

Sequenciamento Adaptativo de Palavras em Dispositivo Tangível de Alfabetização: Estudo Retrospectivo com Base em Competências Fonêmicas

Laura Quevedo Jurgina¹, Leomar Soares da Rosa Júnior¹, Marilton Sanchotene de Aguiar¹, Fernando Moreira², Tiago Thompsen Primo¹

¹Universidade Federal de Pelotas (UFPel)
Pelotas – RS – Brasil

²Universidade Portucalense
Porto – Portugal

{lqjurgina, leomarjr, marilton, tiago.primo}@inf.ufpel.edu.br, fmoreira@upt.pt

Abstract. *This paper presents a local adaptive mechanism for word sequencing in a tangible literacy device. The mechanism represents words through phonemic competencies, updates a learner profile from interaction logs, and selects activities according to unresolved difficulties. Logs from five children, comprising 112 writing attempts, were retrospectively reprocessed under fixed and adaptive sequencing. The adaptive condition increased success from 51.3% to 71.6%, reduced corrections from 0.96 to 0.42, and lowered entropy from 3.16 to 1.83. The paired Wilcoxon test indicated a difference between conditions ($p = 0.043$), while the random baseline produced smaller changes. The results indicate that local adaptive sequencing can reorganize literacy practice from evidence observed during writing.*

Resumo. *Este artigo apresenta um mecanismo adaptativo local para sequenciamento de palavras em um dispositivo tangível de alfabetização. O mecanismo representa palavras por competências fonêmicas, atualiza o perfil do aprendiz a partir dos registros de interação e seleciona atividades conforme dificuldades não consolidadas. Registros de cinco crianças, com 112 tentativas de escrita, foram reprocessados sob sequenciamento fixo e adaptativo. A condição adaptativa elevou o sucesso de 51.3% para 71.6%, reduziu correções de 0.96 para 0.42 e diminuiu a entropia de 3.16 para 1.83. O teste pareado de Wilcoxon indicou diferença entre as condições ($p = 0.043$), enquanto o baseline aleatório produziu mudanças menores. Os resultados indicam que o sequenciamento adaptativo local pode reorganizar a prática a partir de evidências observadas durante a escrita.*

1. Introdução

Sistemas educacionais baseados em Inteligência Artificial (IA) usam registros de desempenho para ajustar atividades, automatizar feedback e modular o ritmo de aprendizagem [Chen et al. 2020]. Em geral, esses mecanismos dependem de arquiteturas remotas, nas quais o processamento ocorre em servidores externos. Essa dependência reduz sua aplicabilidade em contextos educacionais com conectividade instável ou infraestrutura restrita. Estratégias de computação de borda (*edge computing*) deslocam

parte do processamento para os dispositivos usados pelos estudantes [Khan et al. 2019], mas exigem algoritmos de baixo custo, compatíveis com restrições de hardware [Figueiredo and Nakamura 2003].

Na alfabetização em português brasileiro, essa restrição técnica se combina a uma dificuldade linguística específica. A aprendizagem da leitura e da escrita envolve regularidades ortográficas contextuais, nas quais o valor fonêmico das letras varia conforme sua posição na palavra e as letras vizinhas [Loth 2015]. Muitos sistemas organizam atividades em sequências fixas e registram o desempenho apenas como acerto ou erro, o que limita a adaptação da prática às dificuldades observadas durante a construção da escrita. A lacuna tratada neste trabalho está na integração entre modelagem fina do desempenho, sequenciamento adaptativo e execução local em dispositivo tangível.

Este trabalho investiga em que medida um sequenciamento adaptativo baseado em competências fonêmicas, operando localmente em um dispositivo tangível, altera o desempenho e a estabilidade do perfil de aprendizagem em comparação com sequências fixas de atividades. A hipótese é que a reorganização das palavras, guiada pelo alinhamento entre o estado estimado do aprendiz e as propriedades fonêmicas das atividades, aumenta a taxa de sucesso e reduz a dispersão das dificuldades, medida pela entropia do perfil. A contribuição computacional está em propor um mecanismo local que combina representação fonêmica das palavras, atualização do perfil do aprendiz e seleção adaptativa de atividades, avaliado por comparação com sequenciamento fixo e baseline aleatório.

2. Trabalhos Relacionados

Avaliações digitais de alfabetização recorrem à seleção automática de itens para ajustar a atividade ao desempenho observado. Testes adaptativos baseados na Teoria de Resposta ao Item estimam proficiência ao longo da prova e reduzem o número de questões necessárias [Alavarse et al. 2017]. Essa abordagem, porém, tende a representar o progresso como sequência de respostas corretas ou incorretas, oferecendo pouca resolução sobre dificuldades específicas envolvidas na construção da escrita.

Sistemas de sequenciamento de atividades organizam trajetórias de aprendizagem (*learning paths*) a partir do histórico de interação. Abordagens com algoritmos genéticos produzem sequências graduais de exercícios [de Souza Jr. et al. 2018], enquanto estratégias heurísticas ou evolutivas geram rotas associadas a perfis cognitivos ou estruturas curriculares [Gomes et al. 2019]. Em aplicações digitais, o sequenciamento pode operar como adaptação dinâmica [Costa 2022], mas o desempenho costuma ser tratado por medidas globais, com pouca incorporação dos eventos gerados durante a resposta.

Em tarefas de escrita, ferramentas baseadas em processamento de linguagem natural identificam erros ortográficos ou sintáticos em produções textuais e oferecem sugestões de correção [Santos et al. 2016]. Essas ferramentas operam sobre o produto final, enquanto dispositivos tangíveis de alfabetização exploram a manipulação física de letras para apoiar consciência fonológica e reconhecimento de padrões linguísticos [Sousa and Romão 2024]. O ponto ainda pouco explorado é usar os dados dessa manipulação como entrada para sequenciamento adaptativo local. Este trabalho se posiciona nessa lacuna ao articular dados de interação, representação fonêmica das palavras e seleção de atividades em um mecanismo compatível com processamento no próprio

dispositivo.

3. Método

O estudo utiliza registros de um dispositivo tangível de alfabetização no qual crianças constroem palavras pela manipulação de letras físicas. O sistema apresenta a palavra-alvo e armazena acertos, erros por letra, correções e tempo de execução. Na configuração original, as palavras são apresentadas em ordem fixa. O reprocessamento preserva os mesmos registros de interação, mas substitui essa ordem por uma política adaptativa de seleção da próxima palavra.

Cada palavra W é representada por um vetor binário de 11 dimensões,

$$\vec{G}_W \in \{0, 1\}^{11}$$

em que cada componente indica a presença de uma competência fonológica ou ortográfica, conforme a taxonomia de Loth [2015]. O perfil do aprendiz é descrito por um vetor de proficiência,

$$\vec{P}_t = [p_0, p_1, \dots, p_{10}], \quad p_i \in [0.1, 1.0]$$

atualizado após cada tentativa a partir das competências mobilizadas, do resultado da escrita, do tipo de erro e do tempo de execução. A comparação entre a palavra produzida (W_{prod}) e a palavra-alvo (W_{alvo}) distingue erros ortográficos, de sonoridade e estruturais, mantendo a parametrização completa da atualização para estudo posterior.

A seleção adaptativa opera sobre o vetor de urgência,

$$\vec{U}_t = \mathbf{1} - \vec{P}_t$$

no qual valores mais altos indicam competências menos consolidadas. Para cada palavra disponível, o modelo calcula a correspondência entre $\vec{U}_t$ e $\vec{G}_W$, com penalização para escolhas que concentram carga excessiva sobre dificuldades ainda instáveis:

$$\text{Fitness}(W) = \frac{\vec{U}_t \cdot \vec{G}_W}{\|\vec{U}_t\| \|\vec{G}_W\|} - \Omega(W) \quad (1)$$

A palavra selecionada é aquela com maior valor de $\text{Fitness}(W)$. A entropia da distribuição de urgências mede a estabilidade do perfil: valores altos indicam dificuldades dispersas, enquanto valores baixos indicam concentração em necessidades mais delimitadas. Como o vetor tem dimensionalidade fixa, o custo da seleção cresce linearmente com o número de palavras disponíveis, condição compatível com execução local.

O estudo adota desenho retrospectivo controlado. Participaram cinco crianças entre 7 e 9 anos, atendidas por uma organização não governamental em contexto de vulnerabilidade socioeconômica. Cada participante realizou uma sessão individual com acompanhamento de um mediador, sem interferência direta nas respostas. A participação ocorreu

mediante consentimento dos responsáveis legais e assentimento das crianças, com dados anonimizados.

O banco de reprocessamento contém 120 palavras distribuídas por níveis de complexidade fonêmica e cobre as 11 competências representadas no vetor. Foram analisadas 112 tentativas de escrita, totalizando 66,7 minutos de interação. As métricas analisadas foram taxa de sucesso, correções por palavra, tempo de resposta e entropia. A comparação entre os cenários fixo e adaptativo foi conduzida sobre valores agregados por participante, usando o teste de Wilcoxon para amostras pareadas. Um baseline aleatório com 30 simulações independentes por participante foi incluído para separar o efeito da adaptação do simples efeito de reordenação.

4. Resultados e Discussão

A comparação entre os cenários indica que o sequenciamento adaptativo altera simultaneamente o desempenho e a estabilidade do perfil de aprendizagem. Em todos os participantes, a reorganização das palavras aumenta a taxa de sucesso e reduz tanto o número médio de correções quanto a entropia. Em média, o sucesso passa de 51.3% para 71.6%, as correções por palavra caem de 0.96 para 0.42 e a entropia diminui de 3.16 para 1.83. O teste de Wilcoxon, aplicado aos valores agregados por participante, registrou diferença estatística entre os cenários ($W = 0$, $p = 0,043$).

A Tabela 1 detalha os indicadores por participante. A variação entre as sessões mostra que a sequência fixa não atua da mesma forma sobre perfis distintos de aprendizagem. Os maiores deslocamentos ocorrem nos participantes com maior dispersão inicial das dificuldades, especialmente na Criança 5, que combina menor sucesso inicial, maior número de correções e entropia elevada no cenário fixo.

Tabela 1. Indicadores das sessões e comparação entre sequenciamento fixo e adaptativo

Participante	Duração (min)	Sucesso (%)	Correções	Entropia
Criança 1	12.6	46.4 / 71.2	0.94 / 0.42	3.12 / 1.85
Criança 2	13.4	75.0 / 82.5	0.33 / 0.21	2.45 / 1.21
Criança 3	10.2	50.0 / 68.0	0.88 / 0.45	3.35 / 2.10
Criança 4	20.1	55.0 / 74.0	0.75 / 0.38	3.41 / 2.05
Criança 5	10.4	30.0 / 62.5	1.91 / 0.65	3.45 / 1.92
Média	13.3	51.3 / 71.6	0.96 / 0.42	3.16 / 1.83

A magnitude dos ganhos reforça essa leitura. O aumento de sucesso varia entre 7.5 e 32.5 pontos percentuais, a redução de correções entre 0.12 e 1.26 por palavra, e a queda de entropia entre 1.24 e 1.53. Esse comportamento é coerente com o funcionamento do modelo: perfis mais dispersos oferecem mais pontos de intervenção para a seleção adaptativa, que passa a priorizar palavras alinhadas às competências menos consolidadas.

Para verificar se o ganho decorre apenas da reordenação das palavras, comparou-se o cenário fixo com um baseline aleatório e com o modelo adaptativo. O baseline aleatório foi calculado pela média de 30 simulações independentes de reordenação do log original. A reordenação aleatória eleva o sucesso médio para 57.8% e reduz a entropia para 2.88, mas permanece distante do desempenho obtido pelo modelo adaptativo. Com

71.6% de sucesso e entropia final de 1.83, o modelo mostra que a melhora depende da correspondência entre estado estimado do aprendiz e propriedades fonêmicas das atividades selecionadas.

Tabela 2. Comparação entre estratégias de sequenciamento

Estratégia	Sucesso	Entropia
Fixo	51.3%	3.16
Aleatório	57.8%	2.88
Adaptativo	71.6%	1.83

A queda da entropia qualifica a diferença entre os cenários. Na progressão fixa, a sequência de palavras permanece indiferente aos erros, ao tempo de execução e às correções realizadas durante a escrita. No sequenciamento adaptativo, esses registros modificam o perfil de proficiência e interferem na escolha das próximas palavras. A prática deixa de distribuir a demanda pedagógica por várias competências ao mesmo tempo e passa a concentrá-la em dificuldades mais específicas, reduzindo correções e aumentando a proporção de respostas concluídas corretamente.

Os resultados precisam ser lidos à luz do desenho retrospectivo, do número reduzido de participantes e do vocabulário utilizado no reprocessamento. Essas condições limitam a generalização para outros grupos, repertórios linguísticos e configurações pedagógicas, bem como impedem afirmar que o mesmo comportamento ocorreria em uso adaptativo em tempo real. Mesmo com essas restrições, a comparação controlada entre cenários mostra que o mecanismo consegue reorganizar a prática a partir dos dados de interação e operar com baixa complexidade computacional, requisito relevante para dispositivos tangíveis em contextos com conectividade limitada.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou um modelo adaptativo para seleção de atividades em um dispositivo tangível de suporte à alfabetização. A proposta combina representação fonêmica das palavras, atualização incremental do perfil do aprendiz e seleção orientada pelo estado estimado das competências, mantendo compatibilidade com execução local em dispositivos com restrições de processamento.

Na avaliação retrospectiva, o modelo superou o sequenciamento fixo em taxa de sucesso, número de correções e entropia do perfil. A comparação com o baseline aleatório indica que o ganho não se explica apenas pela mudança na ordem das palavras, mas pelo alinhamento entre as propriedades fonêmicas das atividades e as dificuldades observadas durante a interação.

Os resultados devem ser interpretados nos limites do desenho retrospectivo, do número reduzido de participantes e da ausência de validação em uso adaptativo em tempo real. Ainda assim, o estudo sustenta a viabilidade do modelo como mecanismo local de reorganização da prática. Estudos posteriores devem examinar seu funcionamento em sessões adaptativas reais, com acompanhamento longitudinal e maior número de participantes.

Uso de Inteligência Artificial

A Ferramenta de Inteligência Artificial generativa ChatGPT foi utilizada de forma limitada para apoio à revisão linguística do texto. Todo o conteúdo conceitual, estrutura analítica, interpretação dos resultados foram desenvolvidos pelas pessoas autoras.

Referências

- Alavarse, O. M., Catalani, E. M. T., Meneghetti, D. d. R., and Travitzki, R. (2017). Teste adaptativo informatizado como recurso tecnológico para alfabetização inicial. In *Séptima Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética*, pages 165–169, Orlando.
- Chen, L., Chen, P., and Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *IEEE Access*.
- Costa, N. T. d. (2022). *Sequenciamento e Recomendação de Ações Pedagógicas baseados na Taxonomia de Bloom e no Perfil RASI usando Planejamento Automatizado por Algoritmo Genético*. PhD thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Computação, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Uberlândia.
- de Souza Jr., G. N., de Deus, D. F., Tadaiesky, V., de Araújo, I. M., Monteiro, D. C., and de Santana, A. L. (2018). Optimizing tasks generation for children in the early stages of literacy teaching: a study using bio-inspired metaheuristics. *Soft Computing*, 22:6811–6824.
- Figueiredo, C. M. S. and Nakamura, E. F. (2003). Computação móvel: Novas oportunidades e novos desafios. *T&C Amazônia*, 1(2):16–28.
- Gomes, P. H. M. M., Correia, M. d. L., and Souza Junior, G. N. d. (2019). O desenvolvimento de um algoritmo para geração de tarefas individualizadas para o ensino de habilidades básicas de leitura. *XIII Seminário SJEEC - Jogos Eletrônicos - Educação - Comunicação*, pages 94–102.
- Khan, W. Z., Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I., and Ahmed, A. (2019). Edge computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 97:219–235.
- Loth, L. M. (2015). Regularidades ortográficas contextuais: atividades de intervenção educacional. Dissertação de mestrado, UFRRJ, Seropédica.
- Santos, J., Paiva, R., and Bittencourt, I. I. (2016). Avaliação léxico-sintática de atividades escritas baseada em algoritmo genético e processamento de linguagem natural: Um experimento no enem. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 24(2).
- Sousa, J. M. and Romão, E. C. (2024). Jogo educativo para alfabetização: Mercado das palavras. *Revista Aracê*, 6(3):8643–8672.