

POLITÉCNICO DO PORTO  
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

---

## Colónia de Formigas

---

Eduardo Junqueira nº 1251561,  
João Azevedo nº 1251566,  
Rodrigo Martins nº 1250398,  
Base de dados em [1].  
Supervisionado por Filipe Azevedo, fta@isep.ipp.pt.

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

**ISEP** INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA  
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro, 2025



# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1 Contextualização . . . . .   | 3         |
| 1.2 Definição do Problema . . . . .                                    | 3         |
| 1.2.1 Objetivo . . . . .   | 3         |
| 1.2.2 Resultados esperados . . . . .                                   | 4         |
| 1.3 Plano de Trabalho . . . . .  | 4         |
| 1.4 Organização da Dissertação . . . . .                               | 4         |
| <b>2 Estado da Arte</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Inspiração Biológica: o comportamento das formigas . . . . .       | 5         |
| 2.1.1 Comportamento coletivo e inteligência de enxame . . . . .        | 5         |
| 2.1.2 Comunicação química e mecanismos de feedback . . . . .           | 5         |
| 2.1.3 A experiência de Goss et al. (1989) . . . . .                    | 6         |
| 2.1.4 Variações experimentais e papel da memória . . . . .             | 8         |
| 2.1.5 Da biologia à inspiração computacional . . . . .                 | 9         |
| <b>3 Desenvolvimento</b>   | <b>11</b> |
| 3.1 Princípios: . . . . .  | 11        |
| 3.2 Métodos: . . . . .   | 11        |
| 3.3 Etapas- Eduardo para baixo! . . . . .                              | 12        |
| 3.4 Pseudocódigo Representativo . . . . .                              | 14        |
| 3.5 Diagramas ACO: . . . . .   | 15        |
| 3.6 Casos de Uso . . . . .   | 17        |
| 3.7 Otimização por Colônia de Formigas - Problema do Caixeiro Viajante | 17        |
| 3.8 Otimização por Colônia de Formigas - AS . . . . .                  | 17        |
| <b>4 Aplicações em Otimização</b>                                      | <b>19</b> |
| 4.1 Trabalho Futuro . . . . .  | 19        |
| <b>5 Conclusões</b>  | <b>21</b> |
| <b>Referências</b>   | <b>22</b> |



# **Lista de Figuras**

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Esquema representativo do processo de <i>forrageamento</i> , salientando a concentração de feromonas depositadas. [3] | 6  |
| 2.2 | Labirintos usados por Goss et al. durante a experiência, sendo b uma variação mais complexa [4]                       | 7  |
| 2.3 | Resultados da experiência de Goss et al.,   | 8  |
| 3.1 | Diagrama que representa a topologia base presumida para o trabalho de busca de alimentos pelas formigas,[5]. [6].     | 15 |
| 3.2 | "Flowchart": descreve as etapas do processo do ciclo de alimentação das formigas![5] [6].                             | 16 |

# **Resumo**

Colónia de formigas é um algoritmo



## **Capítulo 1**

# **Introdução**

Este relatório tem como estrutura a seguinte:

- **0- Resumo:** Breve explicação do conteúdo da introdução, 1 e aspectos importantes a ter em consideração.
- **1- Introdução:** Explicação do relatório com maior ênfase, ou seja, explicar: 1.1- o contexto, 1.2- os objetivos, 1.3- a organização, 1.4- os problemas e motivação.
- **2- Desenvolvimento:**.....
- **??- Outros assuntos:**
- **- Conclusão:** Finalização do relatório, considerações finais e autoavaliação.
- **7- Referências:** Todas as referências citadas neste relatório.

### **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 todo o processo da "Ant Colony Optimization", ACO.

### **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**

### **1.4 Organização da Dissertação**

## Capítulo 2

# Estado da Arte

Tal como foi referido em 1...

### 2.1 Inspiração Biológica: o comportamento das formigas

#### 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 colónias, 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 rastro de uma substância química chamada *feromona*. Este atua como um

mensageiro químico, que funciona como pista de comunicação indireta para as outras formigas da colónia, 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.

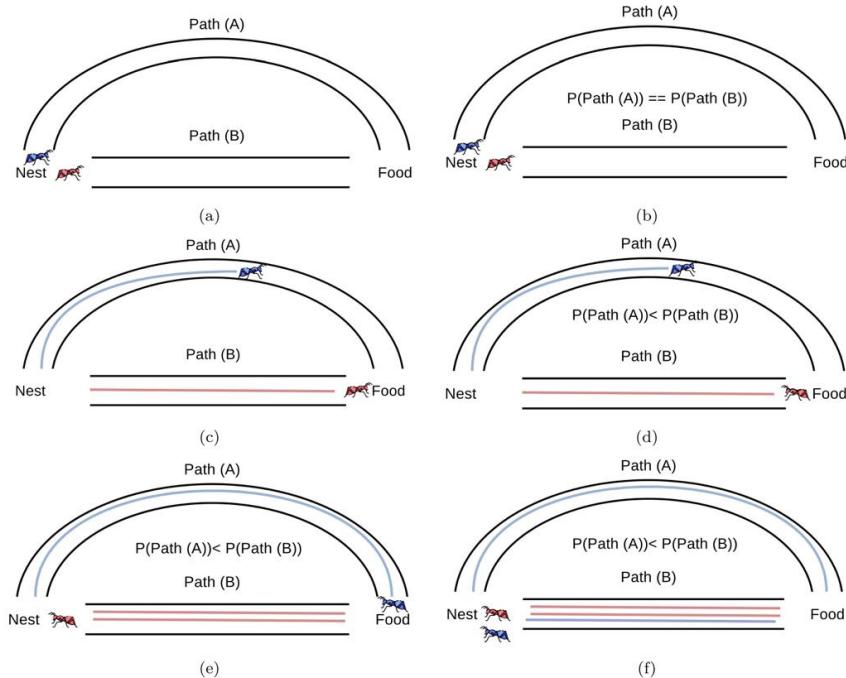


Figura 2.1: Esquema representativo do processo de *forrageamento*, salientando a concentração de feromonas depositadas. [3]

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 colónia 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.

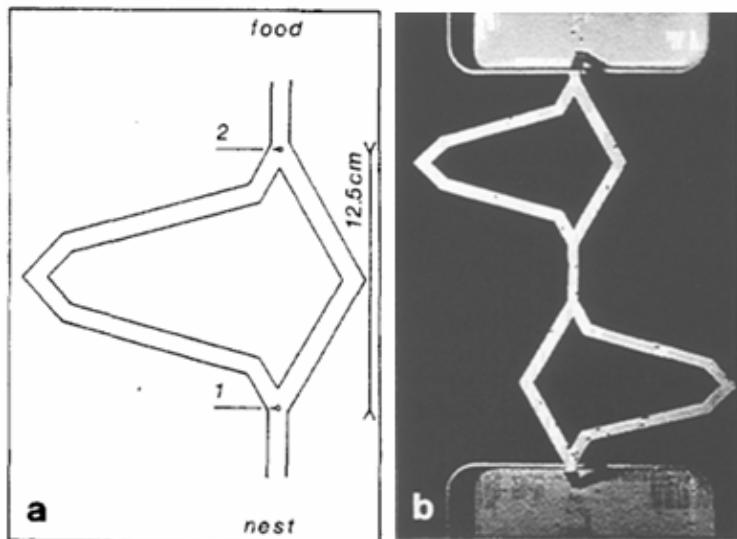


Figura 2.2: Labirintos usados por Goss et al. durante a experiência, sendo b uma variação mais complexa [4]

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 b. Observaram que quando a diferença entre os caminhos era pequena, a colónia 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 representando 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].

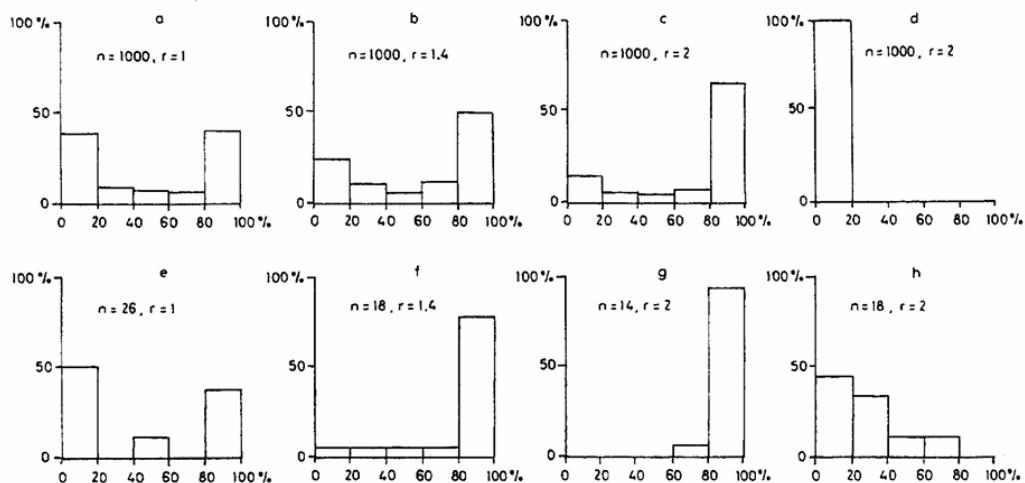


Figura 2.3: Resultados da experiência de Goss et al.,

Outro aspecto 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 *estigmergia*, 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**

"Ant Colony Optimization" Após ser referido em ??

**3.1 Princípios:**

**3.2 Métodos:**

### 3.3 Etapas- Eduardo para baixo!

Após a explicação anterior em ??, agora será descrito as principais etapas que compõem o funcionamento do algoritmo de Otimização de Colónia de Formigas (ACO — \*Ant Colony Optimization\*).

Este algoritmo é composto por um ciclo que altera 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, as suas principais etapas são as seguintes:

1. **Inicialização dos parâmetros e da feromona:** Define-se o número de formigas, a que se chama de numero de população, referente parâmetros de controlo ( $\alpha, \beta, \rho$ ), número máximo de iterações, e os valores iniciais do rastro de feromona  $\tau_{ij}$ . Normalmente, o feromônio é inicializado com um valor constante  $\tau_0$ , 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 [5].

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:  
-  $\tau_{ij}$  representa a intensidade do feromônio na ligação (i,j);  
-  $\eta_{ij}$  é a informação heurística (ex: inverso da distância);  
-  $\alpha$  e  $\beta$  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 suas soluções, avalia-se a qualidade de cada uma através da função objetivo do problema (ex: custo total do percurso). Identifica-se a melhor solução encontrada (solução ótima) na iteração e, 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[5].

O processo é descrito pela fórmula:

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

onde: -  $\rho$  é a taxa de evaporação;

-  $\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q}{L_k}$ , se a formiga  $k$  usou o arco  $(i,j)$ ; caso contrário,  $\Delta\tau_{ij}^k = 0$ ;

-  $Q$  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 Pseudocódigo Representativo

O funcionamento global do algoritmo pode ser sintetizado no seguinte pseudocódigo:

```
procedimento [melhor_local] = ColoniaFormigas(t_ij,t,populacao)
    // Definição das variáveis principais
    t_ij = 0           // nível de feromona para cada aresta
    melhor_local      // armazena a melhor localização encontrada
    t = 0             // posição (ou estado) inicial
    distancia         // distância percorrida para diferentes caminhos
    min_distancia = melhor_local // menor distância encontrada (melhor local)
    max_distancia = distancia // maior distância possível (inicialização)
    populacao = 50    // número de formigas
    distancia_fonte // distância ninho fonte
    // Análise do problema entre ninho e fonte
    analisar distancia_fonte entre ninho e 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) faça
        // Verifica se a posição atual é a melhor possível
        se distancia_fonte == min_distancia então
            t_ij != 0           // reforça trilha de feromona
            melhor_local = min_distancia
        senão
            t_ij = 0           // trilha de feromona evapora (reset)
        fim-se
        // passar para a próxima posição
        atualizar t, distancia_fonte
    fim-enquanto

    // Quando finalizar, retorna o melhor local encontrado
    retornar melhor_local
fim-procedimento
```

### 3.5 Diagramas ACO:

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

O diagrama em baixo na figura 3.1, explica de uma forma mais visual o explicado anteriormente nas secções ??, ??.

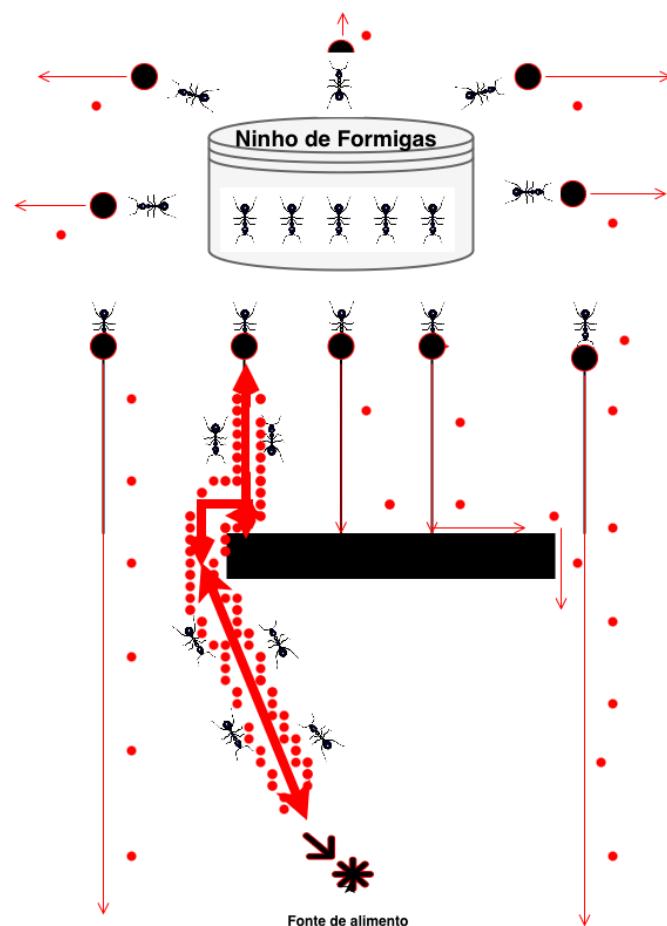


Figura 3.1: Diagrama que representa a topologia base presumida para o trabalho de busca de alimentos pelas formigas,[5]. [6].

**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 [5].

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 encontrar o caminho ótimo após uma alteração do percurso ou da fonte de alimento ou da inexistência de ambos![5]

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

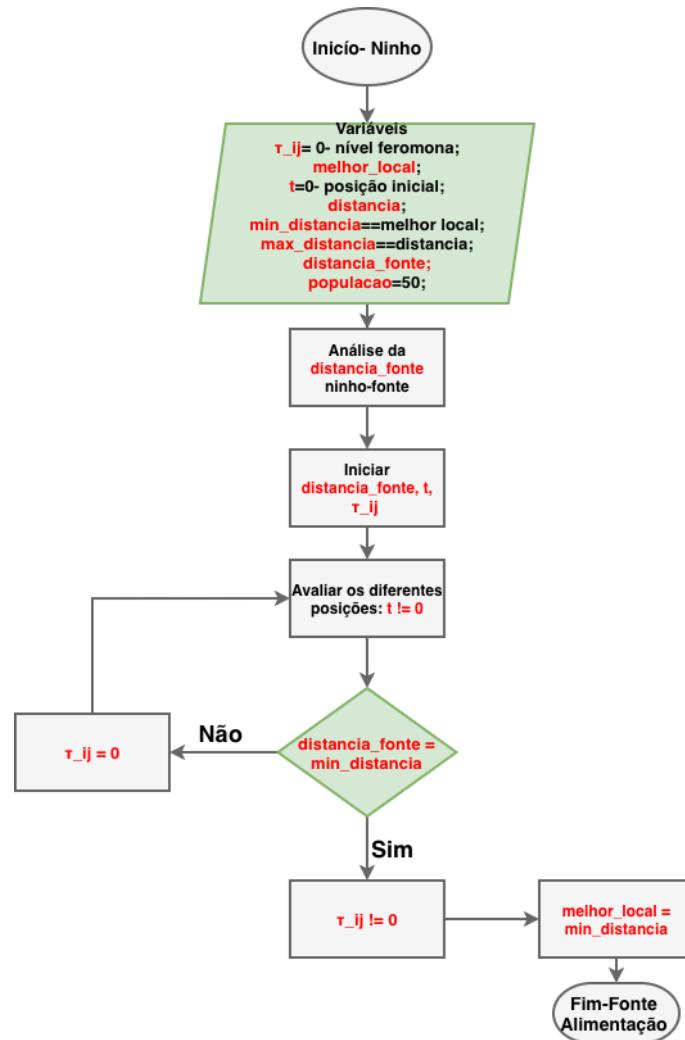


Figura 3.2: "Flowchart": descreve as etapas do processo do ciclo de alimentação das formigas![5] [6].

### **3.6 Casos de Uso**

O algoritmo ACO tem sido amplamente aplicado em problemas combinatórios complexos tal como o "Problema do Caixeiro-Viajante (TSP)"

Este casos demonstra a capacidade adaptativa e distribuída do ACO, no qual as soluções emergem da cooperação de múltiplos agentes simples, refletindo o comportamento coletivo das colónias naturais.

### **3.7 Otimização por Colônia de Formigas - Problema do Caixeiro Viajante**

[7]

### **3.8 Otimização por Colônia de Formigas - AS**



## **Capítulo 4**

# **Aplicações em Otimização**

### **4.1 Trabalho Futuro**



## Capítulo 5

# Conclusões



# 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 5]
- [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 5 e 6]
- [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 5, 7 e 8]
- [5] F. Breve, “Ant colony optimization.” <https://www.fabriciobreve.com/material/cin/CIN-11-ACO.pdf>, 2024. Apostila, UNESP. [Citado nas páginas 5, 12, 15 e 16]
- [6] “Diagramas draw.io colónia de formigas: flowcharts.” [Citado nas páginas 5, 15 e 16]
- [7] “Github - junqueiradeveduardo/col-nia-formigas-caixairo-viajante: Otimização por colônia de formigas (ant colony optimization - aco) aplicado ao problema do caixeiro viajante (traveling salesman problem - tsp)..” [Citado na página 17]