

# Seleção Adaptativa Local de Palavras em Dispositivo Tangível de Alfabetização: Análise Retrospectiva Baseada em Competências Fonêmicas

Laura Quevedo Jurgina<sup>1</sup>, Eduarda Pereira Medeiros<sup>1</sup>, Leomar Soares da Rosa Júnior<sup>1</sup>, Marilton Sanchotene de Aguiar<sup>1</sup>, Fernando Moreira<sup>2</sup> e Tiago Thompsons Primo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Innovation and Research on Educational Solutions (LIREs)  
Universidade Federal de Pelotas (UFPel)  
Pelotas – RS – Brasil

<sup>2</sup>Universidade Portucalense  
Porto, Portugal

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

**Abstract.** *This paper presents a local adaptive model for selecting vocabulary items in a tangible literacy device. The model updates phonemic competency profiles from actual interaction logs and selects a candidate word  $W_t^*$ , without estimating performance for unattempted items. The retrospective analysis considered 199 attempt events, 84 word constructions, seven children, 26 individual sessions, and a 53-word repository organized in rigid groups. Compared with rigid-group progression, the observed sequence yielded 45.8% accuracy, 1.23 corrections per construction, a mean Pedagogical Alignment Index of 64.2%, and a mean alignment distance of 0.21. The results indicate that local adaptation depends on the selection model and on phonemic bridge words for the RR digraph, consonant clusters, and the LH/NH pair.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta um modelo adaptativo local para seleção de vocábulos em um dispositivo tangível de alfabetização. O modelo atualiza perfis fonêmicos a partir de logs reais e seleciona  $W_t^*$ , sem estimar desempenho para itens não realizados. A análise retrospectiva considerou 199 eventos de tentativa, 84 construções, sete crianças, 26 sessões e um acervo de 53 vocábulos em grupos rígidos. A sequência observada apresentou 45,8% de acerto, 1,23 correções por construção, Índice de Alinhamento Pedagógico médio de 64,2% e distância média de 0,21. Os resultados indicam que a adaptação local depende do modelo de seleção e de vocábulos-ponte para RR, encontros consonantais e o par LH/NH.*

## 1. Introdução

A alfabetização envolve a consolidação progressiva de relações entre unidades sonoras, letras, padrões ortográficos e estruturas silábicas. No português brasileiro, esse aprendizado inclui regularidades contextuais em que o valor fonêmico das letras varia conforme sua posição no vocábulo e as letras adjacentes [Loth 2015, Treiman 2022]. Durante a escrita, as crianças constroem palavras por meio de tentativas, correções, hesitações e

reorganizações, indícios processuais que não são captados quando a análise se limita ao acerto ou ao erro final.

Dispositivos tangíveis de alfabetização permitem observar esse processo ao combinar a manipulação física de letras com o registro digital das ações da criança. Inserções e remoções, tempo de execução, correções, repetições de áudio e estados parciais da palavra permitem analisar a escrita como percurso de interação. Essa perspectiva aproxima esses dispositivos das abordagens de *Learning Analytics*, que empregam rastros de uso para compreender trajetórias de aprendizagem e orientar decisões pedagógicas [Paolucci et al. 2024, Hirsto et al. 2022]. Em atividades presenciais, esses registros precisam ser relacionados às competências linguísticas mobilizadas pela tarefa.

Uma limitação desses sistemas está na organização do vocabulário em grupos fixos de dificuldade, que pressupõe correspondência entre a progressão dos blocos e o desenvolvimento da criança. A complexidade pedagógica de uma palavra, porém, depende das competências que ela exige. Um vocábulo curto pode introduzir uma regularidade instável, enquanto outro, situado em um grupo posterior, pode mobilizar competências já consolidadas. A sequência rígida pode, assim, produzir transições pouco graduais mesmo quando há itens mais compatíveis com o perfil da criança.

Este artigo apresenta um modelo adaptativo local para selecionar palavras em um dispositivo tangível de alfabetização. Cada palavra é representada por um vetor de competências fonêmicas e ortográficas, enquanto o perfil de proficiência do aprendiz é atualizado com base em *logs* reais de interação. A partir desse perfil, o modelo seleciona uma palavra candidata  $W_t^*$  entre os itens disponíveis. A análise retrospectiva reuniu *logs* de sete crianças, 199 eventos de tentativa, 84 construções, 26 sessões individuais e um vocabulário de 53 palavras, sem estimar o desempenho para itens não realizados.

A questão de pesquisa é: em que medida *logs* reais de interação em um dispositivo tangível de alfabetização permitem direcionar a seleção adaptativa local de palavras e identificar limitações do vocabulário para propiciar transições fonêmicas graduais? O estudo integra *logs* processuais, modelagem de competências fonêmicas e auditoria do vocabulário para dimensionar a distância entre a sequência rígida e alternativas mais compatíveis com o perfil calculado.

## 2. Fundamentação e Trabalhos Relacionados

Avaliações digitais de alfabetização recorrem frequentemente à seleção automática de itens com base no desempenho observado. Testes adaptativos fundamentados na Teoria de Resposta ao Item ajustam a escolha das questões segundo estimativas de proficiência ao longo da avaliação [Alavarse et al. 2017]. Sistemas de sequenciamento de atividades estruturam trajetórias de aprendizagem (*learning paths*) com base no histórico de interação, empregando algoritmos genéticos para combinar exercícios em sequências graduais [de Souza Jr. et al. 2018] e estratégias evolutivas ou heurísticas a fim de gerar rotas associadas a perfis cognitivos ou a estruturas curriculares [Gomes et al. 2019]. Essas abordagens reorganizam itens ou atividades durante a execução, contudo tendem a representar o desempenho por meio de acertos, erros ou indicadores agregados, apresentando baixa resolução quanto à construção da resposta [Costa 2022]. Em tarefas de escrita de palavras, essa simplificação restringe a observação de dificuldades associadas a segmentos fonêmicos, estruturas silábicas e regularidades contextuais.

A modelagem do estudante define quais informações direcionam a adaptação ao longo da interação. Em diversos sistemas, essa modelagem baseia-se em estimativas globais de proficiência ou em perfis previamente definidos, o que restringe a representação de dificuldades localizadas em segmentos, sílabas ou regularidades ortográficas. Em tarefas de escrita, ferramentas fundamentadas no processamento de linguagem natural identificam desvios ortográficos ou sintáticos em produções textuais e oferecem sugestões de correção [Santos et al. 2016]. Essas abordagens contribuem para o tratamento computacional da escrita, contudo operam sobre produtos textuais ou respostas já estruturadas. O problema abordado neste artigo antecede a correção da produção: a seleção da palavra subsequente com base nas competências fonêmicas evidenciadas durante a interação.

Esse recorte aproxima-se dos desafios apontados em *Learning Analytics* para a educação básica. Revisões sobre o tema indicam que a utilização de dados em contextos escolares exige articulação com fundamentos educacionais e atenção à natureza situada das interações presenciais [Paolucci et al. 2024, Hirsto et al. 2022]. Na alfabetização, tempos, correções e tentativas somente adquirem sentido pedagógico quando relacionados às estruturas linguísticas coordenadas pela criança durante a escrita. Interfaces tangíveis voltadas à alfabetização registram parcela desses sinais ao associar a manipulação de objetos físicos, a consciência fonológica e o reconhecimento de padrões linguísticos [Sousa and Romão 2024]. A seleção adaptativa de palavras demanda, nesse contexto, que os registros processuais sejam vinculados às competências mobilizadas por cada item do vocabulário.

A literatura revisada evidencia uma lacuna na articulação entre *logs* processuais da escrita, modelagem local de competências fonêmicas e seleção adaptativa de palavras em vocabulários embarcados. Essa lacuna abrange também a explicabilidade das decisões automatizadas, visto que as recomendações educacionais devem estar associadas a evidências observadas no desempenho do estudante [da Conceição Silva and Santana 2024]. Divergindo de abordagens centradas na correção de produções textuais ou na recomendação por desempenho agregado, o presente estudo aborda a palavra como unidade de adaptação, descrita pelas competências que mobiliza e pela densidade fonêmica que impõe à criança.

### 3. Método

Esta seção descreve o delineamento retrospectivo, o contexto da atividade, os registros de interação, a representação fonêmica do vocabulário e o procedimento de avaliação do modelo adaptativo local.

#### 3.1. Delineamento, contexto e participantes

O estudo adota um delineamento retrospectivo, fundamentado em *logs* reais de interação produzidos por crianças durante atividades de escrita de palavras em um dispositivo tangível de alfabetização. O dispositivo apresentava uma progressão estruturada em grupos fixos. O modelo não alterou a sequência durante a coleta de dados; sua aplicação posterior comparou o percurso observado com alternativas de maior alinhamento disponíveis no vocabulário.

Foram analisados *logs* de sete crianças em processo de alfabetização, atendidas em aulas de apoio no contraturno por uma organização parceira. As interações ocorreram

em 26 sessões individuais, acompanhadas por um mediador. A base de dados consolidada compreende 199 eventos de tentativa distribuídos em 84 construções de palavras. A análise estruturou-se em dois níveis: o evento de tentativa, correspondente às ações intermediárias durante a composição, e a construção de palavra, correspondente ao conjunto de eventos associados a uma palavra-alvo até a sua conclusão, abandono ou substituição. A principal unidade interpretativa consiste no participante, visto que o perfil de competências é atualizado cronologicamente ao longo dos registros de cada criança.

A atividade foi desenvolvida com autorização institucional e acompanhamento de um mediador. A participação ocorreu mediante o consentimento dos responsáveis legais, formalizado pelo Termo de Consentimento de Participação no Estudo, e o assentimento das crianças durante as atividades. Os registros foram anonimizados e apresentam apenas códigos de participante, palavras-alvo, produções, tempos, eventos de interação e categorias de erro. Não se incluíram nomes, imagens, áudios identificáveis, dados familiares ou informações que permitissem identificar as crianças, a instituição ou a equipe envolvida.

### 3.2. Dispositivo, logs e vocabulário

O dispositivo subsidia atividades de alfabetização por meio da manipulação de letras físicas. Em cada atividade, a criança recebe uma palavra-alvo, ouve sua pronúncia, observa elementos visuais de apoio e compõe o vocábulo ao posicionar letras no dispositivo. O sistema registra a inserção ou a remoção de letras, as validações, o tempo decorrido, o estado parcial da palavra e as repetições de áudio; esses eventos são agregados por construção de palavra até a sua conclusão, abandono ou substituição. Dessa agregação, foram extraídas as variáveis utilizadas pelo modelo: palavra-alvo, produção final, acerto observado, tempo total, volume de correções, tipo de erro, grupo da palavra e vetor fonêmico.

**Tabela 1. Competências fonêmicas e ortográficas utilizadas na representação das palavras.**

| Código   | Competência            | Definição operacional                         | Exemplos         |
|----------|------------------------|-----------------------------------------------|------------------|
| $a_0$    | CV simples             | sílabas consoante-vogal                       | mala, vaca       |
| $a_1$    | R vibrante             | <i>r</i> brando em posição intervocálica      | cavalo, rádio    |
| $a_2$    | Dígrafo RR             | <i>rr</i> intervocálico                       | carro            |
| $a_3$    | Nasalidade             | vogais nasais ou nasal em final de sílaba     | panela, galinha  |
| $a_4$    | Coda silábica          | sílabas terminadas por consoante              | cesta, tubarão   |
| $a_5$    | Encontros consonantais | estrutura consonantal do tipo CCV             | trem, bruxa      |
| $a_6$    | LH/NH                  | dígrafos palatais                             | galinha, medalha |
| $a_7$    | CH/X                   | som de <i>x</i> em <i>xale</i>                | xale, xuxa       |
| $a_8$    | Regra do S             | uso de <i>s</i> em regularidade contextual    | sapo, casaco     |
| $a_9$    | Regra C/G              | alternância contextual de <i>c</i> e <i>g</i> | vaca, boca       |
| $a_{10}$ | Surdo/sonoro           | oposição entre pares fonológicos              | vaca, fada       |

A análise considerou o vocabulário embarcado no dispositivo no momento da coleta, composto por 53 palavras distribuídas em seis grupos fixos de progressão, sem recálculo durante a interação com base no perfil da criança. Cada vocábulo foi representado por um vetor binário de competências fonêmicas e ortográficas  $G_W \in \{0, 1\}^{11}$ , indicando a presença ou ausência das competências apresentadas na Tabela 1. O modelo adaptativo local foi proposto para substituir, em uma etapa operacional futura, a escolha

baseada na progressão rígida por uma seleção orientada pelo alinhamento entre o estado estimado do aprendiz e as competências mobilizadas por cada vocábulo disponível.

A complexidade fonêmica operacional do vocábulo foi definida por:

$$C(W) = \sum_{i=0}^{10} G_W[i] \quad (1)$$

A fim de verificar se o vocabulário dispunha de níveis fonêmicos suficientes para a seleção adaptativa, estabeleceu-se o Índice de Isolamento de uma competência  $a_i$ :

$$I(a_i) = \min\{C(W) \mid G_W[i] = 1\} \quad (2)$$

Este índice denota a menor densidade fonêmica disponível no acervo para desenvolver determinada competência. Valores reduzidos sinalizam que a competência pode ser exercitada em vocábulos com poucas demandas simultâneas; valores elevados apontam sua ocorrência apenas em palavras que acumulam outras exigências. O Índice de Isolamento foi empregado para verificar se o acervo oferecia vocábulos intermediários para transições mais graduais.

### 3.3. Modelo adaptativo local e métricas

O modelo mantém, para cada participante, um vetor de proficiência  $P_t \in [0, 1]^{11}$ , no qual cada componente representa uma estimativa operacional de consolidação da competência  $a_i$  no instante  $t$ . O vetor foi inicializado com  $P_0[i] = 0,1$  para todas as competências. A cada construção de vocábulo, o modelo analisa a palavra-alvo  $W$ , seu vetor  $G_W$ , o acerto ou o erro, o tempo total e o tipo de desvio predominante. A saída em cada estado consiste em uma palavra candidata  $W_t^*$ , definida como o item do vocabulário com maior alinhamento ao perfil fonêmico estimado naquele instante.

Em caso de acerto, as competências mobilizadas pela palavra recebem um incremento positivo, ponderado pelo tempo de resposta:

$$P_{t+1} = \min(1, P_t + \Delta \cdot \beta \cdot G_W) \quad (3)$$

Em caso de erro, aplica-se uma penalização proporcional ao tipo de desvio:

$$P_{t+1} = P_t \odot (\gamma \cdot G_W + (1 - G_W)) \quad (4)$$

Adotaram-se os parâmetros  $\Delta = 0,1$  e  $\beta = 1,2$  para latência  $\leq 1,5$  s/letra, e  $\beta = 0,4$  para latência superior. A normalização temporal foi estabelecida por  $T_s = \max(0, T_{total} - (L \cdot 2,5))$ , em que  $L$  representa a quantidade de letras da palavra. Definiram-se as penalizações em  $\gamma = 0,8$  para erro ortográfico,  $\gamma = 0,5$  para erro de sonoridade e  $\gamma = 0,1$  para erro estrutural.

Os erros foram classificados de forma automática mediante *script* e validados manualmente em 100% das produções finais concluídas, perfazendo 112 produções. Os desvios ortográficos correspondem à distância de Levenshtein igual a 1 com substituição

fonética mapeada; os erros de sonoridade equivalem a permutas entre pares como P/B, T/D, F/V e K/G; os erros estruturais dizem respeito à distância superior a 2 ou à omissão de letras essenciais. A validação foi executada por duas avaliadoras independentes: uma pesquisadora da área de Informática na Educação com atuação em alfabetização e uma docente alfabetizadora da rede pública com 12 anos de experiência profissional. O nível de concordância entre a classificação automática e a validação manual foi mensurado por concordância simples, resultando em 94%. As discrepâncias concentraram-se em produções que associavam falhas mecânicas de posicionamento a trocas fonéticas, sendo dirimidas por consenso em uma terceira etapa de análise. Esta validação teve por escopo o controle analítico das categorias de erro, sem pretensão de diagnóstico clínico.

Após cada atualização, calcula-se o vetor de urgência:

$$U_t = 1 - P_t \quad (5)$$

O vetor  $U_t$  sinaliza quais competências permanecem menos consolidadas para o participante naquele estado. Para cada vocábulo disponível no vocabulário, o modelo computa um escore de alinhamento entre a urgência vigente e as competências mobilizadas pelo vocábulo:

$$S(W, t) = \cos(U_t, G_W) - \Omega(W, t) \quad (6)$$

A penalização foi definida como  $\Omega(W, t) = 0,2 \cdot \max(0, k - 1)$ , em que  $k$  corresponde à quantidade de competências instáveis no vocábulo, considerando  $P_t[i] < 0,4$ . Vocábulos que mobilizam uma competência em situação de urgência, mas acumulam outras competências ainda instáveis, recebem menor prioridade. O vocábulo candidato selecionado pelo modelo é definido por:

$$W_t^* = \arg \max_{W_j \in V} S(W_j, t) \quad (7)$$

no qual  $V$  representa o vocabulário embarcado disponível. No estudo retrospectivo,  $W_t^*$  foi utilizado exclusivamente para a comparação com a progressão fixa observada, sem substituir o vocábulo produzido pela criança e sem estimar o desempenho para palavras não realizadas. O Algoritmo 1 organiza esse procedimento, desde a inicialização do perfil até a seleção do vocábulo candidato em cada estado.

O Índice de Alinhamento Pedagógico foi calculado como a média normalizada do escore dos vocábulos selecionáveis em relação ao maior escore disponível no acervo em cada estado  $t$ . O IAP exprime o alinhamento relativo entre o perfil e o vocabulário, e não a probabilidade de acerto.

A análise conjugou métricas observadas e métricas de alinhamento. As métricas observadas abrangem a taxa de acerto, o volume de correções por construção de vocábulo, o tempo total de escrita e a distribuição de desvios por participante. As métricas de alinhamento compreendem a urgência dominante, o Índice de Alinhamento Pedagógico, a distância entre o percurso observado e o maior alinhamento disponível, o confinamento diagnóstico e o Índice de Isolamento. Considera-se confinamento diagnóstico quando

**Algorithm 1** Seleção adaptativa local de palavras

---

```

1: Inicializar  $P_0[i] \leftarrow 0,1$ , para  $i = 0, \dots, 10$ 
2: for cada construção de palavra em ordem temporal do
3:   Obter palavra-alvo  $W$ , vetor  $G_W$ , acerto/erro, tempo e tipo de erro
4:   if acerto then
5:     Atualizar  $P_{t+1} \leftarrow \min(1, P_t + \Delta \cdot \beta \cdot G_W)$ 
6:   else
7:     Atualizar  $P_{t+1} \leftarrow P_t \odot (\gamma \cdot G_W + (1 - G_W))$ 
8:   end if
9:   Calcular  $U_t \leftarrow 1 - P_t$ 
10:  for cada palavra candidata  $W_j$  no vocabulário  $V$  do
11:    Calcular  $S(W_j, t) \leftarrow \cos(U_t, G_{W_j}) - \Omega(W_j, t)$ 
12:  end for
13:  Selecionar  $W_t^* \leftarrow \arg \max_{W_j \in V} S(W_j, t)$ 
14: end for

```

---

o perfil do participante sinaliza urgência em determinada competência, contudo o vocabulário embarcado não dispõe de vocábulos com baixa densidade fonêmica para desenvolvê-la.

### 3.4. Procedimento analítico

A análise foi executada em quatro etapas. Na primeira, os *logs* foram consolidados por participante, evento e construção de vocábulo, preservando-se apenas os registros associados aos vocábulos produzidos nas sessões. Na segunda, cada vocábulo do vocabulário embarcado foi codificado por seu vetor de competências  $G_W$ , viabilizando o cálculo de  $C(W)$  e  $I(a_i)$ .

Na terceira etapa, os *logs* de cada participante foram processados em ordem cronológica pelo modelo adaptativo local. A cada construção de vocábulo, o perfil  $P_t$  foi atualizado com base no vocábulo-alvo, no acerto observado, no tempo total e no tipo de desvio predominante. Em seguida, registrou-se o vetor de urgência  $U_t$  e computou-se, para cada estado, o vocábulo candidato  $W_t^*$  do acervo com maior alinhamento ao perfil estimado. Esta etapa não substituiu o vocábulo produzido pela criança nem estimou o desempenho para vocábulos não realizados; apenas comparou, retrospectivamente, o percurso rígido observado com as alternativas que o modelo selecionaria pelo critério de alinhamento.

Na quarta etapa, verificou-se se os vocábulos indicados como mais alinhados estavam distribuídos em uma malha fonêmica capaz de sustentar transições graduais. Para cada participante, observou-se se as competências de maior urgência dispunham de vocábulos com baixa densidade fonêmica no acervo embarcado. Esta comparação viabilizou a identificação de casos de cobertura adequada, lacunas e confinamento diagnóstico. Os vocábulos intermediários foram analisados como implicação de *design*, isto é, como exemplos de itens que poderiam reduzir a densidade fonêmica necessária para desenvolver determinadas competências em futuras versões do vocabulário.

## 4. Resultados

Os resultados evidenciam de que forma a sequência rígida se relacionou com os perfis fonêmicos estimados e os aspectos nos quais o vocabulário restringiu a seleção adaptativa local.

### 4.1. Percursos observados na sequência rígida

A base de dados analisada compreende 199 eventos de tentativa distribuídos em 84 construções de vocábulos, gerados por sete crianças em 26 sessões individuais. A Tabela 2 detalha a distribuição dos registros por participante, abrangendo o quantitativo de vocábulos produzidos, os eventos de tentativa, a taxa de acerto observada, o Índice de Alinhamento Pedagógico e a média de correções por construção.

**Tabela 2. Desempenho observado e alinhamento diagnóstico no banco de 53 palavras.**

| ID          | Palavras | Tent. | Acerto | Alinh. | Corr. |
|-------------|----------|-------|--------|--------|-------|
| P1          | 11       | 30    | 30,0%  | 56,5%  | 1,91  |
| P2          | 15       | 20    | 75,0%  | 80,0%  | 0,33  |
| P3          | 13       | 42    | 42,0%  | 61,5%  | 1,45  |
| P4          | 8        | 14    | 50,0%  | 65,5%  | 0,88  |
| P5          | 9        | 45    | 22,0%  | 52,0%  | 2,40  |
| P6          | 16       | 28    | 46,4%  | 66,2%  | 0,94  |
| P7          | 12       | 20    | 55,0%  | 68,0%  | 0,75  |
| Total/Média | 84       | 199   | 45,8%  | 64,2%  | 1,23  |

A taxa média de acerto situou-se em 45,8%, com 1,23 correções por construção. Tais valores agregados omitem variações processuais entre participantes submetidos à mesma lógica de grupos fixos. O participante P2 produziu 15 vocábulos em 20 eventos, registrando acerto de 75,0% e 0,33 correções por construção. Em contrapartida, P5 executou 9 vocábulos em 45 eventos, com acerto de 22,0% e 2,40 correções por construção. O participante P3 também concentrou maior carga processual, demandando 42 eventos para 13 vocábulos. Esses cenários indicam que a progressão rígida não gerou transições equivalentes entre os perfis analisados.

Dois recortes contrastantes detalham essa disparidade em escala temporal. P2 executou as palavras *fada*, *faca*, *mala* e *navio* com acerto, sem correções nos três primeiros vocábulos e com tempos de resposta entre 7s e 22s. Após essas interações, o alinhamento diagnóstico permaneceu elevado, oscilando entre 0,88 e 0,95. O participante P5 demonstrou um padrão oposto nas atividades iniciais: em *auau*, *ei*, *oi* e *ui*, registraram-se tempos entre 45s e 187s, com ocorrência de correções inclusive em itens iniciais e alinhamento entre 0,40 e 0,51. O contraste evidencia que os *logs* registram variações de percurso que não se manifestam unicamente na taxa final de acerto.

### 4.2. Seleção adaptativa retrospectiva

O Índice de Alinhamento Pedagógico exprime a compatibilidade entre o perfil de urgências calculado a partir dos *logs* reais e os vocábulos disponíveis no acervo de 53 itens. Valores mais elevados sinalizam alternativas mais aderentes às competências em situação de urgência do que aquelas percorridas pela sequência rígida.

A progressão rígida por grupos foi tratada como linha de base, por corresponder ao percurso realizado no dispositivo durante as sessões. A Tabela 3 contrapõe esse percurso ao alinhamento obtido mediante a seleção, em cada estado, do vocábulo com maior IAP disponível no acervo. A diferença média estabeleceu-se em 0,21, verificando-se a maior disparidade no participante P5, o qual também apresentou menor taxa de acerto e média mais elevada de correções por construção. A configuração não simula o aprendizado, não estima o acerto para vocábulos não realizados e não substitui a sequência observada; identifica, exclusivamente, quais vocábulos o modelo priorizaria a partir do alinhamento entre o perfil estimado e o vocabulário disponível.

**Tabela 3. Comparação retrospectiva entre progressão fixa por grupos e seleção por maior alinhamento disponível.**

| ID    | IAP observado | Maior IAP disponível | Dif. |
|-------|---------------|----------------------|------|
| P1    | 0,38          | 0,56                 | 0,18 |
| P2    | 0,71          | 0,80                 | 0,09 |
| P3    | 0,35          | 0,61                 | 0,26 |
| P4    | 0,48          | 0,65                 | 0,17 |
| P5    | 0,14          | 0,52                 | 0,38 |
| P6    | 0,51          | 0,66                 | 0,15 |
| P7    | 0,44          | 0,68                 | 0,24 |
| Média | 0,43          | 0,64                 | 0,21 |

Nos participantes com menor volume de correções, a exemplo de P2, as urgências tenderam a concentrar-se em poucas dimensões. Em contrapartida, nos participantes com elevada carga processual, como P5 e P3, o vetor de urgência exibiu maior dispersão, sinalizando instabilidade simultânea em mais de uma competência.

#### 4.3. Limitações fonêmicas do vocabulário para a seleção adaptativa

A fim de averiguar se o vocabulário dispunha de condições adequadas para a seleção adaptativa local, calculou-se o Índice de Isolamento  $I(a_i)$  de cada competência. Este índice denota a menor complexidade fonêmica  $C(W)$  entre os vocábulos que mobilizam determinada competência. A Tabela 4 exhibe o diagnóstico de cobertura fonêmica do acervo.

O vocabulário apresenta uma cobertura satisfatória para competências iniciais e regularidades frequentes, tais como CV simples, CH/X, regra do S, regra C/G e oposição surdo/sonoro. Nessas dimensões, dispõe-se de vocábulos com baixa densidade fonêmica que viabilizam a seleção de itens com poucas exigências simultâneas pelo modelo. O dígrafo RR, os encontros consonantais e o par LH/NH, por sua vez, manifestam-se exclusivamente em vocábulos de maior densidade. O caso de LH/NH configura-se como o mais restritivo:  $I(a_6) = 5$ , exemplificado por *medalha* e *galinha*. Desse modo, mesmo quando o modelo identifica urgência nessa dimensão, o acervo embarcado não disponibiliza termos de menor densidade para desenvolvê-la de maneira gradual.

No acervo analisado, os vocábulos que mobilizam o dígrafo RR, o par LH/NH ou encontros consonantais manifestam-se associados a diversas outras demandas simultâneas. A palavra *Carro* mobiliza RR com  $C(W) = 4$ ; *galinha* mobiliza LH/NH

**Tabela 4. Cobertura fonêmica do vocabulário pelo Índice de Isolamento.**

| Código   | Competência       | <i>I</i> | Exemplos         | Diag.       |
|----------|-------------------|----------|------------------|-------------|
| $a_0$    | CV simples        | 1        | mala, mola       | bem coberta |
| $a_1$    | R vibrante        | 3        | rádio, cavalo    | moderada    |
| $a_2$    | Dígrafo RR        | 4        | carro            | lacuna      |
| $a_3$    | Nasalidade        | 3        | panela, galinha  | moderada    |
| $a_4$    | Coda silábica     | 3        | tubarão, cesta   | moderada    |
| $a_5$    | Encontros conson. | 4        | trem, bruxa      | parede      |
| $a_6$    | LH/NH             | 5        | medalha, galinha | parede      |
| $a_7$    | CH/X              | 2        | xale, xuxa       | bem coberta |
| $a_8$    | Regra do S        | 2        | sapo, suco       | bem coberta |
| $a_9$    | Regra C/G         | 2        | vaca, faca       | bem coberta |
| $a_{10}$ | Surdo/sonoro      | 2        | vaca, fada       | bem coberta |

com  $C(W) = 5$ ; e *bruxa* conjuga encontro consonantal a outras regularidades, atingindo  $C(W) = 4$ . A limitação da seleção adaptativa decorre, portanto, da própria malha fonêmica disponível, e não apenas da sequência rígida ou dos parâmetros do modelo.

#### 4.4. Confinamento diagnóstico e análise de sensibilidade

O confinamento diagnóstico manifestou-se quando o modelo identificou urgência em determinada competência, contudo o vocabulário não disponibilizou vocábulos com baixa densidade fonêmica para propiciar uma transição gradual. Este fenômeno mostrou-se mais evidente nos participantes com maior carga processual. No participante P5, o quantitativo de eventos por vocábulo foi o mais elevado da amostra, e o alinhamento diagnóstico permaneceu distante do percurso rígido observado. No participante P3, constatou-se um padrão semelhante: a criança produziu 13 vocábulos, contudo demandou 42 eventos de tentativa. Nesses casos, parcela das dificuldades associava-se ao acúmulo de competências em determinados itens.

A fim de avaliar a estabilidade deste diagnóstico, foram analisados três cenários de parametrização. No cenário conservador, com  $\Delta = 0,05$ , o alinhamento médio situou-se em 58,2% e o confinamento de P5 atingiu 75%. No cenário-base, o alinhamento médio estabeleceu-se em 64,2% e o confinamento de P5 fixou-se em 62%. No cenário severo, com  $\Omega = 0,4$ , o alinhamento médio situou-se em 52,1%, com confinamento mais acentuado nos participantes P5, P3 e P7. Em todos os cenários, as restrições associadas ao RR, aos encontros consonantais e ao par LH/NH persistiram, evidenciando que tais lacunas decorrem da estrutura do banco de palavras, e não meramente do ajuste dos parâmetros.

#### 4.5. Palavras-ponte para ampliação da seleção adaptativa

As palavras-ponte constituem uma proposta de expansão do vocabulário para elevar a capacidade de resposta do modelo adaptativo local. Esses vocábulos não foram empregados para estimar o desempenho dos participantes. Sua função reside em apontar itens capazes de reduzir o Índice de Isolamento de competências com baixa cobertura, viabilizando a seleção, por parte do algoritmo, de vocábulos com menor densidade fonêmica quando determinada competência apresentar-se em situação de urgência.

Para o par LH/NH, vocábulos como *ilha*, *olho* e *unha* apresentariam menor densidade fonêmica do que *medalha* e *galinha*. Quanto à coda silábica, itens como *mar*, *sol* e *luz* viabilizariam a introdução da estrutura com menor acúmulo de demandas. No que tange aos encontros consonantais, vocábulos como *prato* e *zebra* diversificariam o acervo, embora ainda demandem uma análise minuciosa da complexidade fonêmica associada.

A expansão do vocabulário não corresponde ao mero incremento do quantitativo de vocábulos. A seleção adaptativa local depende de uma malha fonêmica suficientemente gradual. Quando uma competência manifesta-se exclusivamente em vocábulos extensos, tardios ou com múltiplas demandas simultâneas, o modelo é capaz de diagnosticar a urgência, contudo dispõe de escassos percursos pedagógicos para atendê-la.

## 5. Discussão

Os resultados evidenciam que a adaptação em dispositivos tangíveis de alfabetização depende de duas condições articuladas: um modelo capaz de estimar urgências fonêmicas a partir dos *logs* e um vocabulário com vocábulos suficientemente graduais. A comparação retrospectiva indicou que o percurso rígido nem sempre corresponde ao maior alinhamento disponível, sobretudo em participantes com maior carga processual.

A principal implicação do estudo reside no fato de que a estruturação em grupos rígidos pode gerar transições pouco graduais para determinados perfis. Embora esses grupos ofereçam uma progressão pedagógica inicial, não consideram, durante a atividade, quais competências se mostram mais ou menos consolidadas em cada criança. O modelo atenua essa limitação ao atualizar o perfil de competências com base nos *logs* e ao computar o alinhamento entre esse perfil e os vocábulos disponíveis. Desse modo, as correções, o tempo e o tipo de desvio passam a atuar como critérios rastreáveis para a seleção local do vocábulo subsequente, sem substituir a mediação pedagógica.

Os resultados evidenciam que um algoritmo adaptativo não soluciona isoladamente o desafio da progressão. Ainda que o modelo identifique uma competência em situação de urgência, sua capacidade de resposta vincula-se aos vocábulos disponíveis no acervo. Caso determinada competência se manifeste exclusivamente em vocábulos extensos, tardios ou com múltiplas demandas simultâneas, a seleção adaptativa permanece restrita a alternativas pouco graduais.

A inserção de novos vocábulos deve pautar-se por uma lógica de curadoria fonêmica. O propósito não consiste apenas em elevar o quantitativo de itens, mas em distribuir as competências por diferentes níveis de densidade. Para o par LH/NH, vocábulos como *ilha*, *olho* e *unha* poderiam mitigar a dependência de itens mais densos, tais como *medalha* e *galinha*. Quanto à coda silábica, itens como *mar*, *sol* e *luz* poderiam propiciar transições mais breves antes de vocábulos com maior acúmulo de demandas. No que tange aos encontros consonantais, novas inserções devem ser avaliadas com cautela, visto que nem todo vocábulo aparentemente simples reduz a densidade fonêmica do percurso.

Sob essa configuração, os grupos originais do vocabulário podem ser preservados como referência pedagógica geral, enquanto a seleção local reorganiza a ordenação dos vocábulos de acordo com o perfil estimado. O algoritmo não suprime o propósito pedagógico da sequência original; ao contrário, flexibiliza-o com base nos indícios processuais observados na interação.

Os resultados convergem com testes adaptativos, sistemas de sequenciamento de atividades e abordagens de *Learning Analytics*, contudo sinalizam uma exigência peculiar à alfabetização por meio da escrita de palavras. Em diversos sistemas, a adaptação é direcionada pelo desempenho agregado, por estimativas globais de proficiência ou pelo histórico de acertos. No presente estudo, a adaptação demanda uma representação mais próxima do domínio linguístico: o vocábulo é descrito pelas competências fonêmicas e ortográficas que mobiliza.

Essa distinção é fulcral para a Informática na Educação, visto que os dados educacionais não geram interpretação pedagógica de maneira isolada. Tempos, correções e tentativas somente adquirem sentido quando relacionados ao conteúdo da tarefa. No âmbito da alfabetização, isso pressupõe vincular os *logs* às estruturas linguísticas que a criança deve coordenar durante a escrita. A proposta também se aproxima da Inteligência Artificial Explicável, pois a recomendação pode ser fundamentada pela articulação entre o evento observado, a competência mobilizada, o perfil atualizado e o vocábulo disponível.

A contribuição do estudo deve ser compreendida como uma demonstração de viabilidade analítica, e não como uma validação de impacto pedagógico. O modelo não altera as atividades executadas, não estima o desempenho em vocábulos não realizados e não produz uma avaliação global da criança. O perfil computado constitui uma representação operacional, restrita às competências codificadas, aos vocábulos disponíveis e aos eventos registrados. A dimensão da amostra, o contexto específico de mediação e a simplificação da dificuldade por densidade fonêmica limitam o alcance das conclusões. Como desdobramento, o modelo será integrado ao dispositivo em investigações futuras, com o vocabulário expandido por critérios de isolamento fonêmico e a recalibração dos parâmetros em bases de dados mais robustas.

## 6. Conclusão

Este artigo apresentou um modelo adaptativo local para a seleção de vocábulos em um dispositivo tangível de alfabetização. O modelo atualiza perfis de competências fonêmicas a partir de *logs* reais de interação e computa, para cada estado, um vocábulo candidato  $W_t^*$ , definido pelo maior alinhamento entre o perfil estimado da criança e os vocábulos disponíveis no vocabulário embarcado. A análise configurou-se como retrospectiva e não estimou o desempenho para itens não realizados pelas crianças.

A comparação com a progressão rígida por grupos evidenciou uma distância média de 0,21 entre o percurso observado e o maior alinhamento disponível no acervo. Este resultado indica que, em diferentes momentos da interação, havia vocábulos mais compatíveis com as urgências fonêmicas estimadas do que aqueles efetivamente percorridos. A diferença não representa um ganho de aprendizagem, mas evidencia o limite de alinhamento da sequência rígida.

A adaptação local depende da articulação entre o modelo de seleção, a representação fonêmica dos vocábulos e a curadoria do acervo. Quando competências como o dígrafo RR, os encontros consonantais e o par LH/NH manifestam-se apenas em vocábulos de maior densidade, a seleção permanece confinada a alternativas com múltiplas demandas simultâneas. Como desdobramento, pretende-se integrar a seleção por  $W_t^*$  ao dispositivo em tempo real, expandir o vocabulário com base nos critérios de isolamento fonêmico e conduzir novas sessões longitudinais.

## Declaração sobre uso de Inteligência Artificial

A ferramenta ChatGPT foi utilizada como apoio à revisão linguística, organização textual e verificação de clareza da redação. A definição do problema, o desenho metodológico, a implementação do modelo, a análise dos dados e a interpretação dos resultados foram realizados pelas pessoas autoras. A ferramenta não foi listada como autora, e a responsabilidade integral pelo conteúdo submetido é das pessoas autoras.

## Agradecimentos

As pessoas autoras agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio e pelo fomento concedidos ao desenvolvimento e publicação desta pesquisa.

## 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.
- 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.
- da Conceição Silva, F. and Santana, A. M. (2024). Explicabilidade dos modelos de aprendizado de máquina no cenário educacional: uma revisão sistemática. *Revista Novas Tecnologias na Educação*, 22(1):477–486.
- 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.
- 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 SJEED - Jogos Eletrônicos - Educação - Comunicação*, pages 94–102.
- Hirsto, L., Saqr, M., López-Pernas, S., and Valtonen, T. (2022). A systematic narrative review of learning analytics research in k-12 and schools. *Proceedings* <http://eur-ws.org> ISSN, 1613:0073.
- Loth, L. M. (2015). Regularidades ortográficas contextuais: atividades de intervenção educacional. Dissertação de mestrado, UFRRJ, Seropédica.
- Paolucci, C., Vancini, S., Bex II, R. T., Cavanaugh, C., Salama, C., and de Araujo, Z. (2024). A review of learning analytics opportunities and challenges for k-12 education. *Heliyon*, 10(4).
- 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.

Treiman, R. (2022). Learning to spell: The role of positional and contextual regularities. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 53(3):643–650.