



XXVIII CREAM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica
Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

ANÁLISE NUMÉRICA NUM DISPOSITIVO COLETOR DE ENERGIA ASSIMÉTRICO NÃO LINEAR

Roberto Luo, cai.roberto@graduacao.uerj.br¹
João Pedro Norenberg, jp.norenberg@unesp.br²
Americo Cunha Jr, ameroico.cunha@uerj.br¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, Brasil,

²Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, Brasil.

Resumo. Dispositivos coletores de energia convertem energia dispersa no meio ambiente em energia elétrica. Além de serem uma alternativa sustentável ao uso de baterias, podem tornar aparelhos eletrônicos autônomos. Nesse sentido, os coletores de vibração, que convertem energia cinética em elétrica por meio de materiais piezoelétricos, se destacam devido à simplicidade e eficiência na geração de energia. O presente trabalho investiga um dispositivo coletor de energia vibratório, não linear, assimétrico com o objetivo de analisar o comportamento do sistema dinâmico ao varrer uma faixa de amplitude de forçamento. Para isso são utilizadas as bacias de atração baseada no cálculo do teste 0-1, que mapeiam a sensibilidade do sistema em relação às condições iniciais, já o teste 0-1, permite caracterizar a dinâmica do sistema quanto à sua regularidade através de um classificador binário. Devido à não linearidade, o sistema é sensível às condições iniciais, levando para diferentes soluções. Para uma baixa amplitude de forçamento, o sistema apresenta baixa energia e comportamento regular, à medida que aumenta este parâmetro, surgem atratores com órbitas de alta energia. Ademais, a assimetria pode acarretar em soluções cuja órbita tem baixa energia.

Palavras chave: Colheita de energia, Coletor de energia assimétrico, Bacias de atração, Teste 0-1 para caos

Abstract. Energy harvesting devices convert energy dispersed in the environment into electric energy. In addition, to be a way to make an electronic device self-sustained, they can be an alternative to the use of batteries. In this context, vibration-based energy harvesters, which convert kinetic energy to electric potential with aid of piezoelectric materials, are particularly interesting due to their simplicity and efficiency. The current paper investigates an asymmetrical non-linear energy harvester device, over a certain bias angle and range of physical parameters, which aims to analyze the behavior of the dynamical system by sweeping a range of excitation amplitude. To tackle this task, basins of attraction based on 0-1 test for chaos are used to map the system's sensibility with respect to the initial conditions, while test 0-1 characterize the dynamics behavior as to its regularity through a binary classifier. Due to nonlinearity, the system is sensitive to initial conditions, leading to different solutions. For low forcing amplitude, the system has low energy and regular behavior; as this parameter increases, attractors with high energy orbits appear. In addition, asymmetry can lead to solutions whose orbit has low energy.

Keywords: Energy harvesting, Asymmetric energy harvester, Basins of attractions, Test 0-1 for chaos

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas os dispositivos coletores de energia têm sido bastante explorados, devido à capacidade de converter energia dispersa no meio ambiente (por exemplo, vibração, solar, eólica, térmica, etc.) em energia elétrica. Essa tecnologia possibilita uma alternativa sustentável ao uso de baterias em dispositivos eletrônicos de baixa potência que além de reduzir o descarte de baterias, produz energia limpa. A literatura apresenta diversas aplicações, por exemplo: em implantes médicos como o marcapasso que utiliza a energia cinética dos batimentos cardíacos como fonte de energia (Karami and Inman, 2012). Wang *et al.* (2020) apresentaram protótipo de um sensor sem fio integrado ao dispositivo coletor de energia, alimentado pela rotação de um motor a jato; já nas estradas, Hong *et al.* (2020) analisaram o dispositivo piezoelétrico capaz de alimentar sinalizadores verticais quando veículos passam por cima do aparelho.

O presente trabalho analisa um dispositivo coletor de energia vibratório, que pode ser utilizado em diversas aplicações como: corpo humano, veículos, aeronaves, construções civis, etc. Na qual a energia cinética dispersa pode ser convertida em energia elétrica por meio do efeito piezoelétrico. Apesar da vantagem que a vibração está presente em diversos locais, criar um modelo físico capaz de gerar energia sobre diferentes níveis de excitação tem sido um desafio, visto que a vibração varia conforme a frequência e amplitude. Ademais, na literatura, coletores de energia lineares apresentam

potência de saída reduzida, limitando as possibilidades de aplicação. Nesta linha, Cottone *et al.* (2009) e Erturk *et al.* (2009) propuseram o dispositivo coletor de energia biestável não linear, contornando a limitação na faixa de ressonância, e demonstrando um aumento substancial na potência de saída em comparação ao linear. Peterson *et al.* (2017) e Lopes *et al.* (2019) analisaram o mesmo modelo para uma faixa de parâmetros físicos, apresentando comportamento caótico ou regular na dinâmica. A presença de caos pode ser danoso e reduzir a eficiência do objeto em questão. Nesta linha, estratégias foram elaboradas para melhoria da eficiência na geração de energia, em que de la Roca *et al.* (2019) utilizaram o método OGY para controlar o comportamento caótico na dinâmica do coletor de energia, podendo ser útil ou decair a eficiência energética, dependendo do sinal. Em adição, o controle de caos analisados por Telles Ribeiro *et al.* (2022) através de filtros digitais que permitem estabilizar a dinâmica do sistema para obter um sinal regular. Ademais, Peterson *et al.* (2016) otimizaram a potência média gerada através da análise da influência dos parâmetros físicos no dispositivo coletor de energia piezoelétrico. Nesta linha, Cunha (2021) propôs a otimização do dispositivo coletor de energia biestável através do método da entropia cruzada, buscando as melhores combinações de parâmetros que maximizem a potência elétrica.

Assimetrias podem ser adicionadas ou inerentes à dinâmica do dispositivo coletor de energia não linear, seja por meio de inclinação, força magnética, imperfeições oriundas no processo de manufatura e não homogeneidade dos materiais. Desta forma, Wang *et al.* (2018) modelaram um dispositivo coletor de energia não linear assimétrico, e mostraram que a presença de assimetrias apresenta um efeito negativo, por outro lado, verificaram um ângulo ótimo que pode gerar um aumento substancial. Baseado no mesmo modelo assimétrico, Luo *et al.* (2021) analisaram para uma faixa parâmetros físicos, apresentando comportamento regular ou fractais e a eficiência energética varia conforme o ângulo de inclinação. E trabalhos recentes (Norenberg *et al.*, 2021a) e (Norenberg, 2022) realizaram uma análise de sensibilidade global por meio do índice de Sobol, investigando quais parâmetros cruciais que influenciam no processo de colheita de energia, além de validar experimentalmente os resultados numéricos em relação à influência da assimetria e faixas de excitação.

Neste contexto, o presente trabalho investiga o dispositivo coletor de energia não linear assimétrico sobre um determinado ângulo ótimo e faixa de parâmetros físicos e amplitude de excitação. Devido à presença da não linearidade, são avaliadas às bacias de atração baseado em teste 0-1, no que permite classificar o comportamento dinâmico do sistema.

2. COLETOR DE ENERGIA ASSIMÉTRICO

A Figura 1 ilustra o esquemático do dispositivo coletor de energia assimétrico, que consiste em uma base rígida com um par de ímãs fixados na parte inferior, além de apresentar um circuito resistivo acoplado na parte superior, juntamente com duas lâminas de material piezoelétrico e uma lâmina ferromagnética para que a extremidade vibre livremente. A base apresenta um certo ângulo de inclinação que produz assimetrias, juntamente com a inclinação dos ímãs na dinâmica do sistema. O dispositivo é periodicamente excitado por uma fonte externa que induz a viga vibrar, assim a energia cinética é convertida em energia elétrica através do material piezoelétrico.

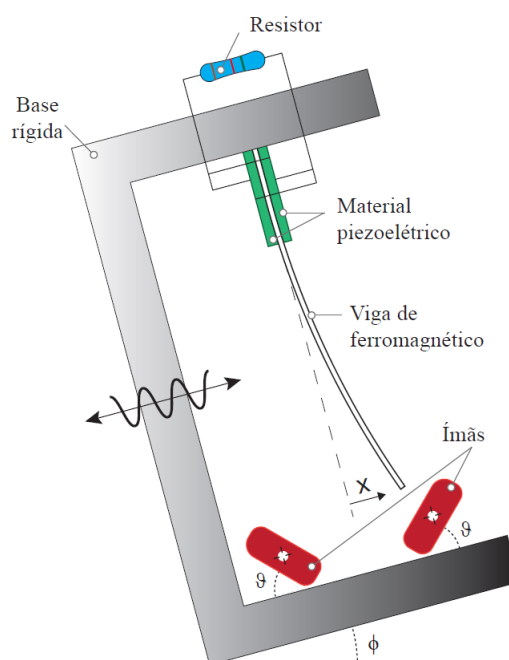


Figura 1. Ilustração do dispositivo coletor de energia não linear assimétrico

A dinâmica deste dispositivo é caracterizada por um problema de valor inicial

$$\ddot{x} + 2 \xi \dot{x} - \frac{1}{2} x (1 + 2 \delta x - x^2) - \chi v - p \sin \phi = f \cos(\Omega t), \quad (1)$$

$$\dot{v} + \lambda v + \kappa \dot{x} = 0, \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0, v(0) = v_0, \quad (3)$$

onde, ξ a constante de amortecimento; δ o coeficiente de rigidez quadrático associado à assimetria; χ o acoplamento piezoelétrico da equação mecânica; $p \sin \phi$ a força equivalente gravitacional da viga; Ω a frequência de forçamento; f a amplitude de forçamento; λ o tempo característico inverso; κ o acoplamento piezoelétrico da equação elétrica. Por fim, as condições iniciais, posição, velocidade e os parâmetros são adimensionais e a presença do ponto na parte superior é a notação da derivada em relação ao tempo.

3. BACIAS DE ATRAÇÃO

As bacias de atração são uma ferramenta que mapeia a sensibilidade em relação às condições iniciais que levam a determinado(s) atrator(es). Para obtê-las é feita a discretização do plano deslocamento versus velocidade ($x_0 \times \dot{x}_0$) com uma malha de 1200×1200 pontos uniformemente espaçados. Logo, a equação do sistema dinâmico é numericamente integrada por um longo tempo, tendo cada ponto da malha como condição inicial. Em seguida, as séries temporais obtidas são utilizadas no teste 0-1 para caos indicando se a dinâmica evolui para um comportamento caótico ou regular para determinar os atratores do sistema. Por fim, os atratores são catalogados em uma esquemática de cores, determinando que condições iniciais levam para cada atrator. O processo termina até que todas os pontos da malha sejam calculados. A Fig. 2 ilustra o esquemático dessa ferramenta.

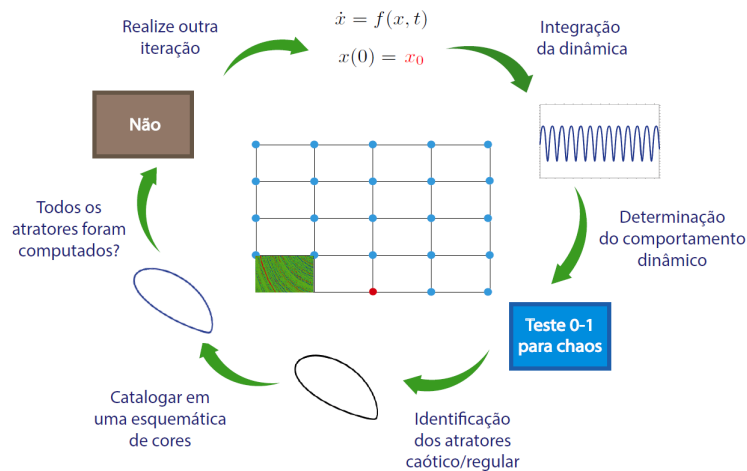


Figura 2. Ilustração esquemática do cálculo das bacias de atração

O teste 0-1 para caos proposto por Gottwald and Melbourne (2016) caracteriza numericamente a dinâmica do sistema, determinando se evolui para um comportamento caótico ou regular através do classificador K_c . Para realizar o teste, é necessário como parâmetros de entrada a discretização da série temporal do sistema através da integração numérica, $\Phi = (\phi(t_1), \phi(t_2), \phi(t_3), \dots, \phi(t_n))$. Em seguida, é sorteado valores aleatórios de c em um intervalo $[0, 2\pi)$ e utilizado juntamente com as séries temporais para uma mudança de coordenadas através das Eq. (4) e Eq. (5),

$$p_n(c) = \sum_{j=1}^n x(t_j) \cos(jc), \quad (4)$$

$$q_n(c) = \sum_{j=1}^n x(t_j) \sin(jc), \quad (5)$$

para $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Em seguida é realizado o desvio médio padrão quadrático para analisar o comportamento difusivo de p_n e q_n através da Eq. (6),

$$M_n(c) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [p_{j+n}(c) - p_j(c)]^2 + [q_{j+n}(c) - q_j(c)]^2 \quad (6)$$

para $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Se p_n e q_c apresentam uma trajetória limitada, a dinâmica é dita regular, caso cresçam linearmente é a dinâmica é caótica.

Por fim, a Equação (7) determina o classificador K_c ,

$$K_c = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{cov(t_n, M_n)}{\sqrt{var(t_n)var(M_n)}} \quad (7)$$

onde cov e var são os operadores covariância e variância respectivamente e $M_n = (M_1, M_2, M_3, \dots, M_N)$ e $t_n = (t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$.

Os autores (Gottwald and Melbourne, 2016) provam que a saída do teste, K_c , é 0 para comportamento regular e 1, caótica. Neste trabalho, considera-se $K_c < 0.2$ para dinâmica regular e $K_c > 0.8$ dinâmica caótica, para valores entre 0.2 e 0.8 são ditos inconclusivos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 e 4 ilustram as projeções dos atratores e as bacias de atração respectivamente, no plano deslocamento versus velocidade na região $(x, \dot{x}) \in [-3,3] \times [-3,3]$. Os resultados foram obtidos por meio dos parâmetros utilizados na simulação: $\xi = 0.01$, $\delta = 0.15$, $\chi = 0.05$, $p = 0.59$, $\Omega = 0.8$, $\lambda = 0.05$, $\kappa = 0.5$, $\phi = 35^\circ$, $0.019 \leq f \leq 0.275$ com intervalos de 0.032. O código utilizado para geração das bacias de atração está disponível no pacote STONEHENGE (Norenberg *et al.*, 2021b), ferramentário que permite calcular a dinâmica de coletores de energia vibratórios não lineares.

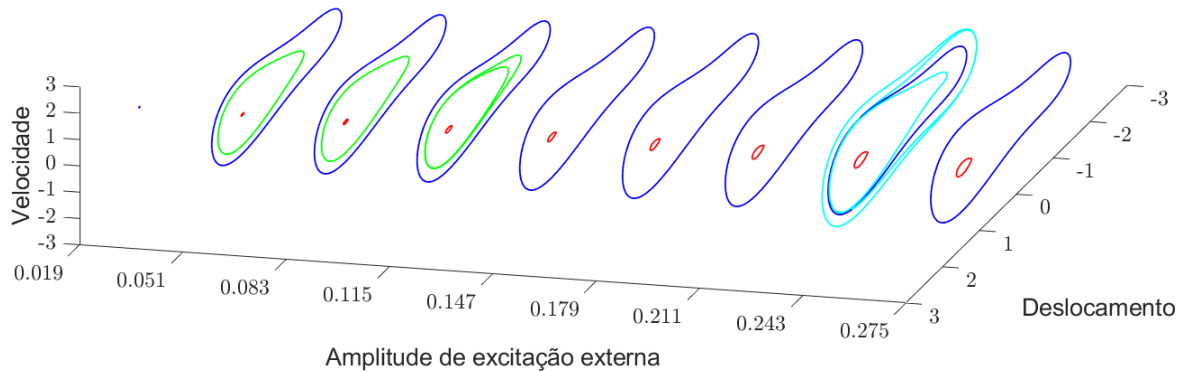


Figura 3. Projeção dos atratores na região $(x, \dot{x}) \in [-3,3] \times [-3,3]$ no plano deslocamento versus velocidade inicial para diferentes valores de amplitude de forçamento

Cada cor ilustrada nas bacias de atração apresenta um atrator, isto é, uma solução no regime permanente que depende da condição inicial representada na Fig. 3. Na Fig. 4a, com baixa amplitude de forçamento, $f = 0.019$, há somente a bacia vermelha e o seu respectivo atrator vermelho de baixa órbita energética de período 1. Ao aumentar a amplitude de forçamento para $f = 0.051$, surgem mais duas bacias de cor azul e verde, ambas de período 1. Ademais a bacia azul apresenta maior órbita de energia em relação ao deslocamento e velocidade, sendo uma solução desejável ao sistema, já a bacia verde com média órbita energética. Para $f = 0.083$ houve uma diminuição nas bacias verde e vermelha e um crescimento da bacia azul. Em $f = 0.115$, há o encolhimento da bacia verde conforme a Fig. 4d, mas em relação ao correspondente atrator apresenta uma órbita de período 4. Para as Fig. 4e e 4f, há a expansão da bacia vermelha em relação a azul, na qual apresenta maior chance de convergir para a solução de baixa energia e em relação aos atratores, mostra um tímido aumento. Para altas amplitudes de excitação, $f = 0.211$, a bacia azul se expande em comparação ao caso anterior. Aumentando para $f = 0.243$, há a criação da bacia de cor ciano, além da redução das bacias azul e vermelha. Em relação ao atrator, apresenta transiente caótico em relação às demais. Por fim, em $f = 0.275$ há a destruição das demais bacias, restando apenas as bacias azul e vermelha. Ademais, com base nos parâmetros analisados, à medida que a amplitude de forçamento aumenta, apresenta um pequeno incremento na amplitude dos atratores em comparação aos intervalos anteriores, uma vez que a viga aumenta o deslocamento e velocidade gerando maior energia de saída. No entanto, ao comparar a Fig. 4i com a Fig. 4e, na faixa de alta amplitude de forçamento o sistema apresenta maiores condições de resultar em uma órbita de baixa energia, o que não é vantajoso, uma vez que o dispositivo utiliza muita energia para gerar baixa potência de saída. Já para $0.083 \leq f \leq 0.147$, sobre diferentes condições iniciais é possível obter órbitas de média e alta energia. Pela presença do ângulo de inclinação na base, $\phi = 35^\circ$, o dispositivo oscilará neste ângulo apresentando assimetria nas soluções, conforme ilustrado na Fig. 4 e pode reduzir o movimento da viga gerando menor energia, representado pelo atrator vermelho.

O comportamento da dinâmica do dispositivo para uma ampla faixa de amplitude de forçamento, com determinado

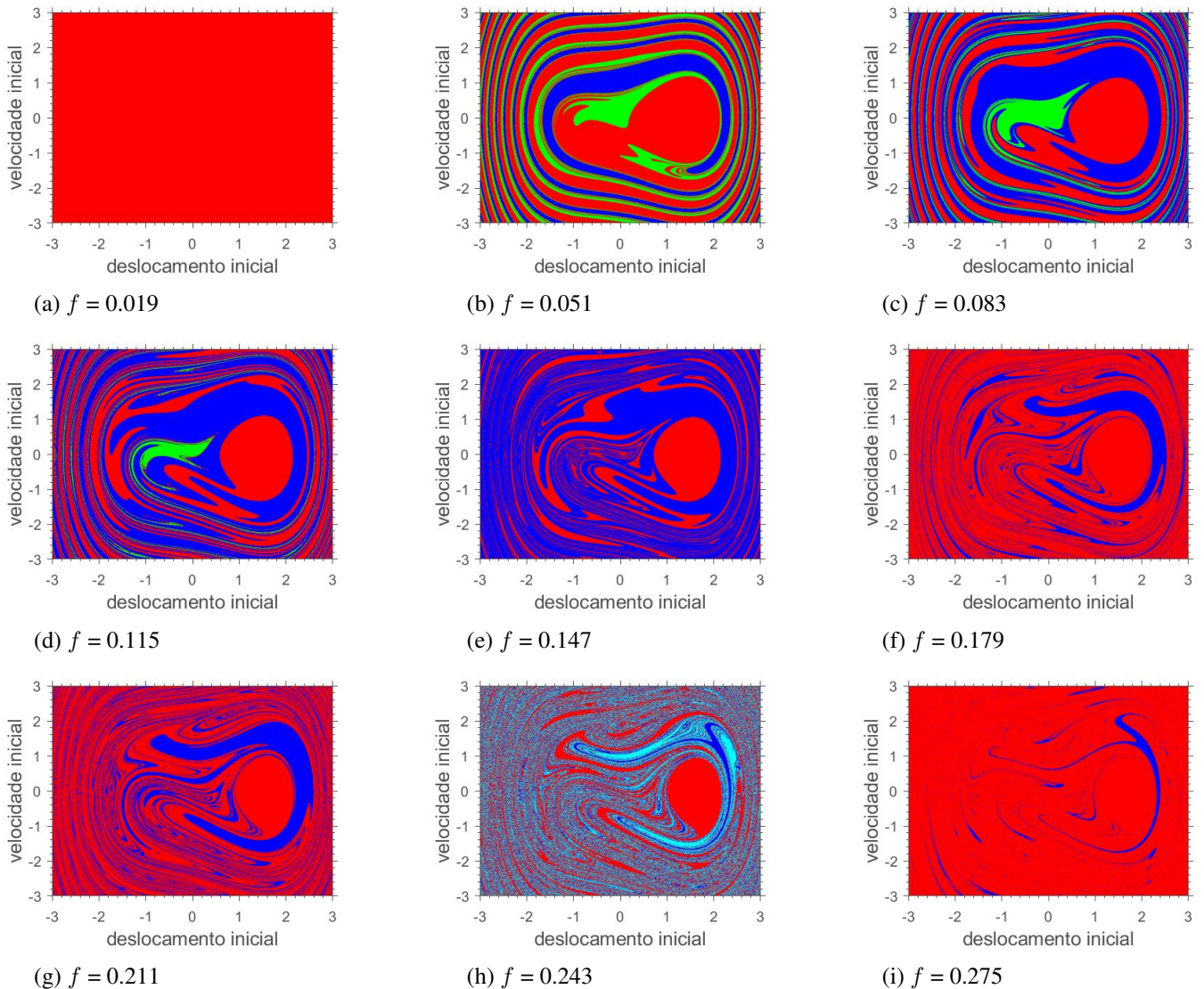


Figura 4. Projeção das bacias de atração na região $(x, \dot{x}) \in [-3,3] \times [-3,3]$ no plano deslocamento versus velocidade inicial e $v = 0$ para diferentes valores de amplitude de forçamento

ângulo de inclinação e próximo da faixa de ressonância é investigado, apresentando um comportamento complexo, devido à sensibilidade do sistema em relação às condições iniciais e dos parâmetros físicos, acarretando em diferentes soluções. Para uma baixa amplitude de forçamento há uma menor conversão de energia, conforme este parâmetro aumenta há mais energia no sistema, pode ser desvantajoso à geração de energia. Além da presença de bacias fractivas, surge a bacia de cor ciano de período 6 na região de alta amplitude de forçamento, ainda no regime transiente. Desta forma, analisar a dinâmica do dispositivo coletor assimétrico permite encontrar que parâmetros apresentam melhor geração de energia.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a dinâmica do dispositivo coletor de energia não linear assimétrico, por meio das bacias de atração e teste 0-1. A dinâmica do sistema é caracterizada pela sensibilidade do sistema em relação às condições iniciais, sob influência do ângulo ótimo e da amplitude de forçamento. Para cada valor da amplitude de forçamento, as bacias apresentam diferentes soluções com diferentes níveis energéticos e períodos. Um conjunto de condições iniciais foi mapeado, por levarem à trajetória de atratores de diferentes comportamentos e complexidade na dinâmica do sistema. Ademais, para os parâmetros analisados o sistema apresentou mais condições de obter média e alta órbitas de energia em uma faixa média de amplitude de forçamento.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq, da FAPERJ, da CAPES e da ABCM.

7. REFERÊNCIAS

- Cottone, F., Vocca, H. and Gammaitoni, L., 2009. “Nonlinear energy harvesting”. *Physical Review Letters*, Vol. 102, p. 080601.
- Cunha, A., 2021. “Enhancing the performance of a bistable energy harvesting device via the cross-entropy method”. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 103, pp. 137–155.
- de la Roca, L., Peterson, J.V.L.L., P, M. and Cunha Jr, A., 2019. “Control of chaos via ogy method on a bistable energy harvester”. In *Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2019*. Uberlândia, Brazil.
- Erturk, A., Hoffmann, J. and Inman, D., 2009. “A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting”. *Applied Physics Letters*, Vol. 94, p. 254102.
- Gottwald, G. and Melbourne, I., 2016. “The 0-1 test for chaos: A review”. *Chaos Detection and Predictability*, Vol. 915, pp. 221–247.
- Hong, S.D., Kim, K.B., Hwang, W., Song, Y.S., Cho, J.Y., Jeong, S.Y., Ahn, J.H., Kim, G.H., Cheong, H. and Sung, T.Y., 2020. “Enhanced energy-generation performance of a landfilled road-capable piezoelectric harvester to scavenge energy from passing vehicles”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 215, p. 112900.
- Karami, M.A. and Inman, D.J., 2012. “Powering pacemakers from heartbeat vibrations using linear and nonlinear energy harvesters”. *Applied Physics Letters*, Vol. 100, p. 042901.
- Lopes, V.G., Peterson, J.V.L.L. and Cunha Jr, A., 2019. “Nonlinear Characterization of a Bistable Energy Harvester Dynamical System”. In M. Belhaq, ed., *Topics in Nonlinear Mechanics and Physics: Selected Papers from CSNDD 2018 (Springer Proceedings in Physics)*, Springer, Singapore, pp. 71–88.
- Luo, R., Norenberg, J.P. and Cunha Jr, A., 2021. “Estudo numérico sobre a influência da assimetria num dispositivo coletor de energia não linear”. In *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics - CNMAC 2021*. Campo Grande, Brazil.
- Norenberg, J.P., 2022. *Sensitivity analysis and uncertainty quantification of (a)symmetric bistable energy harvesters*. Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista.
- Norenberg, J.P., Luo, R., Cunha Jr, A., da Silva, S. and Varoto, P.S., 2021a. “Remarks on the dynamic behavior of an asymmetric bistable energy harvester”. In *Proceedings of the 26th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2021*. Florianópolis, Brazil.
- Norenberg, J.P., Peterson, J.V., Lopes, V.G., Luo, R., de la Roca, L., Pereira, M., Telles Ribeiro, J.G. and Cunha Jr, A., 2021b. “STONEHENGE — suite for nonlinear analysis of energy harvesting systems”. *Software Impacts*, Vol. 10, p. 100161.
- Peterson, J.V.L.L., Lopes, V.G. and Cunha Jr, A., 2016. “Maximization of the electrical power generated by a piezo-magneto-elastic energy harvesting device”. In *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics - CNMAC 2016*. Gramado, Brazil.
- Peterson, J.V.L.L., Lopes, V.G. and Cunha Jr, A., 2017. “On the nonlinear dynamics of a bi-stable piezoelectric energy harvesting device”. In *Proceedings of the 24th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2017*. Curitiba, Brazil.
- Telles Ribeiro, J.S., Pereira, M., Cunha Jr, A. and Lovisollo, L., 2022. “Controlling chaos for energy harvesting via digital extended time-delay feedback”. *The European Physical Journal Special Topics*, pp. 1–6.
- Wang, W., Cao, J., Bowen, C.R., Inman, D.J. and Lin, J., 2018. “Performance enhancement of nonlinear asymmetric bistable energy harvesting from harmonic, random and human motion excitations”. *Applied Physics Letters*, Vol. 112, p. 213903.
- Wang, Y., Yang, Z., Li, P., Cao, D., Huang, W. and Inman, D.J., 2020. “Energy harvesting for jet engine monitoring”. *Nano Energy*, Vol. 75, p. 104853.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.