
Colónia de Formigas

Eduardo Junqueira nº 1251561, 1251561@isep.ipp.pt;
João Azevedo nº 1251566, 1251566@isep.ipp.pt;
Rodrigo Martins nº 1250398, 1250398@isep.ipp.pt;
Repositório GitHub: [1].
Supervisionado por Filipe Azevedo, fta@isep.ipp.pt.

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro, 2025

Índice

Lista de Figuras	3
1 Introdução - João e Rodrigo	2
1.1 Contextualização	2
1.2 Definição do Problema	2
1.2.1 Objetivo	2
1.2.2 Resultados esperados	2
1.3 Plano de Trabalho	3
1.4 Organização do relatório	3
2 Estado da Arte	4
2.1 Inspiração Biológica- Comportamento Formigas	4
2.1.1 Comportamento coletivo e inteligência de enxame	4
2.1.2 Comunicação química e mecanismos de feedback	4
2.1.3 A experiência de Goss et al. (1989)	5
2.1.4 Variações experimentais e papel da memória	6
2.1.5 Da biologia à inspiração computacional	7
3 Desenvolvimento - ACO	8
3.1 Princípios: Rodrigo	9
3.2 Métodos: Rodrigo	10
3.3 Etapas - ACO	11
3.3.1 TSP - Problema do Caixeiro Viajante	12
3.3.2 AS - Otimização por colônias de formigas	13
3.4 Diagramas - AS:	15
3.5 Pseudocódigo Representativo - AS	17
4 Aplicações em Otimização - Eduardo	18
4.1 Diagramas - TSP:	19
5 Conclusões: João e Rodrigo	20
Referências	21

Lista de Figuras

2.1	Resultados obtidos no esquema representativo do processo ,em cada arco, de <i>forrageamento</i> , salientando a concentração de feromonas depositadas [3].	5
2.2	Resultados obtidos em Labirintos usados por Goss et al. durante a experiência, sendo b uma variação mais complexa [4]	6
2.3	Resultados da experiência de Goss et al. , [4]	7
3.1	Diagrama que representa a topologia base presumida para o trabalho de busca de alimentos pelas formigas, autoria própria feito no draw.io [9].	15
3.2	"Flowchart": descreve as etapas do processo do ciclo de alimentação das formigas, autoria própria feito no draw.io [9].	16

Resumo

Colônia de formigas no contexto de Algoritmos Genéticos é o algoritmo de estudo neste relatório. Este algoritmo tem como base os conceitos biológicos das formigas desde a sobrevivência em busca do alimento, reprodução da sua população e comunicação química por substância de feromonas.

O problema do Caixeiro Viajante - TSP, através deste algoritmo visa demonstrar a metodologia da melhor solução. Para este problema será explorado a otimização por colônias de formigas - ACO, no que diz respeito ao sistema de formigas - AS e ao sistema de colônia de formigas -ACS.

As aplicações em otimização neste algoritmo, são expostas como casos de uso aplicáveis para obter uma solução ótima.

Capítulo 1

Introdução - João e Rodrigo

1.1 Contextualização

1.2 Definição do Problema

1.2.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste no estudo do título deste relatório: **colónia de formigas**, que te como base a criação de um relatório onde será explicado um

1.2.2 Resultados esperados

Casos de uso e implementação de algoritmos para os mesmos serão evidenciados aqui nesta subsecção.

1.3 Plano de Trabalho

O trabalho realizado foi feito

1.4 Organização do relatório

Este relatório tem como base a estrutura seguinte:

- **0- Resumo:** Breve explicação do conteúdo da introdução: 1.
- **1- Introdução:** Explicação do relatório com maior ênfase, ou seja, explicar: 1.1- o contexto, 1.2- os objetivos, ??- os resultados esperados, ??- os problemas e motivação.
- **2- Estado da Arte:**
- **3- Desenvolvimento:**
- **4- Aplicações em Otimização:** Casos de uso em aplicações reais.
- **5- Conclusão:** Finalização do relatório, considerações finais e autoavaliação.
- **7- Referências:** Todas as referências citadas neste relatório e base de dados em repositórios do GitHub.

Capítulo 2

Estado da Arte

Dado o seguimento da introdução do Capítulo 1, será agora neste capítulo declarado o estado de arte do tema em estudo.

2.1 Inspiração Biológica- Comportamento Formigas

A biologia é o conceito base no estudo de algoritmos genéticos, mais propriamente no algoritmo genético da Colônia de formigas.

Assim, toda a genética e vida das formigas terá de ser estudada e entendida previamente antes do desenvolvimento deste relatório 3.

2.1.1 Comportamento coletivo e inteligência de enxame

As formigas são insetos sociais que fascinam biólogos e cientistas de computação devido à sua organização coletiva. Apesar de serem insetos cuja as suas capacidades cognitivas individuais são limitadas, em colônias, estas realizam tarefas de elevada complexidade, como defesa de território, construção de ninhos, mas especialmente, a procura eficiente de alimento, um processo chamado *forrageamento*. Este comportamento distribuído e cooperativo surge da interação de indivíduos simples que seguem regras locais, sem qualquer supervisão central. Essa forma de coordenação descentralizada é um exemplo clássico de *inteligência de enxame* (*Swarm Intelligence*). [2]

2.1.2 Comunicação química e mecanismos de feedback

Durante o processo de *forrageamento*, as formigas saem do ninho, inicialmente, deslocando-se de forma quase aleatória, em busca de alimento. Quando uma formiga encontra uma fonte de alimento, ela retorna ao ninho à medida que deixa no solo um rasto de uma substância química chamada *feromona*. Este atua como um mensageiro químico, que funciona como pista de comunicação indireta para as outras formigas da colônia, que vão tender a seguir rastos com maior concentração de feromonas. Gerando assim um sistema de *feedback positivo*: quanto maior o

número de formigas que percorrem uma determinada rota, maior vai ser a concentração de feromonas, levando assim a uma maior probabilidade de outras formigas também escolherem esse caminho. A figura em baixo descrita 2.1, demonstra o mencionado:

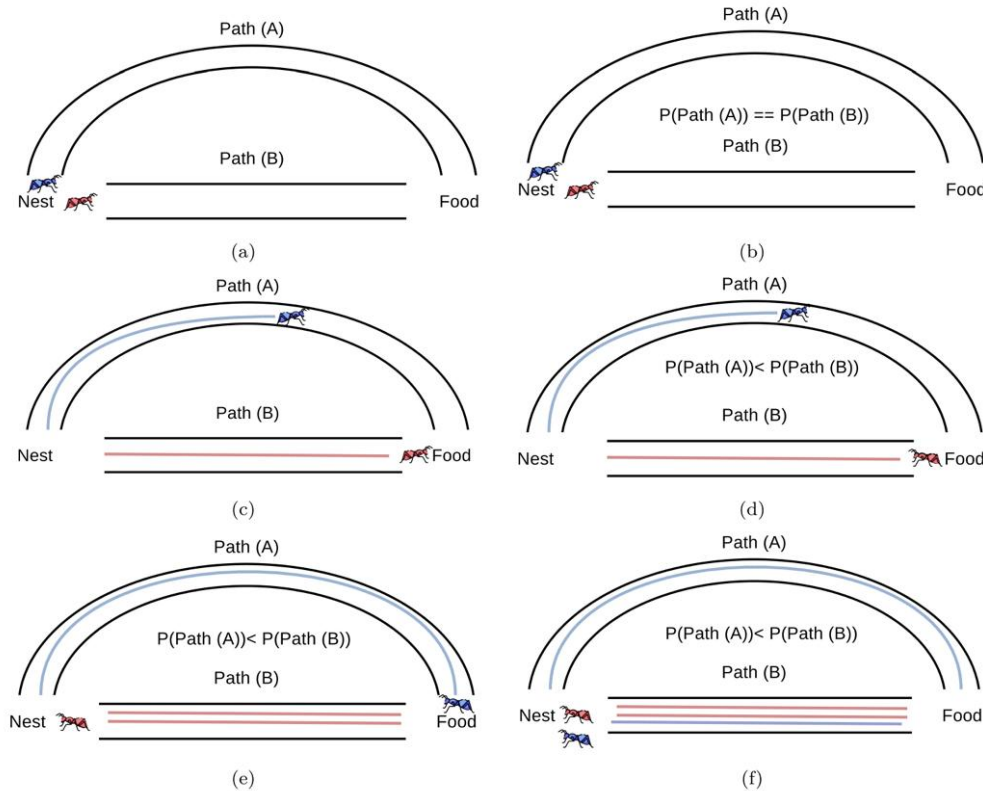


Figura 2.1: Resultados obtidos no esquema representativo do processo ,em cada arco, de *forrageamento*, salientando a concentração de feromonas depositadas [3].

Por outro lado, as feromonas também geram um sistema de *feedback negativo*, pois este evapora naturalmente com o tempo, impedindo que o sistema fique com soluções menos eficientes. Fortalecendo os caminhos mais curtos e vantajosos, à medida que as rotas mais longas e menos eficientes vão desaparecendo, resultando em um processo dinâmico de auto-organização. A combinação entre o reforço positivo e o esquecimento gradual permite com que a colônia esteja sempre a adaptar-se com o ambiente envolvente.

2.1.3 A experiência de Goss et al. (1989)

De forma a conseguir entender melhor este comportamento coletivo das formigas, Goss, Aron, Deneubourg e Pasteels em 1989, organizaram um dos estudos mais importantes nesta área. O principal objetivo deste experimento era compreender como as formigas escolhem o caminho entre o ninho e uma fonte de alimento, apesar das inúmeras possibilidades, e de que forma a comunicação química tinha influência.

Os pesquisadores utilizaram formigas da espécie *Lasius niger*, pois estas são conhecidas pelo seu comportamento de forrageamento bem organizado. A experiência consistia em um trajeto, em que o ponto de partida era o ninho, e a meio do caminho existia uma ramificação, dividindo o trajeto em dois caminhos possíveis, um mais curto e outro mais longo, que conduziam à mesma fonte de alimento. A figura a baixo 2.2, explica perfeitamente o referido anteriormente:

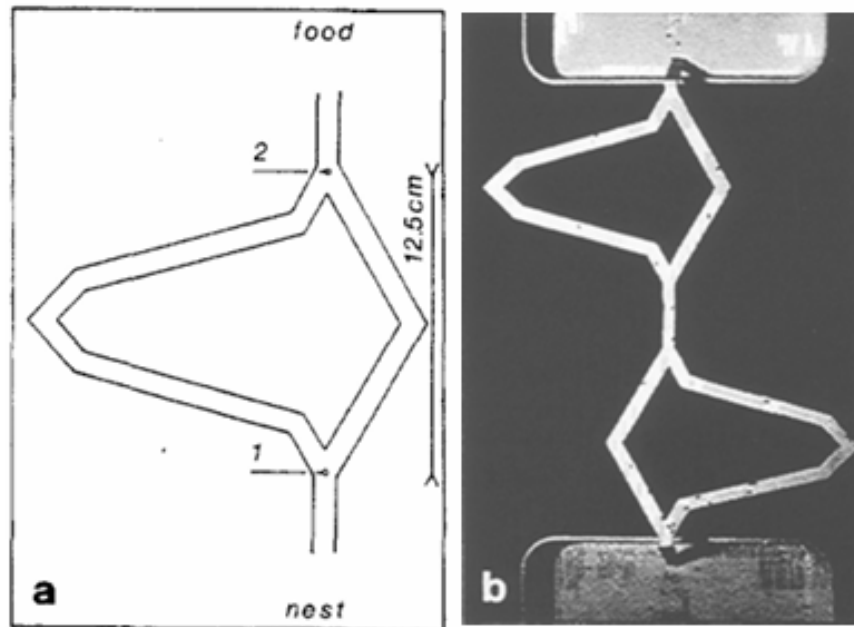


Figura 2.2: Resultados obtidos em Labirintos usados por Goss et al. durante a experiência, sendo b uma variação mais complexa [4]

No início do teste, as formigas não tinham qualquer informação sobre qual caminho era mais eficiente, sendo então a primeira fase da experiência dominada pela exploração quase aleatória. As primeiras formigas exploravam os dois caminhos de forma praticamente equilibrada até encontrarem alimento e regressarem ao ninho, depositando feromonas ao longo do processo. Começando então a surgir o mecanismo de *feedback positivo*, mencionado anteriormente, sendo então o caminho mais curto reforçado com feromonas mais cedo, tornando-o mais atrativo para as formigas que vão sair em busca de alimento.

Com o passar do tempo, mais e mais formigas começaram a escolher o mais curto, reforçando ainda mais a trilha química desse ramo. Havendo assim cada vez mais concentração de feromonas no caminho mais eficiente, enquanto diminuía gradualmente no trajeto mais longo devido à evaporação natural das feromonas (*feedback negativo*), diminuindo assim a frequência de passagem de formigas. O resultado deste comportamento foi descrito pelos autores como um “atalho auto-organizado” (*self-organized shortcut*), pois as formigas “descobriam” a rota mais vantajosa, sem que nenhuma delas tivesse conhecimento dos trajetos. Sendo então uma interação entre as formigas e o local e os sistemas de *feedback positivo* e *negativo* das feromonas. [4]

2.1.4 Variações experimentais e papel da memória

Depois os autores também realizaram variações do experimento, alterando o ângulo dos ramos, a diferença de comprimento entre os dois caminhos ou adicionando mais ramos como na Fig. 2.2. Observaram que quando a diferença entre os caminhos era pequena, a colônia demorava mais tempo a convergir para o caminho mais eficiente, enquanto se a diferença fosse maior, seria mais rápida essa conversão. Mostrando mais uma vez que a convergência para o caminho mais eficiente dependia da intensidade relativa das feromonas.

Na imagem em baixo 2.3: mostrando a distribuição de formigas que escolhem o caminho mais curto, variando o número de trajetos feitos e a razão entre o comprimento do ramo maior com o menor, d representa os resultados após a meio da experiência um dos ramos é bloqueado e h quando um caminho mais curto surge após um número de trajetos feitos noutro ramo [4].

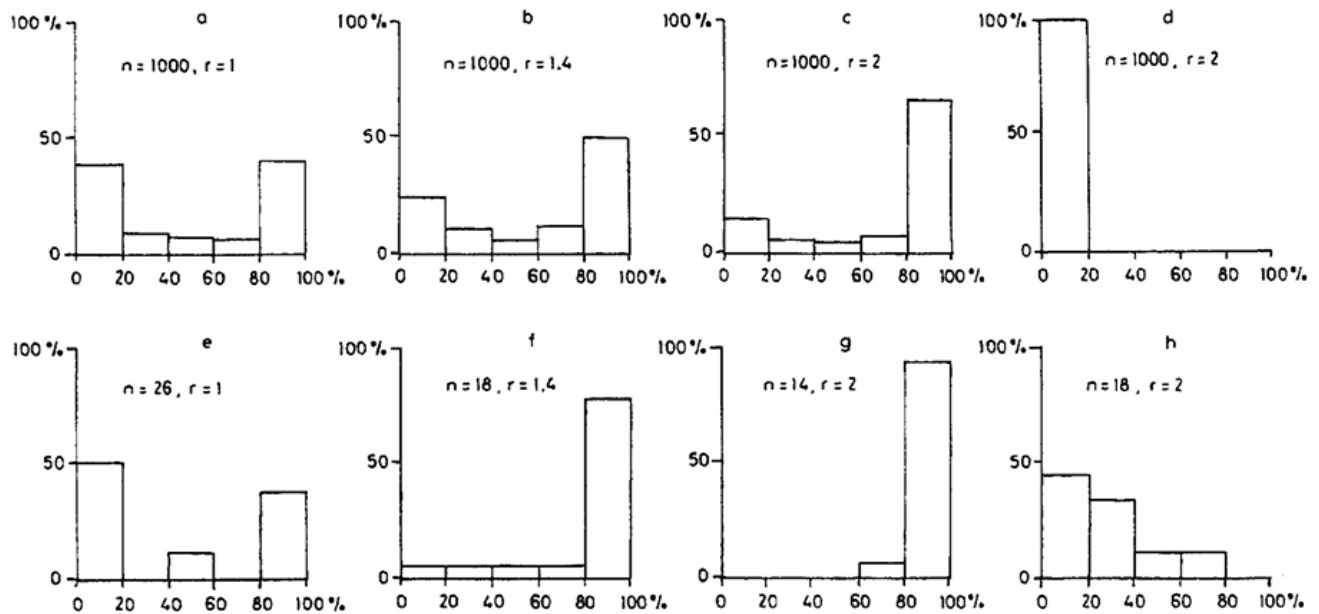


Figura 2.3: Resultados da experiência de Goss et al., [4]

Outro aspeto que foi observado pelos investigadores, foi a hipótese de as formigas poderem usar alguma forma de memória espacial (entre a esquerda e a direita) ao escolher entre duas ramificações equivalentes. Para isso, colocaram alimento numa das ramificações, e as formigas que encontraram o alimento foram marcadas; após isso, trocou-se os ramos por uns novos não marcados com feromonas e verificou-se que as formigas marcadas escolheram as duas ramificações de forma aproximadamente aleatória. Interpretando assim que a memória direcional das formigas tem um papel muito limitado e que a orientação depende sobretudo das feromonas deixadas durante o trajeto.

2.1.5 Da biologia à inspiração computacional

Resumindo, as observações de Goss e colegas demonstraram que a organização coletiva das formigas resulta da interação simples entre indivíduos e do uso de agentes químicos partilhados no ambiente. A ausência de uma memória direcional significativa e as feromonas como principal meio de comunicação, demonstram um sistema de coordenação indireta, onde o ambiente representa um mediador da informação. Este fenómeno, conhecido como *stigmergia*, permite que o grupo alcance soluções eficientes sem qualquer controlo centralizado ou comunicação direta entre indivíduos. Esta capacidade de resolver problemas complexos a partir de regras locais simples despertou o interesse de investigadores em várias áreas, levando à criação de modelos computacionais inspirados nesse comportamento natural, como o *Ant Colony Optimization (ACO)*, que traduz matematicamente estes princípios biológicos para aplicações em otimização.

Capítulo 3

Desenvolvimento - ACO

"Ant Colony Optimization"explicação....

3.1 Princípios: Rodrigo

....

3.2 Métodos: Rodrigo

..... outros

3.3 Etapas - ACO

Após a explicação anterior em 3.1 e em 3.2, agora será descrito as principais etapas que compõem o funcionamento do algoritmo de **Otimização de colônia de formigas (ACO — Ant Colony Optimization)**.

Este algoritmo tem sido amplamente aplicado em problemas combinatórios complexos tal como o **Travelling Salesman Problem TSP - Problema do Caixeiro Viajante**.

Este problema demonstram a capacidade adaptativa e distribuída do ACO, no qual as soluções emergem da cooperação de múltiplos agentes simples, refletindo o comportamento coletivo das colônias naturais das formigas. Para isso é necessário primeiro entender o algoritmo heurístico ACO.

O uso de heurísticas é de suma importância para resolver estes problemas. A heurística não garante uma solução ótima, mas, se tiver bem implementada e com parâmetros bem ajustados, garante uma boa solução a que atribuímos como solução ótima.

Ant System - AS foi o primeiro exemplo de algoritmo de ACO desenvolvido pelo autor, mais citado neste relatório, Marco Dorigo [5] entre outros, mas foi dada extrema importância a citações deste autor: [6], [7].

Este exemplo foi criado em 1996 e foi o primeiro a ser uma solução para o problema do TSP - Problema do Caixeiro Viajante.

Ant Colony System - ACS foi uma evolução do Ant System em 1997 por Marco Dorigo [5] unicamente.

3.3.1 TSP - Problema do Caixeiro Viajante

As suas principais etapas são as seguintes:

1. **Parâmetros iniciais e feromona:**
2. **Construção de soluções pelas formigas:**

3.3.2 AS - Otimização por colônias de formigas

As suas principais etapas são as seguintes:

1. **Parâmetros iniciais e feromona:** Define-se o número de formigas, a que se chama de número de população, referente aos parâmetros de controlo (α, β, ρ) , número máximo de iterações, e os valores iniciais do rastro de feromona τ_{ij} . Normalmente, o feromônio é inicializado com um valor constante τ_0 , distribuído de forma uniforme sobre todos os possíveis percursos.
2. **Construção de soluções pelas formigas:** Cada formiga é colocada num ponto inicial (por exemplo, uma cidade no problema do caixeiro-viajante). As formigas constroem soluções de forma incremental, selecionando os próximos passos de acordo com uma probabilidade que combina a informação de feromona e uma função heurística [7].

A probabilidade P_{ij}^k de uma formiga k mover-se do nó i para o nó j é definida por:

$$P_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} (\tau_{il})^\alpha (\eta_{il})^\beta}$$

onde: - τ_{ij} representa a intensidade do feromônio na ligação (i,j);

- η_{ij} é a informação heurística (ex: inverso da distância) [8]

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$$

- α e β controlam a importância relativa desses dois fatores;

- N_i^k é o conjunto de movimentos disponíveis para a formiga k a partir do nó i .

3. **Avaliação das soluções:** Após todas as formigas completarem as suas soluções, avalia-se a qualidade de cada uma através da função objetivo do problema (ex: distância total do percurso). Identifica-se a melhor solução encontrada (solução ótima) na iteração e, ou opcionalmente, a melhor solução global até o momento.

4. **Atualização dos feromônios:** Os rastros de feromônio são atualizados com base nas soluções construídas. Parte da feromona existente evapora, e uma nova quantidade é depositada nas rotas pertencentes às melhores soluções [7], [8].

O processo é descrito pela fórmula:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$$

onde:

- ρ é a taxa de evaporação que está entre os valores: $]0,1[$;
- se a formiga k usou o arco (i,j) ; caso contrário, $\Delta\tau_{ij}^k = 0$;

$$\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q}{L_k}$$

- Q é uma constante que regula a quantidade de feromônio depositado;
 - L_k é o custo (ou comprimento) da solução encontrada pela formiga k .
5. **Critério de paragem:** O algoritmo termina quando é atingido o número máximo de iterações, ou quando as feromonas convergem, isto é, quando a maioria das formigas passa a escolher a mesma rota (indicando estabilidade da solução).

3.4 Diagramas - AS:

Esta secção é referenciada e citada pelos diagramas que explicam o mencionado anteriormente.

A figura em baixo 3.1, explica de uma forma mais visual o algoritmo AS.

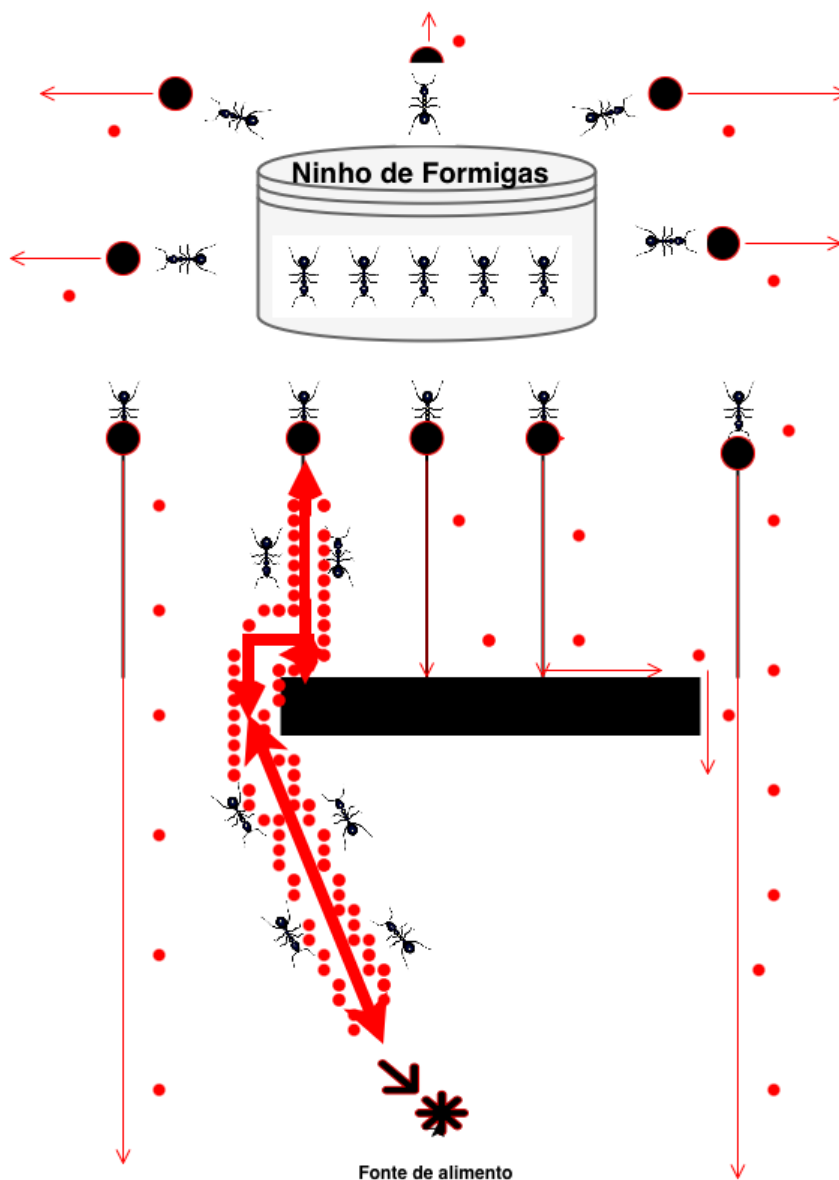


Figura 3.1: Diagrama que representa a topologia base presumida para o trabalho de busca de alimentos pelas formigas, autoria própria feito no draw.io [9].

Cada ponto vermelho, corresponde às feromonas, (as feromonas das formigas são substâncias químicas que funcionam como um sistema de comunicação para orientação e alerta na colónia) de sentido ninho-fonte e fonte-ninho que são libertadas pelas formigas. Verifica-se que o caminho mais curto com menor distância é o que está com maior número de feromonas logo é o caminho da solução para a distância escolhida [7].

Assim, este caminho só será substituído por outro, caso exista evaporação das feromonas e o caminho não seja mais a solução para a fonte de alimento. O problema que será exposto aqui seria em reencontrar o caminho ótimo após uma alteração do percurso solução ou da fonte de alimento ou da inexistência de ambos.[7]

O flowchart em baixo na figura 3.2 explica em algoritmo, do tipo "flowchart", melhor a representação desta solução:

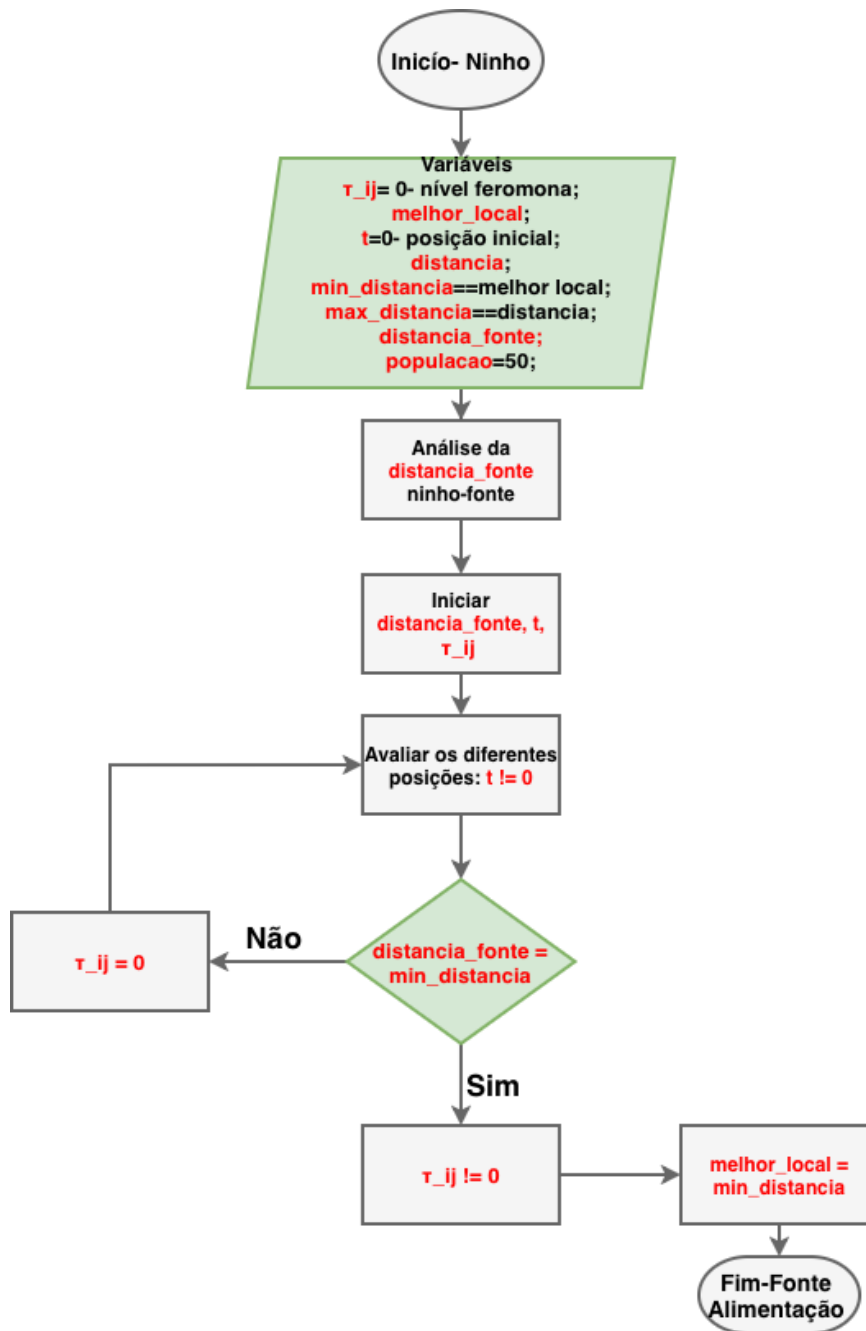


Figura 3.2: "Flowchart": descreve as etapas do processo do ciclo de alimentação das formigas, autoria própria feito no draw.io [9].

Este algoritmo é composto por um ciclo que alterna entre a fase inicial de exploração e a fase seguinte de atualização de feromona, até ser atingido um critério suficiente que seja a solução ótima ou uma solução escolhida que muitas vezes não é a solução ótima mas sim a escolhida por determinados fatores dependendo da utilização deste algoritmo[10].

3.5 Pseudocódigo Representativo - AS

O funcionamento global do algoritmo pode ser sintetizado no seguinte pseudocódigo criado de acordo com o flowchart em cima 3.2:

```

/*
Pseudocódigo de Análise do problema ACO
-analisar distancia_fonte entre ninho e fonte;
-analisar a melhor solução;
*/
procedimento [melhor_local] = ColoniaFormigas(t_ij,t,populacao)
    // Definição das variáveis principais
    t_ij = 0          // nível de feromona acumulado para cada aresta/arco percorrido
    melhor_local      // armazena a melhor localização encontrada
    t = 0             // posição/estado inicial
    distancia         // distância percorrida para diferentes caminhos
    min_distancia = melhor_local    // menor distância encontrada melhor solução
    max_distancia = distancia       // maior distância: não é a melhor solução
    populacao = 50    // número de formigas definido inicialmente
    distancia_fonte // distancia ninho fonte

    // Inicializar variáveis para a exploração
    iniciar (distancia_fonte), (t), (t_ij);

    // Avaliar as diferentes posições até que todas tenham sido visitadas
    enquanto existirem posições a serem avaliadas (t != 0)
        // Verifica se a posição atual é a melhor possível
        se (distancia_fonte == min_distancia);

            então:
                (t_ij) != 0;          // aumenta trilha de feromona
                (melhor_local) = (min_distancia);
            se-não:
                (t_ij) = 0;          // trilha de feromona evaporado
                retorna (-1); // retorna a verificação!
            fim-se:
                // passar para a próxima posição caso seja aletardo distancia_fonte
                atualizar (t), (distancia_fonte);
            fim-enquanto:
                // Quando finalizar, retorna o melhor local encontrado
                retornar (melhor_local);
fim-procedimento

```

Este pseudocódigo pretende uma uma forma mais simples, ou seja, informal e simplificada de descrever os passos deste algoritmo AS, usando uma combinação de linguagem natural e elementos de programação para facilitar a leitura do mesmo.

Capítulo 4

Aplicações em Otimização - Eduardo

O caso de estudo que será analisado é referente ao Problema do Caixeiro Viajante - TSP, que está presente em um repositório do GitHub em uma aplicação em python que basicamente resolve o problema com base neste algoritmo de estudo[11].

4.1 Diagramas - TSP:

Esta secção é referenciada e citada pelos diagramas que explicam o mencionado anteriormente do caso de estudo:

Capítulo 5

Conclusões: João e Rodrigo

Referências

- [1] JunqueiraDevEduardo, “Github - junqueiradeveduardo repositório.” [Citado na página 1]
- [2] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, “Swarm intelligence : From natural to artificial systems / e. bonabeau, m. dorigo, g. theraulaz.,” 01 2001. [Citado na página 4]
- [3] M. A. Awadallah, S. N. Makhadmeh, M. A. Al-Betar, L. M. Dalbah, A. Al-Redhaei, S. Kouka, and O. S. Enshassi, “Multi-objective ant colony optimization: Review,” *ARCHIVES OF COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING*, vol. 32, pp. 995–1037, MAR 2025. [Citado nas páginas 3 e 5]
- [4] S. Goss, S. Aron, J.-L. Deneubourg, and J. Pasteels, “Self-organized shortcuts in the argentine ant. naturwissenschaften 76: 579-581,” *Naturwissenschaften*, vol. 76, pp. 579–581, 12 1989. [Citado nas páginas 3, 6 e 7]
- [5] C. da Wikipédia, “Marco dorigo,” Feb. 2021. [Citado na página 11]
- [6] 2009. [Citado na página 11]
- [7] F. Breve, “Ant colony optimization.” <https://www.fabriciobreve.com/material/cin/CIN-11-ACO.pdf>, 2024. Apostila, UNESP. [Citado nas páginas 11, 13, 14 e 15]
- [8] F. De Economia, “Ant colony optimization: a literature survey,” 2012. [Citado nas páginas 13 e 14]
- [9] “Diagramas draw.io colônia de formigas: flowcharts.” [Citado nas páginas 3, 15 e 16]
- [10] “Github - junqueiradeveduardo/col-nia-formigas-caixeiro-viajante: Otimização por colônia de formigas (ant colony optimization - aco) aplicado ao problema do caixeiro viajante (traveling salesman problem - tsp)..” [Citado na página 16]
- [11] “Github - junqueiradeveduardo repositório.” [Citado na página 18]