Introdução à teoria de redes complexas com aplicações ao xadrez

Vinícius S. Pimpão (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Haroldo V. Ribeiro (Orientador). E-mail: vini.s.pimpao@gmail.com.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Maringá, PR

Área e subárea do conhecimento: Física, Física Geral/Física Estatística e Termodinâmica

Palavras-chave: Xadrez; Entropia de PageRank; Interações Táticas.

RESUMO

O xadrez é objeto de estudo desde sua criação, em grande parte devido à complexidade que emerge ao longo das partidas. Neste trabalho, modelamos as interações táticas de ataque e defesa entre as peças por meio de redes complexas, buscando uma estrutura estratégica subjacente ao jogo. Analisando 10.727 partidas de campeonatos mundiais e torneios de candidatos (1972-2024), identificamos um eixo funcional ataque-defesa: a defesa concentra maior atividade tática, enquanto o ataque, mais esparso, distribui-se de forma mais homogênea entre as peças.

INTRODUÇÃO

O estudo de sistemas complexos vem chamando a atenção de pesquisadores de diversas áreas nas últimas décadas. Esses sistemas, tipicamente, possuem um grande número de componentes que atuam segundo regras que podem variar no tempo, isto é, são sistemas dinâmicos. Nesse sentido, à primeira vista, pode parecer que o xadrez não se encaixe nesta categoria, uma vez que possui regras determinísticas que guiam o progresso do jogo. No entanto, trabalhos anteriores justificam esta classificação não apenas pelas regras do tabuleiro em si, mas devido à dinâmica emergente das decisões e adaptações psicológicas contínuas dos jogadores [1]. Além disso, no contexto de desenvolvimento das ciências da computação, o xadrez ganhou uma importância como protótipo para testes de algoritmos e inteligência artificial. Como exemplo, Claude Shannon estimou o número de partidas possíveis em 10^{120} [2]. Notoriamente, esta imensidão de possibilidades, oriunda de um conjunto de regras bem definido, torna o jogo excelente para o estudo de processos cognitivos. Diante disso, o desenvolvimento tecnológico, especialmente com o advento do xadrez digital, proporcionou um aumento significativo na quantidade de dados disponíveis sobre partidas de xadrez, permitindo análises quantitativas mais detalhadas e uma melhor compreensão da dinâmica do jogo. Neste trabalho, modelamos as interações de ataque e defesa das peças no tabuleiro, por meio da teoria de redes complexas, a fim de identificar padrões emergentes e compreender como as peças interagem durante o jogo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Formalmente, uma rede complexa $\square = (\square, \square)$, também chamada de grafo, é um objeto matemático que consiste de dois conjuntos, em que os elementos de $\square$, denominados nós, representam elementos constituintes de um sistema, e os elementos de $\square$, os links, denotam algum tipo de relação ou interação entre eles. Assim, se $\square \neq \square$ e $\square$ é um conjunto de pares não ordenados (ordenados) de elementos de $\square$, dizemos que $\square$ é um grafo não direcionado (direcionado) [3]. Utilizando os dados dos campeonatos mundiais e torneios de candidatos de 1972 a 2024, disponíveis gratuitamente pelo site PGN Mentor [4], obtivemos um total de 10.727 partidas, após selecionarmos apenas os jogos cujos jogadores possuíam um Elo bem definido. E, com isso, construímos uma rede direcionada que descreve as interações táticas de ataque e defesa estabelecidas pelas peças do tabuleiro em um determinado *ply* de uma partida, sendo $\square = \{\square_1, \square_2, \ldots, \square_\square\}$ o conjunto de peças vivas naquele instante, e um link direcionado $\square_{\square\square} \in \square$ traçado de $\square_\square$ com destino a $\square_\square$ se: (i) $\square_\square$ pode legalmente capturar $\square_\square$, ou (ii) $\square_\square$ defende $\square_\square$, em que ambas as peças são da mesma cor. Como temos dois jogadores e dois tipos de interação tática, obtemos quatro subtipos de interações: ataque das brancas em direção às pretas, das pretas em direção às brancas, defesa das brancas e defesa das pretas. Além disso, para capturarmos todas as informações estruturais do xadrez, visto que peças que interagem por mais lances podem oferecer tanto mais suporte tático de defesa quanto maior tensão de ataque, agregamos as interações ao longo do jogo, associando a cada link um peso que indica a frequência com que duas peças interagiram entre si durante toda a partida. Com isso, para analisarmos quantitativamente os padrões táticos do xadrez, calculamos algumas métricas de redes complexas [5] para cada partida e construímos uma distribuição de probabilidade para cada métrica. Dentre elas, calculamos a densidade da rede de interações táticas das peças, o grau, a força (normalizadas pelos tipos de interação) e a entropia de PageRank, obtida aplicando a entropia de Shannon [6] à distribuição de PageRank. Por fim, para testarmos se as quatro métricas diferiam sistematicamente entre os quatro subtipos de interação, aplicamos o teste de Friedman pareado por partida ($\alpha = 0{,}05$), com o coeficiente de concordância Kendall's W como medida do tamanho de efeito.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição percentual da rede de interação tática revela uma separação estrutural nítida entre a atividade defensiva (32-34%) e ofensiva (17-19%), consistente com a densidade, grau e força (Fig. 1, A-C), a força acentua ainda mais essa disparidade (43-44% vs. 6-7%). Isto sugere que as interações defensivas tendem a se repetir ao longo da partida com muito mais frequência que as interações de ataque. Mais ainda, vemos que as brancas concentram uma fração ligeiramente maior de ataques, enquanto as pretas apresentam uma fração levemente maior de defesa, o que sugere um padrão de vantagem de iniciativa das

brancas, bem conhecido na literatura de xadrez. Note, também, que a entropia de PageRank (Fig. 1, D) inverte esta hierarquia. Apesar de concentrar menos atividade, a rede de ataque distribui-a de forma mais homogênea entre as peças envolvidas (entropia ≈ 3,4) que a rede de defesa (≈ 2,8-3,2). Assim, como a entropia é mais baixa para as interações de defesa, a importância tática da defesa está concentrada em poucas peças. Fisicamente, isso indica posições mais frágeis no sentido de redes complexas: remover/atacar estes nós concentrados desestabiliza desproporcionalmente toda a rede. Estatisticamente, esta hierarquia mostrou-se consistente entre as partidas para todas as quatro métricas, confirmando diferenças sistemáticas para os quatro subtipos de interação pelo teste de Friedman pareado por partida ($gl = 3$; $p < 0{,}001$ em todos os casos), com tamanho de efeito grande e homogêneo, inclusive para a entropia de PageRank, cujo padrão de concentração é invertido em relação às demais métricas, mas igualmente sistemático: densidade e grau ($\square^2 = 26441{,}5$; Kendall's $W = 0{,}822$), força ($\square^2 = 25852{,}9$; Kendall's $W = 0{,}803$) e entropia de PageRank ($\square^2 = 25878{,}6$; Kendall's $W = 0{,}804$).

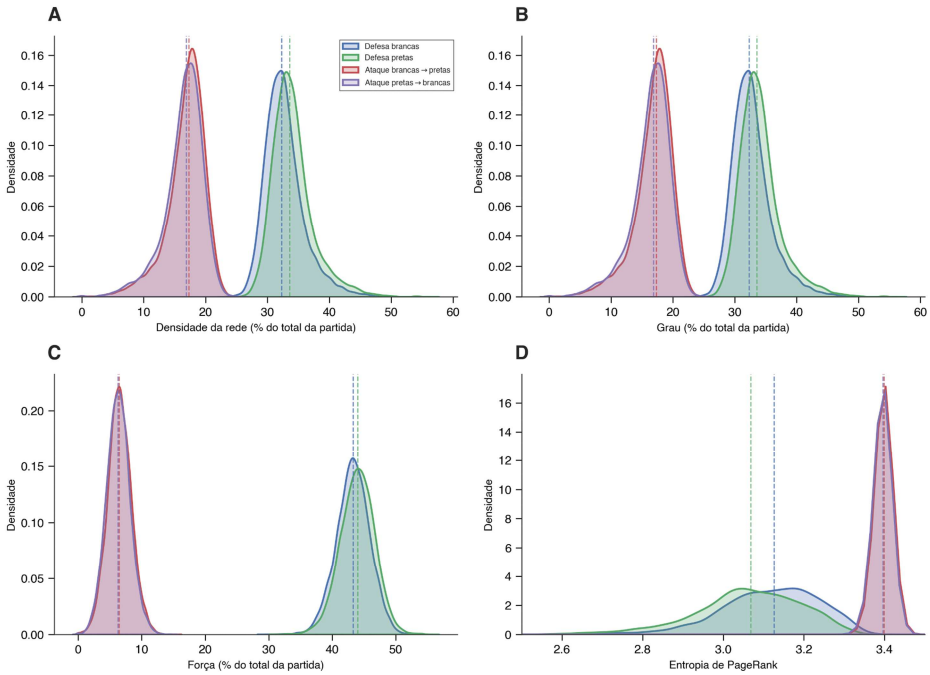


Figura 1 – Distribuições (KDE) de (A) densidade, (B) grau, (C) força e (D) entropia de PageRank da rede de interação tática, segmentadas pelos quatro tipos de interação (ataque e defesa, para brancas e pretas), sobre as partidas do *dataset*. Linhas tracejadas indicam a mediana de cada distribuição.

CONCLUSÕES

Concluímos, portanto, que a convergência entre os testes estatísticos e o padrão visual das quatro métricas indicam que a rede tática do xadrez se organiza em torno de um eixo funcional de ataque e defesa, refletindo a distinção estratégica entre a defesa como uma necessidade estrutural contínua e o ataque como um evento tático esporádico. A inversão do padrão na entropia de PageRank revela que essa

diferença ocorre em dois níveis complementares: quantidade de atividade tática, maior na defesa, e concentração dessas atividades entre as peças, também maior na defesa, cuja natureza repetitiva concentra a importância tática em poucas peças, enquanto o ataque, mais esparso e bipartido, distribui sua atividade de forma mais homogênea entre as peças envolvidas. Por fim, uma assimetria secundária, porém consistente, entre brancas e pretas, sugere que a vantagem de tempo do primeiro lance se manifesta topologicamente, embora com magnitude bem menor do que o efeito estrutural dominante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pelo financiamento e à Universidade Estadual de Maringá (UEM) pelo apoio à pesquisa e à ciência.

REFERÊNCIAS

[1] RIBEIRO, Haroldo V. *et al*. Move-by-move dynamics of the advantage in chess matches reveals population-level learning of the game. **PLOS One**, [S. l.], v. 8, n. 1, e54165, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054165. Acesso em: 24 ago. 2026.

[2] SHANNON, Claude E. XXII. Programming a computer for playing chess. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, [S. l.], v. 41, n. 314, p. 256-275, 1950. Disponível em: https://doi.org/10.1080/14786445008521796. Acesso em: 27 ago. 2026.

[3] BOCCALETTI, Stefano et al. Complex networks: structure and dynamics. **Physics Reports**, [S. l.], v. 424, n. 4, p. 175-308, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009. Acesso em: 24 ago. 2026.

[4] PGN MENTOR. **Base de dados de arquivos PGN para os campeonatos mundiais e torneios de candidatos de 1972 a 2024**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://www.pgnmentor.com/files.html. Acesso em: 24 ago. 2026.

[5] NEWMAN, Mark E. J. **Networks**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2018.

[6] SHANNON, Claude E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948. Disponível em: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x. Acesso em: 27 ago. 2026.