ρ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = [0,01:0,4]$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = [0,01:2]$. No Gráfico 23 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

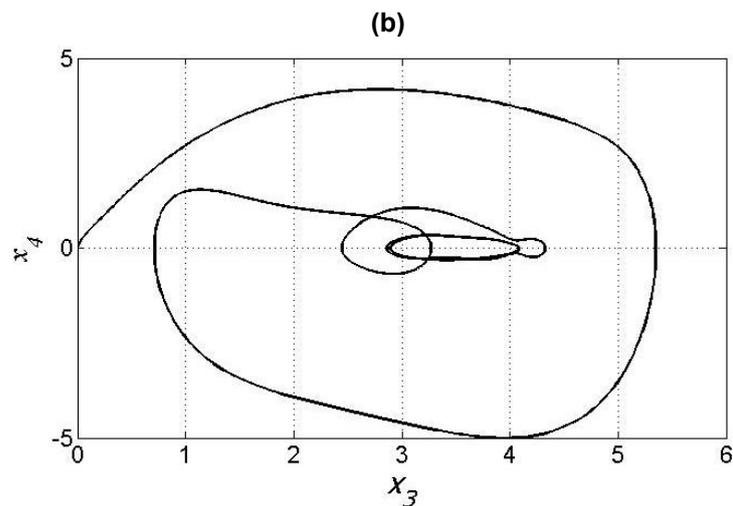
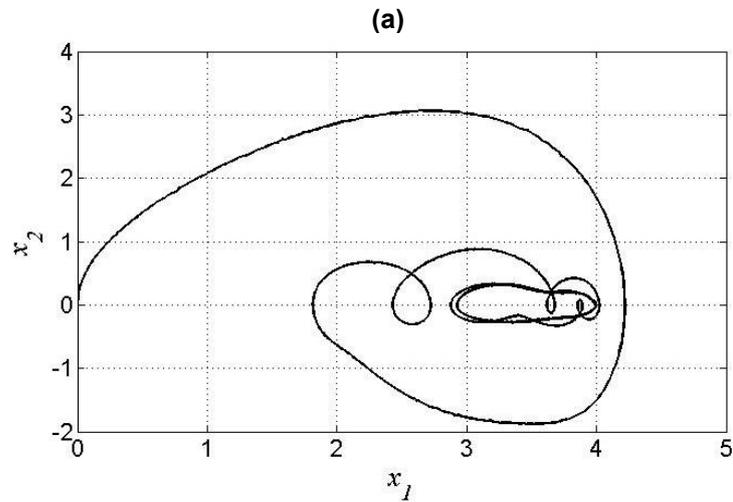
Gráfico 23 – Variação em $\theta = [0,01:0,4]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência

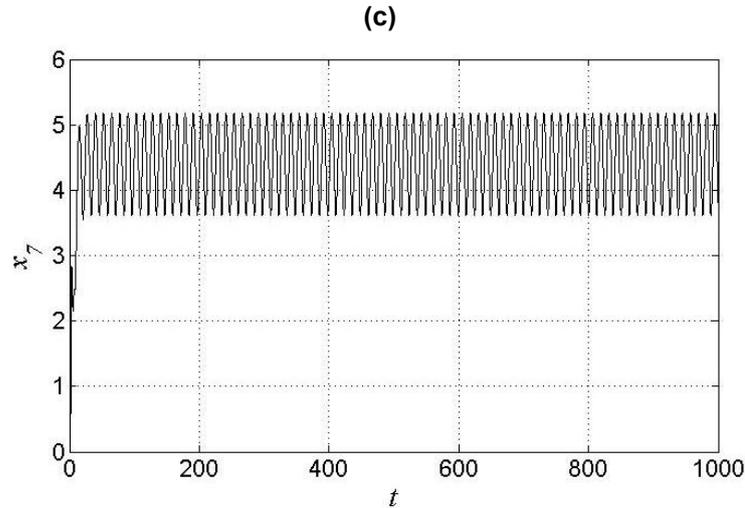


Fonte: Autor (2023)

No Gráfico 24 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 2,687$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,4$, $\Theta = 0,6$ e $\rho = 2$.

Gráfico 24 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.





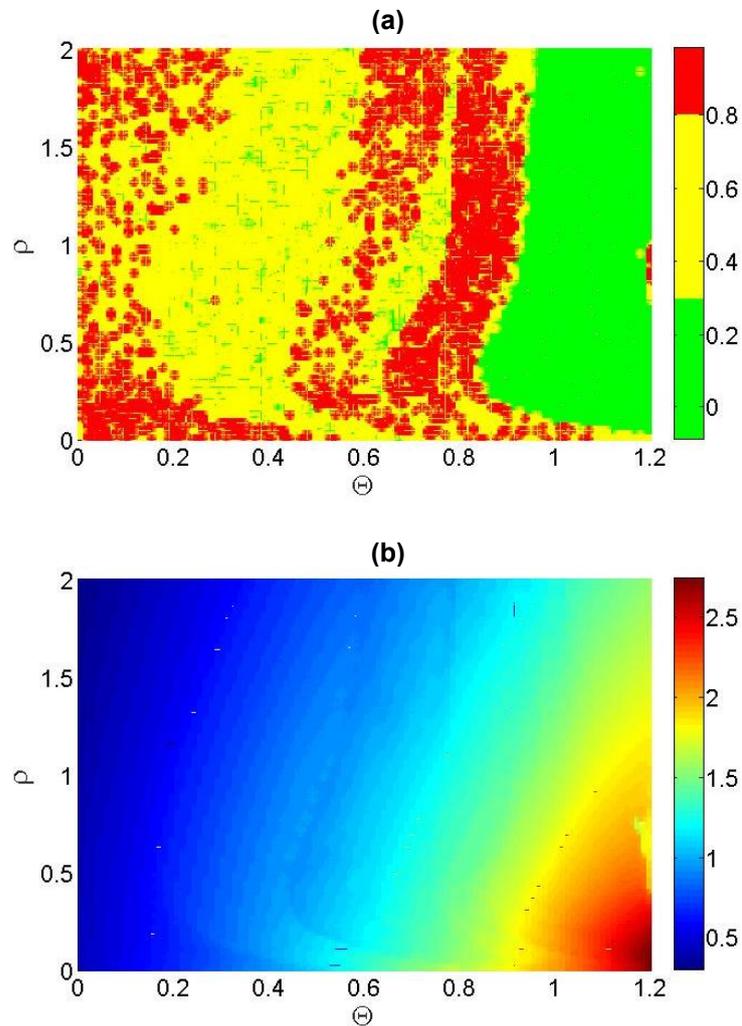
Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 24 podemos observar um comportamento periódico, e de acordo com o gráfico 23a, tem-se $K_c \approx 0,01$, o que confirma o comportamento periódico.

3.10 Dinâmica e potencial de geração de energia para variação nos parâmetros Θ e ρ

Nesta seção serão apresentadas tanto a dinâmica do sistema como o potencial de geração de energia considerando os parâmetros: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,2$, $\Theta = [0,01:1,2]$ e $\rho = [0,01:2]$. No Gráfico 25 são apresentadas as variações de K_c do teste 0-1, e variações da potência média.

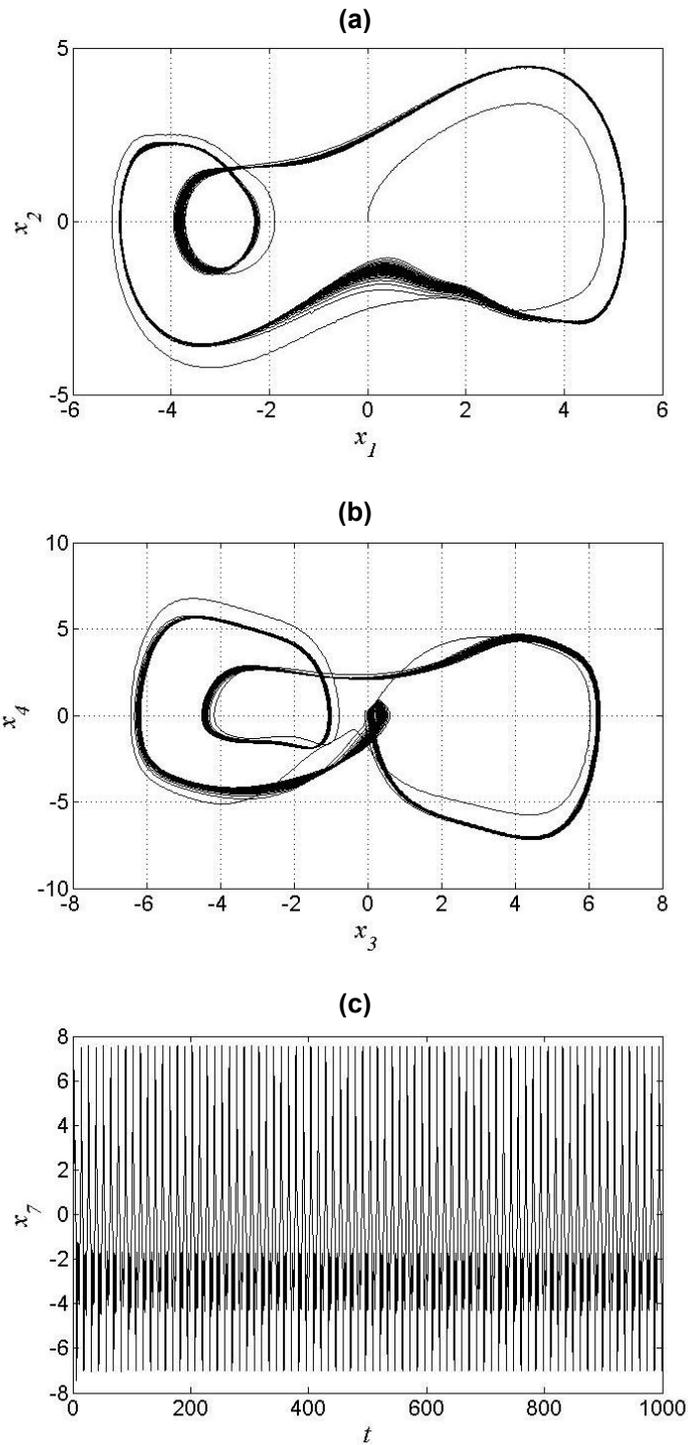
Gráfico 25 – Variação em $\Theta = [0,01:1,2]$ versus $\rho = [0,01:2]$. (a) Teste 0-1. (b) Potência.



Fonte: Autor (2023)

No Gráfico 26 é apresentado o diagrama de fase do pórtico e do NES assim como o histórico do tempo da tensão elétrica gerada pelo PZT considerando os parâmetros para o sistema com o maior valor de geração de energia $P_{avg} = 2,687$: $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,5$, $\beta_1 = 1$, $\beta_3 = 0,2$, $\delta_1 = 8,373$, $\rho_1 = 0,05$, $\rho_2 = 100$, $\rho_3 = 200$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\theta = 0,2$, $\Theta = 1,2$ e $\rho = 0,0904$.

Gráfico 26 – (a) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (b) Diagrama de fase x_1 versus x_2 . (c) Variação da tensão elétrica no PZT.



Fonte: Autor (2023)

Analisando o Gráfico 26 podemos observar um comportamento periódico, e de acordo com o Gráfico 25a, tem-se $K_c \approx 0,01$, o que confirma o comportamento periódico.

3.11 Análise dos resultados

No Quadro 3 é apresentado a variação da potência média, do valor do teste 0-1 e da classificação do comportamento do sistema para variações dos parâmetros de controle, conforme resultados apresentados nas seções anteriores.

Quadro 3 - Áreas de desenvolvimento de competências

Parâmetro 1	Parâmetro 2	Potência média	Teste 0-1. Valor de K	Comportamento
$\varepsilon_1 = 0,0502$	$\varepsilon_2 = 1,182$	$P_{avg} = 1,198$	$K_c \approx 0,9892$	Caótico
$\varepsilon_1 = 0,3919$	$\varepsilon_2 = 1$	$P_{avg} = 1,184$	$K_c \approx 0$	Periódico
$\varepsilon_1 = 0,0502$	$\theta = 0,3961$	$P_{avg} = 4,238$	$K_c \approx 0$	Periódico
$\varepsilon_1 = 0,01$	$\Theta = 1,152$	$P_{avg} = 1,587$	$K_c \approx 0,9767$	Caótico
$\varepsilon_1 = 0,2311$	$\Theta = 1,188$	$P_{avg} = 1,965$	$K_c \approx 0,01$	Periódico
$\varepsilon_1 = 0,03316$	$\rho = 0,01$	$P_{avg} = 1,355$	$K_c \approx 0,5764$	Quase periódico
$\varepsilon_1 = 0,0904$	$\rho = 0,0703$	$P_{avg} = 1,253$	$K_c \approx 0,9385$	Caótico
$\varepsilon_2 = 5$	$\theta = 0,4$	$P_{avg} = 4,238$	$K_c \approx 0,01$	Periódico
$\varepsilon_2 = 3,364$	$\Theta = 1,176$	$P_{avg} = 1,587$	$K_c \approx 0,9708$	Caótico
$\varepsilon_2 = 5$	$\Theta = 1,2$	$P_{avg} = 1,93$	$K_c \approx 0,01$	Periódico
$\varepsilon_2 = 4,909$	$\rho = 0,0301$	$P_{avg} = 1,299$	$K_c \approx 0,469$	Quase periódico
$\varepsilon_2 = 6,636$	$\rho = 0,01$	$P_{avg} = 1,291$	$K_c \approx 0,02$	Periódico
$\theta = 0,3$	$\Theta = 0,8$	$P_{avg} = 3,014$	$K_c \approx 0,01$	Periódico
$\theta = 0,4$	$\Theta = 1$	$P_{avg} = 49,8$	$K_c \approx 0,01$	Periódico
$\theta = 0,4$	$\rho = 2$	$P_{avg} = 2,687$	$K_c \approx 0,01$	Periódico
$\Theta = 1,2$	$\rho = 0,0904$	$P_{avg} = 2,687$	$K_c \approx 0,01$	Periódico

Fonte: Autor (2023)

É possível observar que as variáveis θ e Θ representam maior influência na geração de energia encontrada. Enquanto todos os outros resultados não alterando elas encontram $P_{avg} < 2,00$, quando fazemos alterações nestes parâmetros, alcançamos valores maiores do que $P_{avg} > 3,00$.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, serão explanadas as considerações finais.

Os resultados apresentados demonstram a influência significativa dos parâmetros do material piezoelétrico no comportamento dinâmico do sistema. Como o material piezoelétrico pode ser usado tanto como atuador quanto como sensor, seu uso como fonte de energia limpa é essencial para a coleta energia. A energia armazenada, por sua vez, pode ser utilizada posteriormente na aplicação do material piezoelétrico como atuador.

As análises realizadas por este estudo foram feitas com 2 variáveis livres do sistema por análise, sendo assim, todas as outras se mantiveram fixas, isso proporcionou gráficos de 3 dimensões facilitando o entendimento do ocorrido, mas também é possível fazer estudos futuros buscando melhor eficiência no sistema com oscilação de 3 ou mais variáveis ao mesmo tempo, para encontrar outros pontos ótimos para a geração de energia.

Após compilação dos resultados para análises individuais e coletivas pode-se observar que todas as variáveis tem representatividade significativa no comportamento do sistema, tanto no diagrama de fases, quanto na geração de energia, mas também é possível concluir que as variáveis θ e Θ , tem maior influência na geração de energia.

Considerando os resultados numéricos apresentados, podemos destacar a influência do parâmetro de acoplamento linear " θ " do material piezoelétrico. Os resultados mostraram que o aumento do valor do parâmetro pode levar a estrutura a permanecer em deflexão, o que positivamente proporciona um potencial mais significativo de energia gerada; entretanto, esta ação pode deixar o pilar do pórtico sujeito a efeitos indesejáveis, como flambagem. Também foi visto que o aumento do valor do parâmetro de acoplamento não linear " Θ " do material piezoelétrico também aumenta a energia potencial, mas sem causar deflexão.

Com o teste 0–1 foi possível verificar quais parâmetros podem levar o sistema a um comportamento caótico, o que não é desejado na maioria das aplicações. O estudo também confirmou que o sistema NES é uma boa alternativa para controlar vibrações sem consumo de energia.

Com base nas contribuições dos resultados numéricos e adimensionais apresentados, podemos considerar em trabalhos futuros a utilização de um sistema de otimização através de meta-heurísticas para determinar a melhor combinação dos cinco parâmetros simultaneamente, bem como a montagem de um aparato experimental para a análise e validação do modelo e os parâmetros utilizados de forma adimensional, obtendo assim a potência média em Watts.

REFERÊNCIAS

- AKIN-PONNLE A. E.; PEREIRA F. S.; MADUREIRA R. C.; CARVALHO N. B. From macro to micro: impact of smart turbine energy harvesters (steh), on environmental sustainability and smart city automation. **Sustainability**, v. 14, p.1887, 2022.
- ÁLVAREZ, A.; HERNÁNDEZ, J. P.; LÓPEZ, A. F.; AGUDELO, J. R. Average molecular characterization of the soluble organic fraction of mature diesel particulate matter. **Combust Flame**, v. 183, p. 299, 2017.
- ARRINDA, M.; BERECIBAR, M.; OYARBIDE, M.; MACICIOR, H.; MUXIKA, E.; MESSAGIE, M. Levelized cost of electricity calculation of the energy generation plant of a CO2 neutral micro-grid. **Energy**, v. 208, 2020.
- BARBOSA, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. Impactos ambientais de usinas eólicas. Congresso sobre geração distribuída e energia no meio no rural. **Anais**. Itajubá: UNIFEI, 2013.
- BEHROUZI, F.; NAKISA, M.; MAIMUN, A.; AHMED, Y. M. Renewable energy potential in Malaysia: hydrokinetic river/marine technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1270-1281, 2016.
- BERNARDINI, D.; REGA, G.; LITAK G.; SYTA, A. Identification of regular and chaotic isothermal trajectories of a shape memory oscillator using the 0-1 test. **Journal of Multi-body Dynamics**, v. 227, p. 17- 22, 2012.
- BRASIL, R. M. L. R. D. F. **Não-linearidade geométrica na dinâmica de estruturas aperticadas planas**: um tratamento pelo método dos elementos finitos. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 1990.
- CAO, Y.; LIANG, S.; CHEN, X.; HE, T.; WANG, D.; CHENG, X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing arctic amplification and initial sea-ice melting. **Scientific Reports**, v. 7, 2017.
- CHU, L. K.; LE, N. T. M. Environmental quality and the role of economic policy uncertainty, economic complexity, renewable energy, and energy intensity: the case of G7 countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 2866 - 2882, 2022.
- COTTONE, F.; VOCCA, H.; GAMMAITONI, L. Nonlinear energy harvesting. **Physical Review Letters**, v. 102, 2009.
- CUNHA, E. A. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; DINIZ, A. M. Aspectos históricos da energia eólica no brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, Universidade Federal do Paraná, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/65759/38008>>. Acesso em: 22 de fev. 2022.

DUTOIT, N. E.; WARDLE, B. L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. **AIAA Journal - American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 45, n. 5, 2007.

EIRAS, J. AGERBASI, R. B. Z.; ROSSO, J. M.; SILVA, D. M.; CÓTICA, L. F.; SANTOS, I. A.; SOUZA, C.A.; LENTE, M. H. Compositional design of dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of (K, Na)NbO₃ and (Ba, Na)(Ti, Nb)O₃ based ceramics prepared by different sintering routes. **Materials**, v. 9, p. 179, 2016.

ELVIN, N.; ERTURK, A. **Advances in energy harvesting methods**. 1. ed. Springer. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário** estatístico de energia elétrica. Rio de Janeiro, 2018.

FELIX, J. L. P.; BALTHAZAR, J. M.; ROCHA, R. T.; TUSSET, A. M.; JANZEN, F. C. On vibration mitigation and energy harvesting of a non-ideal system with autoparametric vibration absorber system. **Meccanica**, v. 53, n. 13, p. 3177-3188, 2018.

FERREIRA, L. F. S. S. **Sistemas de geração de energia via sensores piezoelétricos**. TCC (Graduação), Centro Universitário de Brasília - UniCeub. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - Fatecs. Brasília, 2017.

FUJITSU LABORATORIES ENERGY HARVESTING FROM HUMAN ACTIVITY AND ENVIRONMENT. 2010.

Disponível em: <<https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2010/1209-01.html>>. Acesso em: 15 de fev. 2022.

GARZERI, F. J. **Dinâmica não linear de um pórtico plano sob carregamento não ideal: análise numérica e experimental**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2001.

GOTTWALD, G. A.; MELBOURNE, I. The 0-1 test for chaos: a review. **Part of the Lecture Notes in Physics**, Book, v. 915, 2006.

ILIUK, I. **Análise de um sistema de captura de energia piezoelétrico não linear e não ideal utilizando-se uma estrutura apórticada**. Tese de Doutorado. São Paulo: USP-SP, 2016.

ILIUK, I.; BALTHAZAR, J. M.; TUSSET, A. M.; FELIX, J. L. P.; PONTES, B. R. On non-ideal and chaotic energy harvester behavior. **Differential Equations and Dynamical Systems**, v. 21, n. 1, p. 93-104, 2013. DOI: 10.1007/s12591-012-0127-5.

ILIUK, I.; BALTHAZAR, J. M.; TUSSET, A. M.; PIQUEIRA, J. R.; PONTES, B. R.; FELIX, J. L.; BUENO, Á. M. Application of passive control to energy harvester efficiency using a nonideal portal frame structural support system. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 25, 2013. DOI: 10.1177/1045389X13500570.

ILIUK, I.; BALTHAZAR, J. M.; TUSSET, A. M.; PIQUEIRA, J. R.; PONTES, B. R.; FELIX, J. L.; BUENO, Á. M. Application of passive control to energy harvester efficiency using a nonideal portal frame structural support system. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 25, n. 4, p. 417-429, 2014.

JAFFE, B. **Piezoelectric ceramics**. 1. ed. New York, Academic, 1971.

JALILI, N. **Piezoelectric-based vibration control: from macro to micro/nano scale systems**. Springer Publishing Company, Book, 2010.

JI, Q.; ZHANG, D.; GENG, J. Information linkage, dynamic spillovers in prices and volatility between the carbon and energy markets. **Journal of Cleaner Production**. v. 198, p. 972-978, 2018.

KHAN, S.; ALVI, A. N.; JAVED, M. A.; AL-OTAIBI, Y. D.; BASHIR, A. K. An efficient medium access control protocol for RF energy harvesting based IoT devices. **Computer Communications**, v. 171, p. 28-38, 2021.

KOGA, H.; MITSUYA, H.; HONMA, H.; FUJITA, H.; TOSHIYOSHI, H.; HASHIGUCHI G. Development of a cantilever-type electrostatic energy harvester and its charging characteristics on a highway viaduct. **Micromachines**, v. 8, p. 293. 2017.

KONONENKO, V. O. **Vibrating systems with limited power supply**. London: Illife Books, 1969.

LAY, R.; DEIJS, G. S.; MALMSTRÖM, J. The intrinsic piezoelectric properties of materials: a review with a focus on biological materials. **RSC Advances**, v. 11, p. 30657-30673, 2021.

LIMA, R. A. A produção de energias renováveis e o desenvolvimento sustentável: uma análise no cenário da mudança do clima. **Energy Law in Brazil**, v. 5, 2012.

MOOK, D. T.; PLAUT, R. H.; HAQUANG, N. The influence of an internal resonance on non-linear structural vibrations under subharmonic resonance conditions. **Journal of Sound and Vibration**, v. 102, p. 473-492. 1985.

MORAES, R. M. **Desenvolvimento de sistema para coleta de energia vibracional utilizando dispositivos piezoelétricos**. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades**. ATCP Engenharia Física. São Carlos, 2010.

PRIYA, S.; INMAN, D.J. **Energy harvesting technologies**. Springer Publishing Company, Book, 2009.

QIAN, W.; YANG, W.; ZHANG, Y.; BOWEN, C. R.; YANG, Y. Piezoelectric materials for controlling electro-chemical processes. **Nano-Micro Letters**, v. 12, p. 149, 2020.

RANGEL, R. F. **Caracterização de uma célula tubular para geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

ROCHA, R. T.; BALTHAZAR, J. M.; TUSSET, A. M.; PICCIRILLO, V.; FELIX, J. L. P. Comments on energy harvesting on a 2:1 internal resonance portal frame support structure, using a nonlinear-energy sink as a passive controller. **International Review of Mechanical Engineering**, v. 10, p.147-156, 2016.

ROCHA, R. T.; BALTHAZAR, J. M.; TUSSET, A. M.; QUINN, D. D. An analytical approximated solution and numerical simulations of a non-ideal system with saturation phenomenon. **Nonlinear Dynamics**, v. 94, p. 429 - 442, 2018.

RODRIGUES, J. I. P. **Integração de fontes de energia renovável em sistemas elétricos isolados**. Dissertação (Mestrado), Engenharia Eletrônica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2019.

RYU, H.; YOON, H. J.; KIM, S. W. Hybrid energy harvesters: toward sustainable energy harvesting. **Advanced Materials**, v. 31, 2019.

SHI, B.; LI, Z.; FAN, Y. Implantable energy-harvesting devices. **Advanced Materials**, v. 30, 2018.

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

STANTON, S.; MCGEHEE, C.; MANN, B. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: investigation of a bistable piezoelectric inertial generator. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 239, n. 10, p. 640 - 653, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physd.2010.01.019>.

STRIELKOWSKI, W.; GREBENNIKOVA, V.; RAZINKINA, H.; RUDENKO, E. **Relationship between globalization and internationalization of higher education**. VI International Scientific Conference "Territorial Inequality: a Problem or Development Driver, v. 301, 2021.

TRIPLETT, A; QUINN, D. D. The effect of non-linear piezoelectric coupling on vibration-based energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, p. 1959-1967, 2009.

TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M. On the chaotic suppression of both ideal and non-ideal duffing based vibrating systems, using a magnetorheological damper. **Differential Equations and Dynamical Systems**, v. 21, p. 105-121, 2013.

TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M.; CHAVARETTE, F.R.; FELIX, J. L. P. On energy transfer phenomena, in a nonlinear ideal and non-ideal essential vibrating systems, coupled to a (MR) magneto-rheological damper. **Nonlinear Dynamics**, v. 69, p. 1859 - 1880, 2012.

TUSSET, A. M.; BALTHAZAR, J. M.; FELIX, J. L. P. On elimination of chaotic behavior in a non-ideal portal frame structural system, using both passive and active controls. **Journal of Vibration and Control**, v. 19, n. 6, p. 803 - 813, 2013.

VAKAKIS, A. F.; GENDELMAN, O. V.; BERGMAN, L. A.; MCFARLAND, D. M.; KERSCHEN, G.; LEE, Y. S. **Nonlinear target energy transfer in mechanical and structural systems**. 1. ed. Springer Netherlands - Solid Mechanics and Its Applications, Book, 2009.

VALLEM, V.; SARGOLZAEIAVAL, Y.; OZTURK, M.; LAI, Y.; DICKEY, M. D. Energy harvesting and storage with soft and stretchable materials. **Advanced Materials**, v. 33, 2021.

VASCONCELOS, M. L. D.; PIMENTEL, M. S.; CALLADO, A. A. C. Evidenciação nos relatórios de sustentabilidade das empresas de energia elétrica com base na NBC T15. **Amazônia, Organizações e Sustentabilidade**, v. 7, n. 2, p. 123 - 138, 2018.

WANG, S. Sports training monitoring of energy-saving IoT wearable devices based on energy harvesting. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 45, 2021.

WILLIAMS, C.; YATES, R. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 52, p. 8 -11, 1996.