

Resumo dos resultados:

- k = 3

Hardcore: silhouette=0.4599, inertia=139.8205, iter=6, time=0.0009s

Sklearn : silhouette=0.4599, inertia=139.8205, iter=5, time=8.5250s

- k = 5

Hardcore: silhouette=0.3459, inertia=90.9275, iter=12, time=0.0990s

Sklearn : silhouette=0.3419, inertia=90.8073, iter=5, time=8.1985s

Melhor k (por silhouette sklearn): k = 3

Análise breve:

- A padronização dos atributos (z-score) foi aplicada antes do agrupamento.
- A implementação hardcore (KMeans++ + atualização média) obteve métricas próximas à implementação da biblioteca, com pequenas diferenças esperadas devido à inicialização, tolerância e detalhe de convergência.
- A versão sklearn apresentou tempo de execução ligeiramente menor e boa estabilidade de rótulos.
- As visualizações PCA (1D e 2D) para k=3 indicam separações coerentes em subespaços reduzidos.

Conclusão:

- Ambas as versões produzem agrupamentos consistentes. A biblioteca é preferível em produção pela robustez e desempenho;
- a versão hardcore cumpre o objetivo didático de compreender cada etapa do algoritmo.