



APLICAÇÃO DE OSCILADORES ELETRÔNICOS PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL EM REDES COMPLEXAS

Débora D. Superbi ¹; Victor Hugo S. Bittencourt ²; Wanderley C. da Silva Junior ³; Leandro Freitas de Abreu ⁴;

1 Débora D. Superbi, Bolsista (FAPEMIG), Eng. de Controle e Automação, IFMG Campus Betim, Contagem - MG; deboradsuper@gmail.com

2 Victor Hugo S. Bittencourt, Eng. de Controle e Automação, IFMG Campus Betim, Betim – MG; victorhugo.bittencourt@gmail.com

3 Wanderley C. da Silva Junior, Eng. de Controle e Automação, IFMG Campus Betim, Contagem – MG; junior.wanderley.2000@gmail.com

4 Leandro Freitas de Abreu: Pesquisador do IFMG, Campus Betim; leandro.freitas@ifmg.edu.br

RESUMO

A sincronização é um fenômeno que abrange uma ampla gama de áreas, desde sistemas naturais, como biológicos e tecnológicos, até sociais. Isso inclui a compreensão de modelos epidemiológicos, reações químicas [8], redes genéticas e neuronais [9,6], além de aplicações práticas, como a resiliência de sistemas elétricos [4]. Neste contexto, este trabalho nasce a partir de uma pesquisa em andamento que não apenas estudou, projetou e construiu osciladores eletrônicos de quadratura, mas que também enfrenta agora o desafio de utilizá-los para testar e replicar experimentos presentes na literatura científica. O objetivo principal deste projeto é desenvolver uma plataforma experimental que permita investigar o comportamento de redes complexas utilizando esses osciladores. A pesquisa focou na modelagem desses osciladores e os comparou com as redes baseadas no modelo clássico de Kuramoto (1975) [7], amplamente conhecido por descrever o sincronismo em sistemas interconectados. Ao longo do processo, uma série de experimentos foi conduzida, nos quais os osciladores foram projetados, construídos e validados com base em previsões teóricas dos modelos de Kuramoto (1975). Esses osciladores foram integrados em redes, permitindo a observação de padrões de sincronização e fenômenos dinâmicos, como o sincronismo explosivo e estados de quimera [10], que refletem comportamentos emergentes críticos para a análise de sistemas reais. No caso do sistema elétrico brasileiro, por exemplo, as propriedades dessas redes foram aplicadas na avaliação da robustez frente a falhas e perturbações, destacando como redes interconectadas podem se beneficiar desse tipo de estudo para melhorar a resiliência. Com os resultados promissores obtidos até agora, planeja-se expandir o número de osciladores para experimentos futuros, o que exige o desenvolvimento de um sistema de visualização e controle mais sofisticado. Esse sistema será essencial para gerenciar a complexidade crescente das redes interconectadas e facilitar a configuração dos experimentos, proporcionando uma interface intuitiva e interativa para o monitoramento em tempo real. Espera-se que a plataforma simplifique o acesso aos estudos sobre redes dinâmicas, ampliando as possibilidades de pesquisa em diversas áreas. Conclui-se, portanto, que os osciladores de quadratura, além de apresentarem comportamentos coerentes com os modelos teóricos, têm grande potencial para oferecer uma solução experimental prática para a investigação de redes dinâmicas, permitindo avanços significativos na compreensão de sistemas acoplados.

PALAVRAS CHAVES:

Redes complexas; Sincronismo; Oscilador de quadratura; Explosividade.



INTRODUÇÃO:

A sincronização é um fenômeno fundamental que se manifesta em uma variedade de sistemas complexos e interdependentes, com implicações que vão desde processos biológicos e tecnológicos até dinâmicas sociais. Esse conceito se refere à capacidade de elementos individuais em um sistema de ajustar seu comportamento de modo a atuar de forma coordenada, o que permite a formação de padrões organizados e coerentes. Em sistemas naturais, a sincronização é observada em processos como a comunicação entre redes neurais [9] ou em pesquisas que estudam o tratamento da doença de Parkinson [6]. Em sistemas tecnológicos, ela é essencial para o funcionamento de redes elétricas, sistemas de comunicação e dispositivos interconectados, nos quais a coordenação entre os componentes garante a estabilidade, a eficiência e a segurança das operações [4]. No contexto social, a sincronização pode ser utilizada para analisar fenômenos como a sincronização do ciclo menstrual em mulheres que convivem juntas [8], contribuindo para modelar interações coletivas e prever padrões de comportamento e difusão.

Nos últimos anos, a investigação científica sobre sincronização em redes complexas [1] tem avançado consideravelmente, impulsionada pela crescente necessidade de desenvolver sistemas mais robustos e adaptáveis. Esse campo de estudo é especialmente relevante em aplicações práticas que demandam resiliência e precisão. Pesquisas recentes buscam explorar como as redes complexas conseguem manter-se organizadas em ambientes sujeitos a perturbações, destacando o papel da sincronização como um mecanismo natural para garantir a resiliência [4].

Este trabalho insere-se em uma linha de pesquisa focada no desenvolvimento de uma plataforma experimental baseada em osciladores eletrônicos de quadratura e o modelo de Kuramoto (1975) [7]. Estes osciladores foram projetados para emular, em laboratório, o comportamento de sistemas sincronizados e são uma ferramenta experimental importante para a investigação de redes dinâmicas interconectadas. O estudo e a construção desses osciladores oferecem uma base prática para analisar fenômenos de sincronização, permitindo replicar e validar resultados obtidos na literatura científica.

Portanto, este projeto visa desenvolver métodos experimentais para analisar a sincronização em redes complexas, com aplicações em sistemas reais como redes de energia, neurociência e ciência de dados, criando uma oportunidade valiosa para explorar padrões dinâmicos e para estabelecer conexões diretas entre teoria e prática. A proposta busca avançar a pesquisa em redes dinâmicas, oferecendo uma estrutura prática para futuras investigações e aplicações científicas e tecnológicas.

METODOLOGIA:

O objetivo principal deste projeto foi desenvolver uma plataforma experimental para investigar o comportamento de redes complexas utilizando osciladores eletrônicos. A metodologia adotada focou na modelagem e construção de osciladores de quadratura, que possibilitaram a replicação de fenômenos de sincronização observados em sistemas reais, como redes de osciladores acoplados. Para isso, baseamo-nos no modelo teórico de Kuramoto (1975) [7]. Esse modelo serviu como guia

para o desenvolvimento dos experimentos, onde os osciladores foram projetados e construídos com o objetivo de reproduzir previsões teóricas associadas a fenômenos dinâmicos, como sincronismo e estados de quimera [5].

O oscilador de quadratura, utilizado neste projeto, apresenta diversas vantagens importantes para o estudo da sincronização. Primeiramente, ele fornece duas variáveis de saída — senoidal e cossenoidal — permitindo uma observação mais completa dos padrões de oscilação nas redes de osciladores (Graeme et al., 1971). A oscilação gerada é estabilizada sem a introdução de distorções significativas, utilizando técnicas relativamente simples e eficientes. Além disso, a amplitude das oscilações é mantida constante, ou com variações mínimas, mesmo quando ocorrem mudanças na frequência natural, o que facilita a replicação precisa dos fenômenos de sincronização esperados em sistemas reais [4].

Ao longo do projeto, a equipe desenvolveu diferentes versões de placas para os osciladores [3] e, após ajustes e aprimoramentos, chegou a uma versão final que incluiu um oscilador de quadratura e uma placa de acoplamento integrada (Fig. 1; Fig. 2). Essa configuração não apenas assegura a estabilidade das oscilações, mas também facilita as conexões entre os osciladores, permitindo variações controladas nas condições de acoplamento.

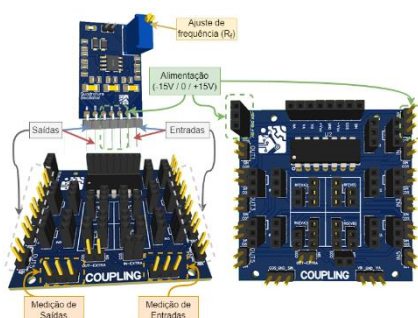


Figura 1: Oscilador de quadratura e placa de acoplamento. Autoria própria.

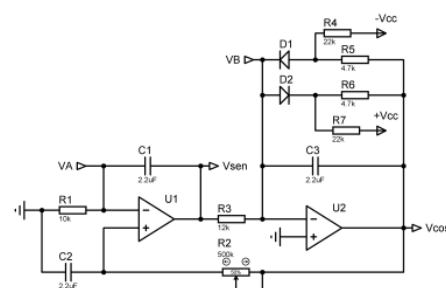


Figura 2: Esquemas do oscilador eletrônico de quadratura. A frequência de oscilação pode ser alterada ajustando o potenciômetro R2. O circuito implementado possui dois pontos de medição, v_{sen} e v_{cos} , além de dois pontos de acoplamento com outros n.ºs da rede: VA e VB [2].

As medições experimentais foram realizadas com uma placa de aquisição de dados NI 6009 USB, e o software MATLAB foi utilizado para gravação e análise dos sinais coletados. As dinâmicas dos sistemas também foram simuladas em Python, empregando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para garantir precisão nos resultados [3].

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Os experimentos realizados confirmaram a viabilidade dos osciladores de quadratura como elementos básicos na construção de redes complexas, revelando a formação de padrões de sincronização robustos e dinâmicas críticas que refletem o comportamento de sistemas reais interconectados.



Durante os testes, foi possível observar fenômenos de sincronismo em diferentes configurações de acoplamento, incluindo o sincronismo explosivo e estados de quimera [10], que são fundamentais para compreender a estabilidade e o comportamento emergente dessas redes.

Esses padrões de sincronização foram aplicados ao estudo de resiliência de redes interconectadas, como no caso do sistema elétrico brasileiro. A partir dos resultados, foi possível analisar como redes interdependentes reagem a falhas locais e a oscilações inesperadas, fornecendo uma base prática para avaliar a robustez do sistema diante de perturbações e falhas estruturais. Esses achados não apenas validam as previsões teóricas do modelo de Kuramoto [7] como também demonstram o potencial dos osciladores eletrônicos na modelagem de cenários reais de risco e recuperação em redes de infraestrutura crítica.

Os avanços obtidos abrem novas possibilidades para o estudo da resiliência em redes complexas, contribuindo tanto para a teoria quanto para aplicações práticas em sistemas tecnológicos e físicos.

CONCLUSÕES:

Conclui-se que a validação dos osciladores eletrônicos de quadratura demonstrou sua eficácia no estudo de redes complexas e na análise de sincronismo explosivo, fenômeno caracterizado pela rápida transição entre estados sincronizados e não sincronizados e o estado de quimera. Fatores como a topologia da rede, a frequência natural dos osciladores e as forças de acoplamento influenciam significativamente o comportamento do sincronismo explosivo [2]. Observou-se que redes com maior grau de interconexão tendem a exibir maior explosividade, e que menores variações nas frequências ou nas forças de acoplamento aumentam a propensão ao sincronismo explosivo, características que são de grande interesse para a compreensão de redes interconectadas e dinâmicas instáveis.

Como perspectiva futura, há grande potencial para expandir a plataforma, ampliando o número de osciladores e, conseqüentemente, a complexidade das redes simuladas, permitindo o estudo de topologias mais variadas e dinâmicas emergentes em maior escala. Outra linha de desenvolvimento envolve a criação de uma plataforma automatizada que permita a medição e o ajuste automático dos parâmetros, facilitando a manipulação de variáveis e a obtenção de dados com maior precisão e eficiência. A implementação de um sistema de monitoramento e controle em tempo real possibilitaria uma análise interativa dos fenômenos observados, essencial para a otimização dos parâmetros e para a interpretação detalhada dos padrões dinâmicos em redes complexas.

Além disso, a plataforma desenvolvida tem o potencial de ser aplicada em estudos de outras áreas, como redes biológicas e sistemas de comunicação, permitindo desdobramentos em novas frentes de pesquisa e contribuindo para o desenvolvimento de metodologias inovadoras na teoria de redes e na ciência de sistemas interconectados. Esses novos estudos, tanto práticos quanto teóricos, prometem aprofundar o conhecimento sobre redes dinâmicas, ampliando a compreensão dos fenômenos de sincronização e das condições que levam ao sincronismo explosivo em diversos tipos de redes.



REFERÊNCIAS:

1. Arenas, A.; Diaz-Guilera, A.; Kurths, Y.; Moreno, Y.; Changsong, Z. “Synchronization in complex networks.” *Phys. Rep.* 469, 93–153 (2008).
2. Bittencourt, V. H. S.; Junior, W. C. S.; Dias, A. C. B.; Aguirre, L. A.; Freitas, L. “Influência da topologia na emergência de sincronismo explosivo em redes de osciladores”. XXV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Sociedade Brasileira de Automática (SBA), v. 1, n. 1, 2024.
3. Bittencourt, V. H. S.; Junior, W. C. S.; Montanari, A. N.; Freitas, L. “Projeto, construção e modelagem não lineares do oscilador de quadratura.” XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), Sociedade Brasileira de Automática (SBA), v. 1, n. 1, 2023.
4. Eroglu, Deniz; Lamb, Jeroen S. W.; Pereira, Tiago. “Synchronisation of chaos and its applications.” *Contemporary Physics*, v. 58, n. 3, p. 207-243, 2017. Tradução. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00107514.2017.1345844>.
5. Freitas, L.; Montanari, A. N.; Bittencourt, V. H. S.; Junior, W. C. S.; Aguirre, L. A. “Experimental platform for the Kuramoto model.” Em preparação.
6. Hammond, C.; Bergman, H.; Brown, P. “Pathological synchronization in Parkinson’s disease: networks, models and treatments.” *Trends Neurosci.*, 2007;30(7):357–364.
7. Kuramoto, Y. “Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators.” *Mathematical Problems in Theoretical Physics*, v. 39, p. 420, 1975.
8. McClintock, M. “Menstrual Synchrony and Suppression.” *Nature* 229, 244–245 (1971). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/229244a0>.
9. Novikov, A. V.; Benderskaya, E. N. “Oscillatory neural networks based on the Kuramoto model for cluster analysis.” *Pattern Recognition and Image Analysis* 24, 365–371 (2014). ISSN: 1054-6618. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1134/S1054661814030146>.
10. Rodrigues, F. A.; Peron, T. K. D.; Ji, P.; Kurths, J. “The Kuramoto model in complex networks.” *Physics Reports*, vol. 610, pp. 1–98, jan 2016.