

8-Puzzle AI-Based Solution

André Luiz Rocha Cabral
Douglas Nicolás Silva Gomes
João Paulo Dias Estevão
Victor Souza Lima

Matéria: Inteligência Artificial
Professora: Cristiane Neri Nobre
Data de entrega: 04/05/2025

Link do executável: [Drive](#)
Link do código: [GitHub](#)

Neste trabalho foram implementados três diferentes métodos de busca/caminhamento para resolução do puzzle:

1. BFS (Breadth-First Search) ou Busca em largura:

Este método implementa a **busca em largura (BFS)** como estratégia para encontrar uma solução para o problema, explorando o espaço de estados em **níveis crescentes de profundidade**. A BFS garante encontrar a solução com o **menor número de passos** (caso os custos de transição entre estados sejam iguais), mas **nem sempre encontra a solução mais eficiente em termos de custo computacional ou tempo**.

Estruturas utilizadas

- **Fila (queue):** utilizada para armazenar os estados a serem explorados, obedecendo à ordem FIFO (primeiro a entrar, primeiro a sair). O estado inicial é o primeiro a ser inserido.
- **Dicionário de visitados (visited):** armazena os estados já visitados, mapeando cada estado para seu **estado predecessor**. Isso permite, ao final, reconstruir o caminho que levou até a solução.

Funcionamento do algoritmo

1. O algoritmo inicia com a inserção do estado inicial na fila e seu registro como visitado.
2. Em seguida, entra em um **laço de repetição (loop)** que continua enquanto houver estados na fila.
3. A cada iteração:
 - a. O estado mais antigo da fila é removido (respeitando a ordem da BFS).
 - b. Verifica-se se este estado é o **estado objetivo** — no caso, representado pela string "123456780".
 - c. Se for o estado desejado:
 - i. Calcula-se o tempo de execução.
 - ii. Reconstrói-se o caminho da solução usando os predecessores armazenados.
 - iii. Retorna-se esse caminho, o tempo gasto e o número de estados expandidos.
4. Se ainda **não** for o estado objetivo:
 - a. Os **vizinhos** (ou seja, os estados que podem ser alcançados a partir do estado atual com uma única ação) são gerados.
 - b. Para cada vizinho:

- i. Verifica-se se ainda **não foi visitado**.
- ii. Se não foi:
 1. Ele é inserido na fila.
 2. O contador de estados expandidos é incrementado.
 3. O estado é marcado como visitado, registrando seu predecessor.

Este processo se repete até que a fila esteja vazia (sem mais estados a explorar) ou até que a solução seja encontrada.

Ausência de heurística

Este método **não utiliza nenhuma heurística** para guiar a busca. Isso significa que a escolha de qual estado expandir a seguir é **puramente baseada na ordem de inserção na fila**, sem qualquer avaliação da “proximidade” de um estado em relação ao objetivo.

2. GBFS (Greedy Best-First Search) ou Busca Gulosa

Este método implementa a **busca gulosa de melhor primeiro**, uma estratégia que utiliza exclusivamente uma **função heurística** para decidir qual estado explorar a seguir. Ela prioriza os estados que **parecem mais próximos da solução**, mas **ignora o custo real acumulado** do caminho até aquele ponto.

Estruturas utilizadas

- **Fila de prioridade (open_set):** contém os estados a serem explorados, ordenados pela sua heurística. O estado com menor valor heurístico é o primeiro a ser expandido.
- **Conjunto de visitados (visited_set):** garante que cada estado seja expandido no máximo uma vez, evitando ciclos ou repetições.
- **Dicionário de predecessores (predecessors):** armazena para cada estado o seu antecessor, necessário para reconstruir o caminho até a solução.

Funcionamento do algoritmo

1. O estado inicial é adicionado à fila de prioridade com base no seu valor heurístico.
2. Marca-se o estado inicial como visitado e sem predecessor.
3. O algoritmo entra em um **laço de repetição que continua enquanto houver estados na fila**:
 - a. Remove o estado com **menor heurística**.
 - b. Verifica se é o **estado objetivo** ("123456780").
 - i. Se for:
 1. Calcula o tempo total.
 2. Reconstrói o caminho usando os predecessores.
 3. Retorna o caminho, o tempo e o número de nós expandidos.

4. Caso ainda não seja o objetivo:
 - a. Gera os **vizinhos** do estado atual.
 - b. Para cada vizinho não visitado:
 - i. Incrementa o contador de nós expandidos.
 - ii. Adiciona o vizinho à fila com base na sua heurística.
 - iii. Marca-o como visitado.
 - iv. Registra seu predecessor.

Caso a fila se esvazie sem encontrar a solução, a função retorna um caminho vazio.

Heurística utilizada: Distância de Manhattan

A heurística empregada neste algoritmo é a **Distância de Manhattan**, que calcula para cada peça (exceto o espaço vazio \emptyset) a soma das distâncias verticais e horizontais até sua posição correta no estado objetivo. A soma dessas distâncias para todas as peças compõe o valor heurístico total do estado.

Essa abordagem fornece uma **estimativa admissível** e eficaz da distância até a solução, pois representa o **mínimo número de movimentos necessários** para cada peça alcançar sua posição final, sem considerar bloqueios.

Vantagem: A heurística de Manhattan é simples, rápida de calcular e geralmente conduz a uma busca eficiente e informada.

Limitação: Como a busca gulosa ignora o custo do caminho já percorrido, ela **não garante encontrar a solução ótima**, mesmo com uma boa heurística.

3. A* (A-Star)

O algoritmo **A*** é uma das estratégias de busca mais eficazes para encontrar o **caminho ótimo** em um espaço de estados, como o 8-puzzle. Ele combina duas ideias principais:

- **Custo real do caminho percorrido** até o estado atual ($g(n)$).
- **Estimativa do custo restante até o objetivo**, baseada em uma **função heurística** ($h(n)$).

O A* prioriza os estados com menor valor de $f(n) = g(n) + h(n)$.

Estruturas utilizadas

- **Fila de prioridade (open_set):** armazena os estados a serem explorados, ordenados pelo valor $f(n)$.
- **Dicionário g_score:** armazena o custo real acumulado para chegar a cada estado.
- **Conjunto closed_set:** guarda estados que já foram completamente explorados.

- **Dicionário predecessores:** armazena o predecessor de cada estado, necessário para reconstruir o caminho da solução.

Funcionamento do algoritmo

1. O tempo de execução é iniciado e o custo g do estado inicial é registrado como zero.
2. O estado inicial é adicionado à fila de prioridade, com $f = g + h$, onde h é o valor da heurística selecionada.
3. A heurística a ser utilizada é determinada por uma **string dinâmica**, como "heuristic" ou "heuristic2":
 - a. Se o atributo especificado existe, ele será usado.
 - b. Caso contrário, assume-se "heuristic" como padrão.
4. O algoritmo entra em um **loop principal**, que continua enquanto houver estados na fila:
 - a. Remove o estado com menor valor de f .
 - b. Se já foi explorado (closed_set), ignora.
 - c. Se é o estado objetivo ("123456780"), termina a busca e reconstrói o caminho.
5. Para cada vizinho do estado atual:
 - a. Se ainda não foi explorado ou se um caminho melhor foi encontrado:
 - i. Atualiza g_score , predecessores e recalcula $f = g + h$.
 - ii. Adiciona o vizinho à fila de prioridade.

Se a fila esvaziar sem atingir o objetivo, retorna um caminho vazio.

Heurísticas utilizadas

Este algoritmo foi configurado para aceitar **múltiplas heurísticas dinamicamente**. Dois métodos heurísticos estão disponíveis:

1. Distância de Manhattan (heuristic)

Calcula a soma das distâncias verticais e horizontais entre a posição atual e a posição objetivo de cada peça, ignorando o espaço vazio.

- Admissível e consistente
- Rápida de calcular
- Pode subestimar situações onde há bloqueios entre peças

2. Manhattan com penalidade por conflitos lineares (heuristic2)

Amplia a heurística de Manhattan, penalizando casos em que duas peças estão na mesma linha ou coluna e **impedem uma à outra de chegar à posição correta**, somando +2 por conflito.

- Ainda admissível
- Mais precisa que Manhattan pura
- Exige mais processamento (duplos for em linhas e colunas)

Análise de Resultados

O 8-puzzle é um jogo de tabuleiro 3x3 com oito peças e um espaço vazio, cujo objetivo é atingir uma configuração final por meio de movimentos válidos. Embora existam $9!$ (362.880) possíveis configurações, apenas metade delas são solucionáveis, formando um componente conexo próprio com 181.440 estados. O diâmetro (a maior distância mínima entre quaisquer dois estados solucionáveis) é 31, ou seja, **qualquer configuração solucionável pode ser resolvida em no máximo 31 movimentos (ótima)**. Esse valor foi determinado por análise computacional exaustiva do espaço de estados.

Estado Inicial para o Pior Caso:

[8, 6, 7]

[2, 5, 4]

[3, 0, 1]

Para a mesma configuração do jogo, o algoritmo **A*** (manhattan penalty) foi o que melhor desenvolveu o problema, pois encontrou a solução com o **menor número de movimentos (31)**, igual à Busca em Largura, mas com **menor número de estados expandidos** e **tempo de execução significativamente inferior**.

Tabela Comparativa para o Pior Caso:

Critério	Busca em Largura	Busca Gulosa	A* (manhattan)	A* (penalty)
Caminho (nº de movimentos)	31	45	31	31
Tempo de execução (s)	18,5013s	0,2823s	10,2674s	8,2583s
Estados expandidos	181.440	4.363	146.945	127.023
Solução ótima?	Sim	Não	Sim	Sim

Conclusões:

- **Busca em Largura** é completa e ótima, encontrando a solução mínima (31 movimentos), mas tem **alto custo computacional**, com o **maior número de estados expandidos e maior tempo de execução** entre os três métodos.
- **Busca Gulosa** foi a mais rápida e eficiente em termos de tempo e nós expandidos, mas **sacrificou a qualidade da solução**, encontrando um caminho com mais movimentos (45), o que pode ser ineficiente dependendo do contexto do problema.

- **A*** obteve um **melhor equilíbrio entre custo e qualidade da solução**: manteve o caminho mínimo (31 movimentos) como a Busca em Largura, mas com **menos estados expandidos** e **tempo de execução menor**, o que o torna mais eficiente que os anteriores.
- **A* (penalty)** apresentou um desempenho ainda mais eficiente que a versão tradicional com Manhattan puro. Ele manteve o caminho (31 movimentos), mas com **menor número de estados expandidos (101.306)** e **tempo de execução reduzido (8,2583s)**. Isso demonstra que a penalidade aplicada à heurística contribuiu para guiar a busca de forma mais informada, resultando em **melhor aproveitamento computacional sem comprometer a qualidade da solução**, tornando-o o método **mais eficiente no geral**.