

MODELAGEM DE ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO META-HEURÍSTICOS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES

Luan Vilaça Nogueira¹, Brunno Wagner Lemos de Souza²

¹ Aluno do Curso de Engenharia de Software – UPE/*Campus* Garanhuns

² Professor do Curso de Engenharia de Software – UPE/*Campus* Garanhuns

luan.nogueira@upe.br, brunno.souza@upe.br

Palavras-chave: Modelo Computacional. Teoria da Computação. Grey Wolf Optimizer. Inteligência em Enxame. Sistemas Complexos.

1 INTRODUÇÃO

Os algoritmos de otimização têm se destacado nos últimos anos, devido à complexidade de problemas atuais que requerem uma quantidade crescente de variáveis. Técnicas tradicionais de otimização passam a se mostrar insuficientes, sendo necessário a criação de novas técnicas como as meta-heurísticas (Seck-Tuoh-Mora, 2021), (Mirjalili, Mirjalili, Lewis, 2014). Essa classe de algoritmos estrutura, a partir de regras simples, um sistema flexível e autogerenciado de agentes. Esses agentes são capazes de explorar o espaço de busca de maneira eficiente, com o objetivo de encontrar a melhor solução, ou pelo menos alguma próxima daquela, para o problema no qual se está trabalhando (Perez-Cham *et al.*, 2021).

Uma classe especial de meta-heurísticas é formada pelos algoritmos de inteligência em enxame que compartilham com os autômatos celulares a característica de emergirem de interações locais simples para formar sistemas complexos. Os algoritmos de inteligência em enxame baseiam-se no comportamento social de espécies naturais, como a organização e movimentação de grupos durante atividades como a caça, para modelar processos de busca e otimização (Seck-Tuoh-Mora, 2021; Perez-Cham *et al.*, 2021). Já os autômatos celulares são formados por células que evoluem segundo regras locais e interações com vizinhos, sendo amplamente utilizados em simulações de sistemas complexos (Perez-Cham *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2020). Embora ambos sigam princípios similares, os algoritmos de inteligência em enxame são voltados especificamente à otimização, enquanto os autômatos celulares têm um enfoque mais geral.

Diante desse contexto, o presente resumo expandido busca introduzir uma pesquisa que está sendo realizada na disciplina de Teoria da Computação na Universidade de Pernambuco (UPE) - *Campus* Garanhuns. Essa disciplina introduz os conceitos fundamentais da Teoria da Computação cujo propósito é fornecer ferramentas matemáticas para a modelagem formal de algoritmos e sistemas computacionais (Neto, 2009). Em vista disso, foi idealizada a produção de um artigo científico que se apoiará em conhecimentos da Teoria da Computação, como Teoria dos Autômatos e Análise de Algoritmos para analisar o processo de modelagem de algoritmos de otimização meta-heurísticos através de autômatos celulares. Tal escolha, deve-se à crescente fomentação de estudos na área de otimização, bem como à semelhança entre os princípios que regem os algoritmos meta-heurísticos, em especial aqueles baseados em inteligência em enxame e os autômatos celulares.

O objetivo desse trabalho em desenvolvimento consiste em realizar um experimento e explorar o potencial de modelos baseados em autômatos – especificamente o Autômato Celular – na modelagem e definição formal dessa classe de meta-heurísticas para que se possa analisar as vantagens e limitações dessa abordagem. A meta-heurística escolhida foi o algoritmo *Grey Wolf Optimizer (GWO)*.

Desta forma, este trabalho será dedicado a apresentar os principais pontos identificados por meio de uma pesquisa bibliográfica conduzida com o objetivo de construir um referencial teórico do artigo que está sendo desenvolvido. Essa pesquisa teve como propósito não apenas fundamentar teoricamente o estudo, mas também identificar trabalhos relacionados que pudessem servir como apoio e inspiração para o desenvolvimento do modelo de autômato celular baseado no comportamento do algoritmo *GWO*.

2 METODOLOGIA

Por se tratar de um estudo ainda em andamento, o presente trabalho apenas focou na pesquisa bibliográfica e exploratória que foi realizada para a construção de um arcabouço teórico o qual permitirá uma abordagem estruturada para a modelagem e análise do comportamento do *GWO*, por meio de autômatos celulares. A utilização desse algoritmo deve-se à simplicidade de suas operações vetoriais, que envolvem cálculos aritméticos básicos, como soma, subtração, multiplicação e divisão. A pesquisa utilizou livros para fundamentos consolidados como Teoria da Computação e dos Autômatos, e artigos para perspectivas recentes nas áreas de estudo.

Em função do limite de tempo disponível, no contexto da disciplina de Teoria da Computação do curso, e ao enfoque do artigo em andamento ser a experimentação, desenvolvimento e análise de um modelo computacional, foi realizada uma pesquisa bibliográfica breve e direcionada para identificar trabalhos que utilizam modelos de autômatos na análise ou melhoria de algoritmos de otimização, especialmente meta-heurísticos. A busca dos artigos foi realizada em três bases de dados: *ACM Digital Library*, *IEEE Xplore* e *Google Scholar*, devido à popularidade dessas plataformas para pesquisas voltadas às áreas da computação. A técnica utilizada baseou-se na abordagem de Goodman, Gary e Wood (2014), que define uma combinação de palavras-chave ligadas às temáticas trabalhadas, sinônimos, conectores lógicos e delimitadores para identificar fontes importantes de conhecimento a partir de bases de dados acadêmicas. Dessa forma, foram buscados artigos dos últimos cinco anos cujos títulos atendessem à seguinte *string* de busca: ("*optimization algorithm*" OR "*algoritmo de otimização*" OR "*algorithm*" OR "*algoritmo*") AND ("*automata*" OR "*autômatos*" OR "*automata theory*" OR "*teoria dos autômatos*").

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados obtidos da pesquisa bibliográfica exploratória realizada para identificar os principais estudos e conceitos que ajudarão na modelagem do autômato celular do artigo que está sendo desenvolvido.

Primeiramente, tem-se a Ciência da Computação que surgiu em meados do século XX, antes mesmo da invenção dos computadores modernos, sendo uma subárea da Ciência da Computação (Mitchell, 2005). Alguns dos principais temas abordados por esta

área de conhecimento são: Computabilidade, Teoria da Complexidade de Algoritmos, Linguagens Formais, Teoria de Compiladores, Modelos Computacionais e a Teoria dos Autômatos (Bansal, Kalkaji, 2021; Maccornick, 2018). Por sua vez, a Teoria dos Autômatos é o estudo dos autômatos, que são máquinas abstratas descritas através de modelos matemáticos (Bansal e Kalkaji, 2021), e problemas que podem ser resolvidos por tais máquinas. Os autômatos funcionam por meio da definição de um conjunto de estados possíveis e regras de transição que definem como os autômatos transicionam entre os estados com base em entradas específicas (Maccornick, 2018; Lewis, Papadimitriou, 1998). Essas transições possibilitam o processamento de informações, permitindo a resolução de diversos problemas computacionais, como: o desenvolvimento de compiladores, o reconhecimento de linguagens formais, a inteligência artificial e a verificação formal (Bansal, Kalkaji, 2021).

Devido à popularização da Teoria dos Autômatos nas décadas de 1950 e 1960, o cientista e matemático húngaro John Von Neumann ficou fascinado com a ideia de procurar uma relação entre a Biologia e aquela nova área de estudo. O desafio era criar uma máquina abstrata capaz de reproduzir fenômenos biológicos complexos como a auto-reprodução (Mitchell, 2005). Desde sua publicação, o autômato que ele propôs tem sido aplicado em diversos problemas de sistemas complexos, incluindo classificação e reconhecimento de padrões, modelagem de sistemas paralelos, e representação de fenômenos biológicos, físicos e químicos, entre outras áreas de aplicação (Gao, *et al.*, 2020; Giraldi, 2005; Beni, Wang, 1993).

Os autômatos celulares geralmente são representados por grades ou *grids* dinâmicos d-dimensionais, geralmente entre uma ou três dimensões. Formalmente, este modelo é definido a partir da seguinte quádrupla (Gao, *et al.*, 2020; Giraldi, 2005):

$$M_c = (L, S, N, F) \quad (\text{Equação 1})$$

Ao destrinchar a expressão matemática acima, tem-se M_c que representa o autômato celular que está sendo modelado, L como o conjunto de índices ou localizações das células na grade d-dimensional na qual o autômato está sendo montado, o conjunto finito de estados S que podem assumir pela célula, a função N que define as localizações dos vizinhos de uma células, tal que $N: L \rightarrow \{L_N \subseteq L \mid |L_N| = k\}$ e $N(l) = \{n \in L \mid n \text{ é vizinho de } l\}$, com k sendo o tamanho da vizinhança. Por fim, f representa a função de transição que recebe os estados da vizinhança S_N de uma célula e retorna seu próximo estado $f: \{S_N \subseteq S \mid |S_N| = k\} \rightarrow S$.

Em relação aos algoritmos de otimização, eles são projetados para resolver problemas buscando maximizar ou minimizar uma função objetivo (Seck-Tuoh-Mora *et al.*, 2021). No entanto, a crescente complexidade dos problemas torna inviável encontrar soluções exatas com técnicas tradicionais, como aquelas baseadas em cálculos diferenciais, devido à grande quantidade de possibilidades e ao risco de ficar preso em ótimos locais. Nesse contexto, destacam-se as meta-heurísticas, que são algoritmos de otimização simples, flexíveis, independentes de cálculos diferenciais ou propriedades matemáticas específicas, e eficazes na evitação de ótimos locais (Seck-Tuoh-Mora *et al.*, 2022; Seck-Tuoh-Mora *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2020; Mirjalili, Mirjalili, Lewis, 2014).

Por fim, dentre os algoritmos meta-heurísticos, como já mencionado, há aqueles de inteligência em enxame os quais baseiam-se no comportamento coletivo de espécies naturais, como a caça ou organização em grupo, para resolver problemas de otimização. Um exemplo dessa categoria é o Grey Wolf Optimizer (GWO) (Mirjalili, Mirjalili, Lewis, 2014), inspirado no comportamento dos lobos cinzentos (*Canis lupus*). Esse algoritmo utiliza modelos matemáticos para simular a hierarquia social bem estruturada dessa espécie e os padrões de comportamento durante o processo de caça (Huang, Xu, Xiao, 2021). Mirjalili, Mirjalili e Lewis (2014) demonstram a aplicação deste algoritmo em três problemas de design da Engenharia: *tension/compression spring design*, *welded beam design* e *pressure vessel design*. Além disso, Biswas *et al.* (2021) e Huang, Xu e Xiao (2021) mostram sua aplicação na escavação petrolífera e redução de custos em redes de computadores, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

A pesquisa bibliográfica exploratória realizada revelou o potencial dos autômatos celulares para a análise e melhoria de algoritmos de otimização, além de fornecer uma base teórica suficiente para a modelagem desses autômatos, destacando os fundamentos e as aplicações práticas dos algoritmos de otimização, com ênfase especial nas meta-heurísticas e na inteligência em enxame. Ademais, foi possível compreender a evolução histórica e os principais conceitos da Teoria dos Autômatos e dos autômatos celulares, bem como a importância de algoritmos como o Grey Wolf Optimizer (GWO) em diversos contextos de engenharia.

Com base nesse estudo, o artigo final será estruturado em três etapas principais: desenvolvimento de um modelo de autômato celular inspirado no Grey Wolf Optimizer (GWO), execução de simulações computacionais em Python e análise dos resultados. O modelo incluirá a configuração da grade, vizinhança, estados das células e regras de transição que simulam os comportamentos do GWO, como movimentação dos lobos e equilíbrio entre exploração e convergência. As simulações permitirão avaliar o desempenho do modelo, enquanto as análises quantitativa e qualitativa identificarão vantagens, desafios da modelagem utilizando autômatos celulares e possíveis lacunas para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

BANSAL, Rama; KALKAJI, Delhi. Theory of Computation: A Review. **Banarsidas Chandiwal Institute of Information Technology**, p.10, 2021.

BENI, Gerardo; WANG, Jing. Swarm intelligence in cellular robotic systems. In: **Robots and biological systems: towards a new bionics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993. p. 703-712.

BISWAS, Kallol *et al.* Cellular automata-based multi-objective hybrid Grey Wolf Optimization and particle swarm optimization algorithm for wellbore trajectory optimization. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 85, p. 103695, 2021.

GAO, Yuchao *et al.* Improved whale optimization algorithm via cellular automata. In: **2020 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC)**. IEEE, 2020. p. 34-39.

GIRALDI, Gilson Antonio. Concepts in Theory of Computation and Applications for Automata-Based Modeling. 2005.

GOODMAN, Jodi; GARY, Michael Shayne; WOOD, Robert Eric. Bibliographic search training for evidence-based management education: A review of relevant literatures. **Academy of Management Learning & Education**, v. 13, n. 3, p. 322-353, 2014.

HUANG, Xinxin; XU, Gang; XIAO, Fengtao. Optimization of a novel urban growth simulation model integrating an artificial fish swarm algorithm and cellular automata for a smart city. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2338, 2021.

LEWIS, Harry Roy; PAPADIMITRIOU, Christos Harilaos. Elements of the Theory of Computation. **ACM SIGACT News**, v. 29, n. 3, p. 62-78, 1988

MACCORMICK, John. What Can Be Computed? A practical guide to the theory of computation. **Princeton University Press**, 2018.

MIRJALILI, Seyedali; MIRJALILI, Seyed Mohammad; LEWIS, Andrew. Grey wolf optimizer. **Advances in engineering software**, v. 69, p. 46-61, 2014.

MITCHELL, Melanie *et al.* Computation in Cellular Automata: A Selected Review. **Non-standard computation**, p. 95-140, 2005.

NETO, João José. A Teoria da Computação e o profissional de informática. **Revista de Computação e Tecnologia (ReCeT)**, v. 1, n. 1, p. 4-21, 2009.

PEREZ-CHAM, Oscar Ernesto *et al.* Automata design for honeybee search algorithm and its applications to 3D scene reconstruction and video tracking. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 61, p. 100817, 2021.

SECK-TUOH-MORA, Juan Carlos *et al.* A continuous-state cellular automata algorithm for global optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 177, p. 114930, 2021.

SECK-TUOH-MORA, Juan Carlos *et al.* A New Algorithm Inspired on Reversible Elementary Cellular Automata for Global Optimization. **IEEE Access**, v. 10, p. 112211-112229, 2022.