

Algoritmo evolutivo aplicado ao ajuste de parâmetros comportamentais para um simulador de colônia de formigas

Orientador : Eduardo do Valle Simões

Universidade de São Paulo (USP) - Campus São Carlos

Instituto de Ciências de Matemáticas e de Computação (ICMC)

Av. Trab. São Carlense, 400 - Centro, São Carlos - SP, 13566-590

Currículo : <http://lattes.cnpq.br/4055872056358293>

Discente : Kenzo Yves Yamashita Nobre

Universidade de São Paulo (USP) - Campus São Carlos

Instituto de Ciências de Matemáticas e de Computação (ICMC)

Av. Trab. São Carlense, 400 - Centro, São Carlos - SP, 13566-590

Currículo : <https://lattes.cnpq.br/2943950212050075>

Resumo

Esse projeto visa desenvolver um algoritmo evolutivo para ajustar automaticamente os parâmetros de um sistema simulado de colônias de formigas. Para superar a dificuldade de se ajustar manualmente todos os parâmetros do enxame, como velocidade, quantidade de feromônio depositado, alcance e posição das antenas, entre outros, propõe-se a utilização de um algoritmo evolutivo, que seja capaz de ajustar automaticamente os parâmetros por meio de processos evolutivos. Para isso, esse projeto irá desenvolver uma interface para aplicar o algoritmo evolutivo ao simulador de colônias de formigas ENXAME, cujo código foi desenvolvido no ICMC-USP em projetos anteriores. O sistema de software resultante deverá permitir a configuração dos parâmetros do algoritmo evolutivo graficamente nesta interface para que este possa realizar o ajuste automático dos parâmetros dos indivíduos do enxame para otimizar diversas aplicações como a coleta e transporte de objetos de interesse, exploração do ambiente, transporte colaborativo de objetos, entre outros.

Palavras chave: algoritmos evolutivos, inteligência de enxames, forrageamento, formigas.

1. Introdução

O comportamento de forrageamento das formigas tem sido objeto de estudo há décadas. A habilidade desses insetos em navegar, se comunicar e coletar recursos de maneira eficiente em ambientes complexos tem despertado o interesse dos pesquisadores. A inteligência de enxame refere-se ao comportamento coletivo e às habilidades de resolução de problemas que emergem das interações entre agentes individuais em um grupo [1]. As colônias de formigas são exemplos notáveis de inteligência de enxame, nas quais formigas individuais, por meio de auto-organização e estigmergia [2], formam um sistema complexo capaz de resolver tarefas coletivamente, como o forrageamento de alimentos.

Os algoritmos evolutivos são técnicas computacionais inspiradas nos princípios da evolução natural e da genética. Esses algoritmos permitem a busca iterativa por soluções ótimas para problemas complexos, reproduzindo os processos de seleção natural, reprodução e mutação [3]. Ao representar indivíduos como potenciais soluções dentro de uma população e avaliar seu desempenho por meio de funções de aptidão, os algoritmos evolutivos possibilitam a emergência e o refinamento de soluções ao longo de gerações sucessivas.

A aplicação de algoritmos evolutivos, como os algoritmos genéticos, surge como uma abordagem promissora para simular e investigar a evolução das estratégias de forrageamento das formigas [4][5]. Isso se faz necessário porque os sistemas de inteligência de enxames possuem muitos parâmetros que devem ser estipulados pelo projetista no início dos experimentos e que configuram, por exemplo, a velocidade dos agentes, o tipo e alcance de seus sensores, o depósito de feromônio e os eventos que disparam as mudanças comportamentais dos indivíduos. Cada aplicação específica, cada configuração do ambiente de trabalho dos agentes, necessitam de um conjunto de parâmetros específico para que o sistema produza soluções aceitáveis. Isso torna o ajuste destes parâmetros muito difícil de ser realizado até mesmo por especialistas. Neste contexto, os algoritmos evolutivos são

alternativas interessantes pois permitem o ajuste automático destes parâmetros para otimizar o desempenho dos enxames para aplicações específicas.

Realizar experimentos com centenas de milhares de pequenos robôs físicos, impõe várias dificuldades operacionais, como por exemplo, o manejo de uma grande quantidade de componentes eletrônicos, carregamento da bateria de cada um dos agentes do enxame, posicionamento e inicialização manual de cada robô no ambiente de testes ou atuação, entre outros problemas que podem surgir quando se trata de um grande volume de robôs autônomos. Assim, para tais estudos, trabalhar em uma simulação é uma boa opção, uma vez que é abstraída a complexidade de lidar com robôs físicos. Nessas simulações, a virtualização do ambiente no qual os robôs seriam testados, bem como do hardware desses, permite que testes sejam realizados com mais praticidade e rapidez, realizando alterações de parâmetros da simulação via aplicação ou de comportamento dos agentes via scripts como em [6], no trabalho chamado BeeGround, que gerou uma ferramenta de simulação gráfica de enxame de abelhas, que contava com uma população de 1000 robôs, viabilizando experimentos sobre o mecanismo de agregação dos agentes (abelhas).

Este trabalho deverá integrar uma interface para a aplicação de Algoritmos Evolutivos na otimização de parâmetros na ferramenta de simulação ENXAME, desenvolvida em dois projetos do Programa Unificado de Bolsas de Estudos para Apoio à Formação de Estudantes de Graduação da Universidade de São Paulo (PUB-USP) anteriores (editais PUB-21/22 e PUB-22/23). A ferramenta ENXAME foi desenvolvida no Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC-USP) e já apresenta muitas das funcionalidades interessantes e alguns artigos já estão sendo escritos para divulgação dos primeiros resultados obtidos com a simulação de milhares de agentes simulados nesta ferramenta gráfica. A Figura 1 apresenta um exemplo de funcionamento do simulador. A versão atual da ferramenta mostrou-se capaz de simular em 30 FPS colônias de até 300 mil formigas em um Notebook i5 sétima geração com uma placa de vídeo de entrada NVidia Geforce 940mx e 8Gb de RAM. Esses projetos disponibilizaram como open-source uma ferramenta de simulação de enxames para download em <https://gitlab.com/simoesusp/hardware-accelerated-ant-colony-based-swarm-system>. A arquitetura até o momento é moderna e robusta, no entanto, o código disponível pode ser melhorado com a adição de uma interface para configurar algoritmos evolutivos que possam encontrar boas configurações de parâmetros para os enxames em diferentes aplicações.

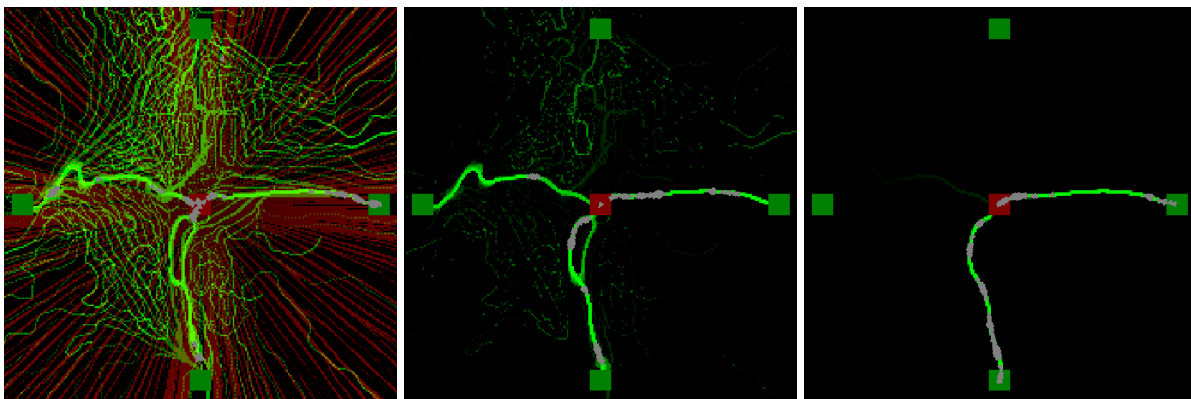


Figura 1 - Simulação de uma colônia de formigas. As linhas verdes e vermelhas são feromônios depositados; o ninho é o quadrado central e os quadrados verdes são as fontes de alimento.

Neste projeto, é proposta a aplicação de algoritmos evolutivos para simular e estudar a adaptação e a otimização das estratégias de forrageamento em colônias de formigas. Os experimentos propostos devem investigar como as interações entre as formigas individuais e seu ambiente conduzem ao surgimento de comportamentos de forrageamento eficientes [7][8].

Por meio da simulação do comportamento de forrageamento das formigas e da aplicação de algoritmos evolutivos, espera-se obter observações valiosas sobre os mecanismos adaptativos que impulsionam a emergência de estratégias eficientes de forrageamento em colônias de formigas. Essa abordagem interdisciplinar, que combina algoritmos evolutivos e inteligência de enxame, fornecerá um arcabouço teórico e prático para explorar a dinâmica complexa do comportamento das formigas, com possíveis aplicações em áreas como otimização, robótica e inteligência artificial [8][9].

1.1 Objetivo

O objetivo deste projeto é desenvolver um algoritmo evolutivo para ajustar automaticamente os parâmetros de um sistema simulado de colônias de formigas. Especificamente, busca-se otimizar o comportamento das formigas no que se refere à coleta e o transporte de objetos de interesse (nesse caso, alimentos), por meio do ajuste adaptativo de parâmetros como velocidade, quantidade de feromônio depositado, alcance e posição das antenas, entre outros. Dada a complexidade do comportamento resultante da interação entre centenas ou até milhares de formigas individuais, torna-se desafiador para um programador humano ajustar manualmente esses parâmetros e comportamentos simples e reativos para alcançar a solução final desejada. Para superar essa limitação, propõe-se a utilização de um algoritmo evolutivo, capaz de ajustar automaticamente os parâmetros por meio de processos evolutivos.

Este projeto propõe desenvolver uma interface para aplicar o algoritmo evolutivo ao simulador de colônias de formigas ENXAME, cujo código foi desenvolvido por Matheus Luis Oliveira da Silva e está disponível no Gitlab. O sistema de software resultante deverá permitir o ajuste automático dos parâmetros dos indivíduos para otimizar o comportamento de coleta e transporte de objetos de interesse. Por meio desse trabalho, busca-se contribuir para a compreensão e aplicação de técnicas evolutivas no contexto do comportamento coletivo de formigas, bem como fornecer observações relevantes para problemas práticos de busca e coleta de recursos. Pode-se dizer, a partir de uma visão mais ampla, que este projeto também busca contribuir para o desenvolvimento de sistemas autônomos e eficientes, com aplicações práticas em diversos campos, como otimização de rotas, alocação de recursos e resolução de problemas complexos.

Serão propostos uma sequência de experimentos para avaliar se o algoritmo evolutivo proposto será capaz de produzir soluções eficientes para aplicações como exploração do ambiente, coleta de objetos de interesse, competição por recursos escassos com outros formigueiros, transporte colaborativo de objetos, entre outros. Esses testes deverão apontar as deficiências dos algoritmos propostos e sugerir modificações nos mesmos para melhorar a eficiência das soluções produzidas.

2. Metodologia

Nesta etapa inicial, serão realizados estudos aprofundados sobre o comportamento das formigas, incluindo sua comunicação baseada em feromônios e movimentação no simulador de formigueiro. O código fonte da ferramenta de simulação será obtido do repositório <https://gitlab.com/simoesusp/hardware-accelerated-ant-colony-based-swarm-system>. Esse simulador está sendo desenvolvido no Grupo de Sistemas Embarcados e Evolutivos do ICMC-USP e deverá ser alterado para incluir a interface de configuração do sistema evolutivo. Neste simulador, as formigas são apresentadas graficamente na forma de pequenos triângulos cinza e são controladas por simples algoritmos que definem sua navegação e comportamento em aplicações de busca e coleta de objetos. Um exemplo pode ser a exploração do ambiente em busca de objetos de interesse, na qual as formigas depositam feromônios tanto na saída do formigueiro como na volta para ele, de forma similar às formigas argentinas (*Iridomyrmex humilis*) [10]. Serão analisados os aspectos essenciais para a adaptação e a fidelidade na reprodução do comportamento das formigas no ambiente simulado.

Após a compreensão do comportamento das formigas, será realizada a implementação de um algoritmo evolutivo para otimizar o processo de forrageamento dos enxames de formigueiros. Diversas técnicas de algoritmos evolutivos, como seleção, crossover, mutação, hereditariedade e outras, serão exploradas com o intuito de aprimorar o desempenho e a adaptação dos enxames simulados. Durante o desenvolvimento, serão adotadas boas práticas de programação embasadas em materiais de referência [11][12] a fim de criar uma estrutura sólida para os códigos desenvolvidos.

Será então adicionado ao simulador um painel destinado aos Algoritmos Evolutivos que deverá conter opções para parametrização do algoritmo, incluindo diferentes técnicas de seleção, crossover e mutação, bem como a forma do cromossomo a ser avaliado e diferentes técnicas e parâmetros de avaliação. Após o início da simulação, as estatísticas e os estados atuais do enxame deverão ser exibidos na tela, juntamente com gráficos de desempenho. A interface deverá conter opções para pausar, interromper, salvar, carregar e reiniciar a simulação a qualquer momento, bem como permitir alterações em tempo real e aceitar novas entradas de objetos e valores de parâmetros. Além disso, como a ferramenta tem fins científicos, é importante que ela suporte o armazenamento de todas as informações relevantes de um experimento, como o estado inicial da simulação, os estados dos agentes durante a simulação e os resultados das avaliações de desempenho fornecidos pela simulação. Isso permitirá a reprodução de experimentos e a geração fácil de dados e estatísticas para estudos e artigos científicos.

Para validar o algoritmo evolutivo desenvolvido, serão realizados testes iniciais, nos quais os resultados obtidos serão comparados com resultados esperados ou conhecidos. Essa comparação permitirá verificar a eficácia do algoritmo em otimizar o processo de forrageamento dos enxames simulados. Em seguida, serão conduzidos testes de desempenho do enxame em diferentes cenários, utilizando diferentes métodos evolutivos, visando identificar possíveis melhorias e otimizações que possam ser aplicadas.

Após a implementação e validação do algoritmo evolutivo, serão realizados testes de desempenho. O objetivo é otimizar o tempo de processamento e realizar ajustes necessários em cada parte da simulação. Serão conduzidas simulações em diferentes cenários, variando os parâmetros do algoritmo evolutivo, a fim de avaliar sua robustez e eficiência. Para isso, deverá ser incluída a opção de realizar a simulação sem a visualização gráfica em tempo real, para

acelerar a evolução do sistema. Ao final do experimento, a solução obtida pelo algoritmo evolutivo pode ser simulada novamente com a visualização habilitada para que se possa ver os comportamentos obtidos.

Ao final da pesquisa, espera-se obter resultados significativos que contribuam para o avanço do conhecimento na área de otimização de enxames e inteligência artificial. A combinação do estudo do comportamento das formigas, a implementação do algoritmo evolutivo e a realização de testes rigorosos permitirá uma análise aprofundada do processo de forrageamento dos enxames simulados, abrindo caminho para aplicações práticas em diversas áreas, como otimização de rotas, logística e robótica.

3. Detalhamento das atividades

Durante o desenvolvimento do projeto, o bolsista terá a oportunidade de se envolver em uma ampla variedade de atividades, abrangendo desde aprofundar-se no estudo dos tópicos relevantes até a etapa de desenvolvimento e aprimoramento de um algoritmo evolutivo que será integrado ao simulador de formigueiro. Essas atividades envolverão a realização de uma série de tarefas específicas, com o objetivo de explorar e compreender profundamente o tema em questão, bem como alcançar os resultados desejados. As principais tarefas a serem realizadas pelo aluno incluem:

1. Pesquisa e análise de literatura sobre Inteligência de Enxame, Algoritmos Evolutivos e Algoritmos Genéticos.
2. Estudo e compreensão dos métodos e estratégias do Algoritmo Evolutivo.
3. Desenvolvimento e implementação do Algoritmo Evolutivo para otimização dos enxames.
4. Integração do Algoritmo Evolutivo com o simulador para estudar o comportamento de forrageamento das formigas.
5. Realização de testes iniciais para validar o Algoritmo Evolutivo desenvolvido.
6. Análise dos resultados obtidos e ajustes necessários, se aplicável.
7. Realização de testes do Algoritmo Evolutivo em diferentes cenários simulados.
8. Avaliação do desempenho e comportamento do Algoritmo Evolutivo com base em diferentes métodos evolutivos estudados.
9. Identificação de oportunidades de aprimoramento do Algoritmo Evolutivo com base nos resultados e análises.
10. Implementação de melhorias e ajustes para aperfeiçoar sua eficiência e eficácia.
11. Análise dos resultados obtidos nos testes de desempenho e validação.
12. Elaboração de artigos descrevendo o comportamento do Algoritmo Evolutivo e suas aplicações no contexto do simulador de formigueiro.
13. Elaboração do relatório final abrangendo todas as etapas do projeto.
14. Preparação do projeto para disponibilização em um repositório como o Github ou Gitlab, compartilhando o código e a documentação na forma de open-source.

3.1 Cronograma

Na Tabela I apresenta-se o cronograma de 12 meses com as atividades da pesquisa.

Tabela I : Cronograma de atividades

| Atividade | 1° Bin | 2° Bin | 3° Bin | 4° Bin | 5° Bin | 6° Bin |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | • | | | | | |
| 2 | • | • | | | | |
| 3 | • | • | | | | |
| 4 | • | • | | | | |
| 5 | • | • | | | | |
| 6 | • | • | | | | |
| 7 | | • | • | • | | |
| 8 | | • | • | • | | |
| 9 | | • | • | • | • | • |
| 10 | | | • | • | • | • |
| 11 | | | • | • | • | • |
| 12 | | | | • | • | • |
| 13 | | | | • | • | • |
| 14 | | | | | • | • |

4. Resultados Esperados

Este projeto pretende utilizar o repositório de software Github para disponibilizar uma versão atual do software para download para diversos sistemas (Windows e Linux), convidando usuários externos a se cadastrar e a compartilhar suas próprias modificações e melhorias, organizando uma comunidade de usuários que produza voluntariamente novas estruturas que possam discutir e compartilhar com todos os novos usuários. Sendo assim, esse projeto visa organizar e centralizar uma comunidade de pesquisadores no Brasil e no exterior que possam compartilhar experimentos e estudos na área de Inteligência de Enxames. Isso traz um caráter de Extensão ao projeto, que envolverá o O GELOS – Grupo de Extensão em Livre e Open Source do ICMC-USP para ajudar com a disponibilização do projeto. Os alunos da disciplina SSC0713 - Sistemas Evolutivos e Aplicados à Robótica deverão utilizar e testar essa ferramenta para exercícios em aula, contemplando também a área de Ensino de Graduação. A Tabela II apresenta os resultados previstos e alguns indicadores que serão levados em consideração.

Tabela II : Resultados previstos e seus respectivos indicadores de avaliação

| Resultados | Indicadores |
|--|---|
| Integração bem-sucedida do código do algoritmo evolutivo com a ferramenta ENXAME . | Testes de desempenho da ferramenta com um grande volume de gerações simuladas para as eras do Algoritmo Evolutivo. |
| Verificação e validação do Algoritmo Evolutivo inicial. | Utilização da evolução de um parâmetro cujo comportamento é previsível, por exemplo velocidade: quanto maior a velocidade, mais alimento as formigas irão levar para o formigueiro. |
| Reestruturação do código para facilitar a sua manutenção e compreensão. | Feedback dos alunos envolvidos com o projeto e de pesquisadores e programadores externos ao projeto. |
| Desenvolvimento de diferentes métodos e estratégias evolutivas para serem integrados ao Algoritmo Evolutivo. | Geração de gráficos de evolução dos indivíduos e relatórios que evidenciam a otimização das novas estratégias adotadas. |
| Desenvolvimento de um módulo eficiente para gerar e armazenar dados e resultados. | Geração de relatórios diversos da simulação, bem como testes de recuperação de estados de simulação. |
| Elaboração de manuais intuitivos e organização eficiente do Algoritmo Evolutivo e da ferramenta EXAME. | Feedback de alunos e pesquisadores interessados no projeto que testarão tanto a ferramenta como os algoritmos e seus manuais de uso. |

5. Sobre o candidato

Kenzo é estudante de graduação em Ciência da Computação na Universidade de São Paulo, campus de São Carlos. Ele é experiente em algoritmos e estruturas de dados, tendo participado de competições de programação desde o ensino médio, onde conquistou, por exemplo, uma medalha de prata na Competição Ibero-Americana de Informática e Computação. Durante a graduação, ele se destacou no GEMA (Grupo de Estudo para a Maratona de Programação), representando o grupo na fase nacional da maratona de programação de 2021/2022 e conquistando o 12º lugar com uma medalha de bronze. Além disso, foi um dos responsáveis por dobrar as medalhas da OBI (Olimpíada Brasileira de Informática) do GEMA (3 alunos do grupo foram medalhistas em 2021, enquanto que em 2022 foram 6) ao participar ativamente do grupo, preparando materiais de estudo, dando aulas aos alunos e representando o GEMA em feiras.

No segundo semestre de 2021 participou da disciplina SSC0713 - Sistemas evolutivos aplicados à robótica, onde se interessou por algoritmos bioinspirados e desenvolveu seu projeto no repositório <https://github.com/kenzonobre/Evolutionary-fish> sobre peixes evolutivos. Após isso, deu continuidade ao estudo sobre o assunto em setembro de 2022,

quando lhe foi concedido uma bolsa PUB-22/23 de iniciação científica para auxiliar no desenvolvimento do simulador de formigueiro acelerado em hardware (ENXAME) e na aplicação de algoritmos evolutivos.

6. Referências Bibliográficas

1. Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford University Press.
2. J. Duan, Y. -a. Zhu and S. Huang, "Stigmergy agent and swarm-intelligence-based multi-agent system," *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Beijing, China, 2012, pp. 720-724, doi: 10.1109/WCICA.2012.6357972.
3. Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press.
4. Smith, C. R. (2020). Toward a mathematical model of social insects with distributed intelligence. *PLoS Computational Biology*, 16(1), e1007590.
5. Oliveira, P., Rosendo, J., & Christensen, A. L. (2018). Simulating ant colony behavior using a collective decision-making framework. *Swarm Intelligence*, 12(2-3), 119-141.
6. S. Lim, S. Wang, B. Lennox and F. Arvin, "BeeGround - An Open-Source Simulation Platform for Large-Scale Swarm Robotics Applications," 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2021, pp. 75-79, doi: 10.1109/ICARA51699.2021.9376494.
7. Goss, S., Arnellos, A., & Di Paolo, E. A. (2021). What Can We Learn From Evolutionary Robotics about the Evolution of Developmental Systems? *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 672908.
8. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). *Ant colony optimization*. MIT Press.
9. Trianni, V., & Dorigo, M. (2020). Evolutionary swarm robotics: evolving self-organising behaviours in groups of autonomous robots. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1806), 20190138.
10. S. Goss, S. Aron, J.L. Deneubourg, J.M. Pasteels, Self-organized shortcuts in the Argentine ant. *Naturwissenschaften* 76 (12), 579–581 (1989)
11. Gregory, J. (2018). *Game Engine Architecture*.
12. Vandevoorde, D., Josuttis, N. M., & Gregor, D. (2002). *C++ Templates: The Complete Guide*. Addison-Wesley.