

## CLASSIFICANDO MOVIMENTOS DE PAPÉIS EM QUEDA LIVRE COM REDES ORDINAIS

Angelo Aggio Flores (PIBIC/FA/UEM), Haroldo Valentin Ribeiro (Orientador). E-mail:  
ra129251@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de  
Física, Maringá, PR.

### FÍSICA/FÍSICA ESTATÍSTICA E TERMODINÂMICA

**Palavras-chave:** Métodos Ordinais, Séries Temporais, Análise de Dados.

### RESUMO

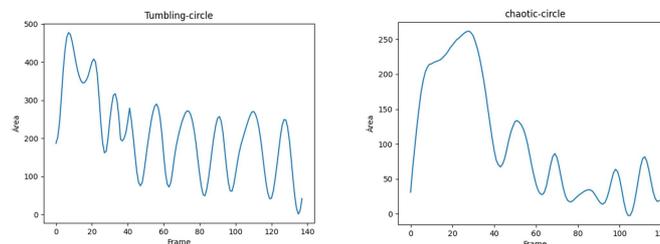
Apesar da aparente simplicidade, o movimento de pedaços de papel em queda livre pode apresentar padrões altamente complexos em muitas situações comuns. Além disso, uma descrição física completa desses movimentos ainda permanece um grande desafio, apesar da longa história de pesquisas sobre o tema. Neste trabalho, combinamos métodos ordinais com ferramentas de agrupamento em redes complexas para classificar o movimento de queda livre de pedaços de papéis no ar. Analisamos esse movimento usando séries temporais da área observável do papel em vídeos desses movimentos e mostramos que é possível classificar, de maneira não supervisionada, os movimentos em *tumbling* (rolamento) e caótico com boa acurácia.

### INTRODUÇÃO

O estudo de quedas livres consideradas caóticas já foi amplamente explorado mediante uma visão clássica, porém, nunca foi obtido um total entendimento acerca do assunto quando se trata do movimento de pequenos pedaços de papel. Para além de uma descrição formal, investigações sobre o tema que aliam visão computacional e métodos de aprendizado de máquina têm mostrado uma forma alternativa para o estudo de tal fenômeno. Howison e colaboradores<sup>1</sup> foram pioneiros em utilizar automatização de experimentação na obtenção de dados para avançar no entendimento do tema. Neste trabalho, utilizaremos de uma abordagem chamada redes ordinais<sup>2</sup> aplicada aos dados obtidos por Howison e colaboradores<sup>1</sup> com o intuito de distinguir automaticamente entre movimentos caóticos e *tumbling* (rolamentos). Iniciamos apresentando os dados e nossa metodologia. Em seguida, passamos para os resultados e discussões.

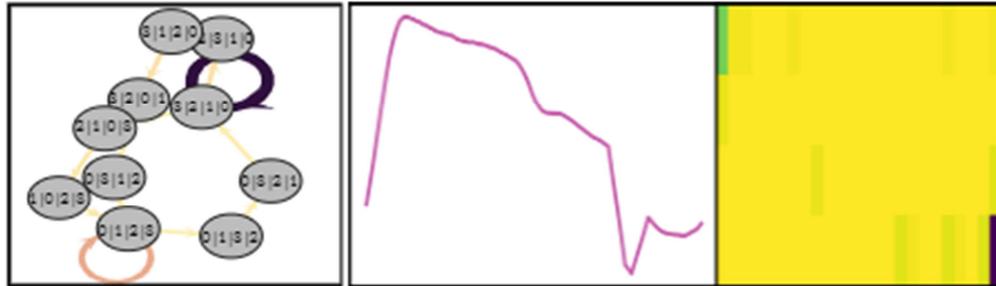
### MATERIAIS E MÉTODOS

Nosso trabalho está baseado nos experimentos e nos dados obtidos Howison *et al.*<sup>1</sup>. Todos os dados estão disponíveis em <https://github.com/th533/Falling-Paper>. Foram selecionados 441 vídeos de quedas com papéis com diferentes formatos (círculos, quadrados, hexágonos e cruz). Além disso, também utilizamos a classificação de movimentos fornecida pelos autores e construída visualmente por dois especialistas, na qual temos basicamente dois tipos de movimento: *tumbling* (rolamento) e caótico. Nos concentramos em analisar as séries temporais  $\square_{\square}$  da área dos papéis capturadas pela câmera de filmagem. Se  $\square_{\square} \approx 1$ , o pedaço de papel está paralelo ao plano de visão da câmera, enquanto  $\square_{\square} \approx 0$  indica que o papel está perpendicular a esse plano. A Figura 1 mostra exemplos dessas séries temporais.



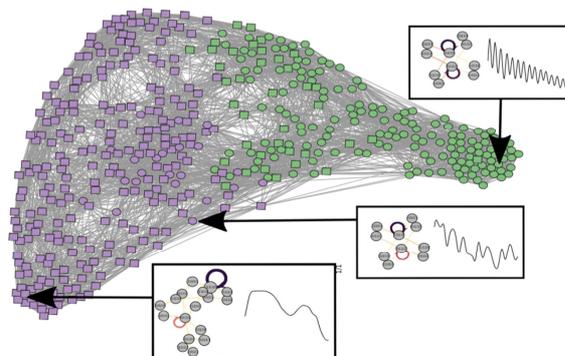
**Figura 1:** Dois exemplos de séries temporais da área visualizada de papéis em formato de círculo em queda livre. À esquerda temos um movimento classificado como *tumbling*. À direita temos um exemplo de movimento classificado como caótico.

Para analisar as séries temporais da área  $\square_{\square} = \{\square_1, \dots, \square_{\square}\}$ , utilizamos a uma abordagem conhecida como redes ordinais, conforme introduzido por Pessa e Ribeiro<sup>2</sup>. Essa é uma técnica derivada do formalismo de entropia de permutação de Bandt e Pompe<sup>3</sup> e consiste dos seguintes passos. Primeiramente, dividimos a série temporal em partições de tamanho  $\square > 1$  e, para cada uma, definimos o padrão de ordenamento dos elementos. Existem  $\square!$  possibilidades para esses padrões, de modo que a série temporal é convertida em uma sequência simbólica. De posse dessas sequências, investigamos todas as transições entre os possíveis padrões que ocorrem na série, para criar a matriz de adjacência da rede ordinal. Essa matriz corresponde a uma rede direcionada (indicando as sucessões temporais entre os padrões) e ponderada (os pesos indicam a frequência de ocorrência das transições). Aplicando esse procedimento a todas as séries, podemos construir um vetor característico para representar cada série. As componentes desse vetor, que tem  $\square \square \square!$  dimensões, correspondem a cada uma das possíveis transições entre os padrões ordinais. A Figura 2 mostra um exemplo de rede ordinal (painel à esquerda) correspondente a uma série temporal (painel central), bem como uma representação em mapa de calor das possíveis transições (painel à direita).



**Figura 2:** Exemplo de rede ordinal (à esquerda) formada a partir da série apresentada na parte central e a matriz de transição ordinal (à direita), com embedding dimension  $\square = 4$ .

Esperamos que as séries classificadas como *tumbling* estejam espacialmente separadas das séries da classe caótica nesse espaço de  $\square \square \square!$  dimensões, de modo que métodos de aprendizagem de máquina possam agrupar os dois tipos de movimento. Para verificar essa possibilidade, utilizamos de dois recursos. O primeiro é um algoritmo UMAP de redução de dimensionalidade. Nesse caso, utilizamos apenas o grafo que este algoritmo constrói de modo a conectar pontos próximos nesse espaço hiperdimensional. Em seguida, utilizamos o método de detecção de comunidade Infomap. Encontramos duas comunidades, às quais correspondem amplamente aos dois tipos de movimento. A rede formada com as comunidades está disponível em [https://complex.pfi.uem.br/paper\\_cluster/](https://complex.pfi.uem.br/paper_cluster/) e também é mostrada na Figura 3.

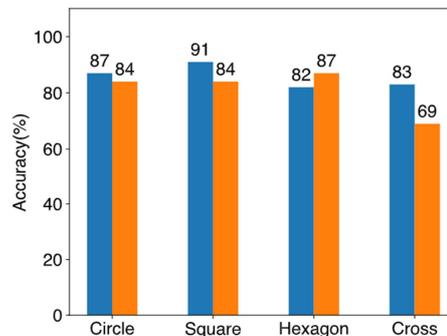


**Figura 3:** Rede obtida a partir do UMAP com as duas partições encontradas pelo Infomap.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 apresentamos uma comparação entre nossos resultados e aqueles obtidos por Pessa et al.<sup>4</sup> por meio do plano complexidade-entropia. Observamos que, a não ser para o caso de hexágonos, nosso método é significativamente superior. Um ponto interessante de ressaltar é o caso do papel em formato de cruz

(*cross*), para o qual nosso método apresenta uma superioridade ainda maior, apesar desse formato corresponder a menor quantidade de dados disponíveis.



**Figura 4:** Comparação de nossos resultados utilizando o UMAP e Infomap (em azul) com os resultados obtidos por Pessa *et al.*<sup>4</sup> via plano complexidade-entropia (laranja).

## CONCLUSÕES

Concluimos que nosso método é competente para distinguir entre movimentos caóticos e *tumbling* de pequenos pedaços de papéis com diferentes formatos em queda livre de maneira não supervisionada e com acurácia superior à aquela obtida via plano complexidade-entropia.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Araucária pelo financiamento do projeto, a Universidade Estadual de Maringá (UEM) pelo apoio à pesquisa e ao desenvolvimento da ciência.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> Howison, T., Hughes, J. & Iida, F. Large-scale automated investigation of free-falling paper shapes via iterative physical experimentation. *Nature Machine Intelligence* 2, 68–75 (2020).
- <sup>2</sup> Pessa, A. A. B. & Ribeiro, H. V. Characterizing stochastic time series with ordinal networks. *Physical Review E* 100, 042304 (2019).
- <sup>3</sup> Bandt, C. & Pompe, B. Permutation entropy: A natural complexity measure for time series. *Physical Review Letters* 88, 174102 (2002).
- <sup>4</sup> Pessa, A. A. B., Perc, M. & Ribeiro, H. V. Clustering free-falling paper motion with complexity and entropy. *EPL* 138, 30003 (2022).