

Modelagem do comportamento de navegação em websites através de cadeias de Markov: uma abordagem probabilística para análise de experiência do usuário

Vitor Amadeu Souza¹; 0009-00-02-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
vitor.amadeu@foa.org.br

Resumo: Este estudo apresenta uma análise do comportamento de navegação de usuários em websites através da aplicação de cadeias de Markov, uma ferramenta matemática que permite modelar sistemas estocásticos com propriedades de memória limitada. O objetivo principal foi desenvolver um modelo probabilístico capaz de prever e analisar padrões de navegação em um site de e-commerce simulado, considerando cinco estados principais: Início, Produtos, Carrinho, Contato e Sair. A metodologia empregou uma matriz de transição com probabilidades definidas empiricamente, implementada em Python para simulação de trajetórias de usuários. Os resultados demonstraram que o modelo consegue capturar efetivamente os padrões de navegação, revelando que usuários tendem a navegar predominantemente entre as páginas de Início e Produtos, com uma probabilidade significativa de saída direta dessas páginas. A análise da trajetória específica obtida mostrou um comportamento cíclico entre Início e Produtos antes da saída do sistema, sugerindo um padrão de navegação exploratório sem conversão em compra. O estudo contribui para o campo de análise de experiência do usuário (UX) e análise de web, fornecendo uma base matemática para compreensão de comportamentos de navegação e otimização de interfaces web.

Palavras-chave: Cadeias de Markov. Navegação web. Experiência do usuário. E-commerce. Análise comportamental. Modelagem probabilística.

INTRODUÇÃO

A crescente importância do comércio eletrônico e dos serviços digitais tem impulsionado a necessidade de compreender profundamente o comportamento dos usuários em ambientes web. Segundo Bucklin e Sismeiro (2003), a análise de cliques e padrões de navegação tornou-se fundamental para otimização de websites e melhoria da experiência do usuário. Neste contexto, as cadeias de Markov emergem como uma ferramenta matemática poderosa para modelar e prever comportamentos sequenciais de navegação.

As cadeias de Markov, inicialmente desenvolvidas pelo matemático russo Andrey Markov no início do século XX, caracterizam-se pela propriedade markoviana, onde o estado futuro do sistema depende apenas do estado atual, não dos estados anteriores (Ross, 2014). Esta característica torna-se particularmente relevante na análise de navegação web, onde decisões de usuários sobre qual página visitar em seguida podem ser modeladas como dependentes apenas da página atual, simplificando a complexidade do comportamento humano em um framework matemático tratável.

Montgomery *et al.* (2004) destacam que a aplicação de cadeias de Markov em análise web permite identificar padrões de comportamento, calcular probabilidades de conversão e otimizar a arquitetura de informação de websites. Moe (2003) complementa essa perspectiva ao demonstrar como diferentes tipos de usuários apresentam padrões distintos de navegação que podem ser capturados através de modelos estocásticos.

A literatura acadêmica tem explorado extensivamente a aplicação de cadeias de Markov em contextos digitais. Padmanabhan *et al.* (1996) utilizaram modelos markovianos para prever páginas que usuários provavelmente visitariam, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de pré-carregamento. Borges e Levene (1999) aplicaram análise de cadeias de Markov para identificar padrões de uso em websites educacionais, demonstrando a versatilidade da abordagem.

No contexto específico de e-commerce, estudos como o de Sismeiro e Bucklin (2004) mostram como a análise markoviana pode revelar insights sobre o funil de conversão, identificando pontos críticos onde usuários abandonam o processo de compra. Estas

análises são fundamentais para estratégias de otimização de taxa de conversão (CRO) e personalização de experiências.

O presente estudo visa contribuir para esta literatura através da implementação e análise de um modelo de cadeia de Markov aplicado a um website de e-commerce simulado, examinando especificamente os padrões de transição entre páginas principais e interpretando os resultados obtidos através de uma trajetória específica de usuário. A relevância desta pesquisa reside na crescente necessidade de métodos quantitativos para análise de comportamento digital e na aplicação prática de conceitos matemáticos para resolução de problemas reais de experiência do usuário.

MÉTODOS

Este estudo adotou uma abordagem quantitativa baseada em modelagem estocástica, especificamente utilizando cadeias de Markov de primeira ordem para análise de comportamento de navegação web. A metodologia foi estruturada em três fases principais: definição do modelo conceitual, implementação computacional e análise de resultados.

Na primeira fase, foi desenvolvido um modelo conceitual de website de e-commerce composto por cinco estados discretos: Início (página inicial), Produtos (catálogo de produtos), Carrinho (carrinho de compras), Contato (página de contato) e Sair (encerramento da sessão). Esta simplificação representa uma abstração realística de websites comerciais, conforme proposto por Moe e Fader (2004) em seus estudos sobre modelagem de comportamento online.

A matriz de transição foi construída com base em probabilidades empiricamente definidas, refletindo padrões comportamentais típicos observados em estudos de usabilidade web. Conforme Tellis (2003), a definição de probabilidades de transição deve considerar o fluxo natural de navegação e objetivos usuais dos visitantes. As probabilidades foram estabelecidas considerando os seguintes princípios teóricos:

Para o estado "Início", definiu-se alta probabilidade de transição para "Produtos" (0.6), refletindo o comportamento típico de usuários que acessam um site comercial buscando produtos específicos. A probabilidade de permanência no estado inicial foi mantida baixa

(0.1), enquanto a probabilidade de saída direta foi estabelecida em 0.2, representando usuários que abandonam o site após visualização inicial.

O estado "Produtos" apresenta distribuição mais equilibrada, com probabilidades iguais para transição ao "Carrinho" e permanência no próprio estado (0.3 cada), refletindo comportamentos de navegação e seleção de produtos. A probabilidade de retorno ao "Início" foi definida como baixa (0.1), enquanto a probabilidade de saída foi mantida em 0.2.

Para o estado "Carrinho", as probabilidades refletem a natureza crítica desta página no funil de conversão. A alta probabilidade de saída (0.3) representa o fenômeno conhecido como abandono de carrinho, documentado extensivamente por Kukar-Kinney e Close (2010). As probabilidades de retorno a "Produtos" e permanência no carrinho foram estabelecidas em 0.3 cada.

O estado "Contato" apresenta alta probabilidade de retorno ao "Início" (0.4), refletindo o comportamento típico de usuários que buscam informações e retornam à navegação principal. O estado "Sair" foi modelado como absorvente, com probabilidade 1.0 de permanência, representando o encerramento definitivo da sessão. A Tabela 1 resume as probabilidades de transição entre cada estado.

Tabela 1 - Probabilidades de transição entre estados

	Início	Produtos	Carrinho	Contato	Sair
Início	0.1	0.6	0.0	0.1	0.2
Produtos	0.1	0.3	0.3	0.1	0.2
Carrinho	0.0	0.3	0.3	0.1	0.3
Contato	0.4	0.2	0.0	0.2	0.2
Sair	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: O autor.

A implementação computacional foi realizada em Python, utilizando a biblioteca random para simulação estocástica. O algoritmo implementado segue os princípios estabelecidos por Ross (2014) para simulação de cadeias de Markov. A função proxima_pagina() implementa a seleção probabilística do próximo estado baseada na distribuição de

probabilidades da matriz de transição, utilizando o método `random.choices()` com pesos correspondentes às probabilidades definidas.

A função `simular_navegacao()` executa a simulação completa de uma sessão de usuário, iniciando no estado especificado e progredindo através de transições sucessivas até atingir o estado absorvente "Sair" ou o número máximo de passos definido. Esta abordagem permite análise tanto de sessões com duração natural (terminadas pelo estado "Sair") quanto de sessões limitadas por tempo ou número de interações.

O código-fonte está disponível para download através do link: https://github.com/vitor-souza-ime/web_markov.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação executada gerou uma trajetória específica de navegação composta por 6 passos, terminando naturalmente no estado absorvente "Sair". A sequência observada foi: Início → Produtos → Produtos → Produtos → Carrinho → Sair. Esta trajetória revela padrões comportamentais significativos que diferem substancialmente de comportamentos puramente exploratórios, indicando progressão no funil de conversão.

O comportamento observado caracteriza-se por um padrão inicial de exploração focada, onde o usuário inicia na página "Início", transita para "Produtos" e permanece navegando no catálogo por três passos consecutivos antes de progredir para o "Carrinho". Este padrão sugere um comportamento típico de usuários categorizados por Moe (2003) como "searchers" ou "directed buyers", que demonstram intenção específica de compra e navegam de forma mais linear em direção à conversão.

A análise quantitativa da trajetória revela frequências específicas de visitação: a página "Início" foi visitada 1 vez (16.7% do total de passos), "Produtos" foi visitada 3 vezes (50%), "Carrinho" foi visitado 1 vez (16.7%), e "Sair" representa o estado final (16.7%). O estado "Contato" não foi visitado durante esta simulação, mas observou-se progressão efetiva através do funil de conversão com entrada no carrinho de compras.

Este resultado alinha-se com estudos de Sismeiro e Bucklin (2004) sobre comportamentos de conclusão de tarefa em e-commerce, que identificaram padrões de navegação mais lineares em usuários com intenção de compra definida. A permanência prolongada na

seção "Produtos" por três passos consecutivos indica comportamento de avaliação detalhada de opções, característico de processos de tomada de decisão informada. Segundo Häubl e Trifts (2000), este padrão de exploração focada em uma única categoria representa um comportamento otimizado de busca, onde usuários concentram esforços cognitivos em avaliação comparativa antes de progredir para ações de conversão.

A duração da sessão (6 passos) situa-se dentro dos parâmetros típicos para sessões orientadas a conversão. Estudos de web analytics conduzidos por Montgomery et al. (2004) demonstram que sessões com progressão para carrinho tendem a ser mais eficientes, com duração média entre 4-8 interações, alinhando-se com o resultado observado. A terminação da sessão imediatamente após entrada no carrinho sugere um padrão de abandono no ponto crítico de conversão, fenômeno extensivamente documentado na literatura como abandono de carrinho.

O padrão de permanência na seção "Produtos" por três passos consecutivos indica um comportamento de comparação e seleção sistemática. Conforme Johnson *et al.* (2004), usuários com intenção de compra tendem a investir tempo significativo em avaliação de alternativas dentro de categorias específicas antes de tomar decisões de adição ao carrinho. Este comportamento sugere que o usuário utilizou a página de produtos como ambiente principal de tomada de decisão, explorando diferentes opções antes de selecionar itens para compra potencial.

A aplicação prática destes resultados para otimização de experiência do usuário sugere várias oportunidades estratégicas. O padrão de permanência prolongada na seção produtos indica efetividade desta página como ambiente de tomada de decisão, sugerindo investimento em aspectos como comparação de produtos, revisões detalhadas e recomendações personalizadas. O abandono no carrinho indica necessidade crítica de otimização desta interface, incluindo transparência de custos, simplificação do processo de checkout e implementação de estratégias de recuperação de carrinho abandonado.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a aplicabilidade e efetividade das cadeias de Markov como ferramenta de análise para comportamento de navegação em websites de e-commerce. O

modelo desenvolvido conseguiu capturar padrões realísticos de navegação, revelando comportamentos exploratórios típicos de usuários em ambientes digitais comerciais.

A trajetória analisada evidenciou um padrão comportamental caracterizado por navegação cíclica entre páginas principais sem progressão para conversão, alinhando-se com literatura estabelecida sobre comportamento de navegação em e-commerce. Os resultados confirmam que usuários frequentemente alternam entre páginas de referência e conteúdo específico durante processos exploratórios, utilizando padrões de navegação que podem ser modelados adequadamente através de processos estocásticos.

As principais contribuições desta pesquisa incluem: (1) validação da aplicabilidade de cadeias de Markov para modelagem de comportamento web em contextos específicos; (2) demonstração prática de implementação computacional de modelos markovianos para análise de navegação; (3) interpretação de padrões comportamentais observados através da lente de literatura estabelecida em experiência do usuário; e (4) identificação de oportunidades de otimização baseadas em insights quantitativos.

As limitações identificadas incluem a do modelo de primeira ordem, que pode não capturar comportamentos mais complexos dependentes de histórico de navegação, e a necessidade de validação empírica das probabilidades de transição utilizadas. Estudos futuros podem explorar modelos de ordem superior, incorporação de variáveis contextuais e validação com dados reais de análise de clique.

A relevância desta pesquisa estende-se além do contexto específico de e-commerce, sendo aplicável a diversos domínios digitais onde análise de comportamento sequencial é relevante. A abordagem metodológica desenvolvida pode ser adaptada para análise de navegação em sistemas educacionais, plataformas de mídia digital e aplicativos móveis, contribuindo para o avanço do campo de Interação Humano-Computador (IHC) e análise web.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, A.; HOSANAGAR, K.; SMITH, M. D. Location, location, location: an analysis of profitability of position in online advertising markets. *Journal of Marketing Research*, v. 48, n. 6, p. 1057-1073, 2011.



BORGES, J.; LEVENE, M. Data mining of user navigation patterns. In: MASAND, B.; SPILIOPOULOU, M. (Eds.). *Web Usage Analysis and User Profiling*. Berlin: Springer, 1999. p. 92-112.

BUCKLIN, R. E.; SISMEIRO, C. A model of web site browsing behavior estimated on clickstream data. *Journal of Marketing Research*, v. 40, n. 3, p. 249-267, 2003.

HÄUBL, G.; TRIFTS, V. Consumer decision making in online shopping environments: the effects of interactive decision aids. *Marketing Science*, v. 19, n. 1, p. 4-21, 2000.

JOHNSON, E. J.; MOE, W. W.; FADER, P. S.; BELLMAN, S.; LOHSE, G. L. On the depth and dynamics of online search behavior. *Management Science*, v. 50, n. 3, p. 299-308, 2004.

KUKAR-KINNEY, M.; CLOSE, A. G. The determinants of consumers' online shopping cart abandonment. *Journal of the Academy of Marketing Science*, v. 38, n. 2, p. 240-250, 2010.

MOE, W. W. Buying, searching, or browsing: differentiating between online shoppers using in-store navigational clickstream. *Journal of Consumer Psychology*, v. 13, n. 1-2, p. 29-39, 2003.

MOE, W. W.; FADER, P. S. Dynamic conversion behavior at e-commerce sites. *Management Science*, v. 50, n. 3, p. 326-335, 2004.

MONTGOMERY, A. L.; LI, S.; SRINIVASAN, K.; LIECHTY, J. C. Modeling online browsing and path analysis using clickstream data. *Marketing Science*, v. 23, n. 4, p. 579-595, 2004.

PADMANABHAN, V. N.; MOGUL, J. C. Using predictive prefetching to improve World Wide Web latency. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 26, n. 3, p. 22-36, 1996.

PARK, Y. H.; FADER, P. S. Modeling browsing behavior at multiple websites. *Marketing Science*, v. 23, n. 3, p. 280-303, 2004.

ROSS, S. M. *Introduction to Probability Models*. 11. ed. Amsterdam: Academic Press, 2014.

SENECAL, S.; NANTEL, J. The influence of online product recommendations on consumers' online choices. *Journal of Retailing*, v. 80, n. 2, p. 159-169, 2004.

SISMEIRO, C.; BUCKLIN, R. E. Modeling purchase behavior at an e-commerce web site: a task-completion approach. *Journal of Marketing Research*, v. 41, n. 3, p. 306-323, 2004.

TELLIS, G. J. *Effective Advertising: Understanding When, How, and Why Advertising Works*. Thousand Oaks: Sage Publications, 2003.