

8-Puzzle AI-Based Solution

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

Matéria: Inteligência Artificial
Professora: Cristiane Neri Nobre
Data de entrega: 20/06/2025

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

A Interface do Usuário:

A interface combina **usabilidade** (botões intuitivos, feedback visual) e **rigor técnico** (validações, threads para execução assíncrona). As funções de memorização/carregamento ampliam a flexibilidade, permitindo ao usuário testar estratégias em estados específicos.

Funcionalidades Principais

1. Seleção de Algoritmo

- Busca em Largura (BFS):** Garante solução ótima, mas com maior tempo/memória.
- Busca Gulosa (Greedy):** Rápida, mas não garante solução ótima.
- A*:**
 - Manhattan:* Balanceado entre custo e qualidade.
 - Manhattan + Penalidades:* Mais preciso, com penalização de conflitos.
 - Distância Euclidiana:* Precisão geométrica, porém mais lento.

2. Controle do Tabuleiro

- Embaralhar:** Gera um estado inicial aleatório **solucionável**.
- Resolver:** Executa o algoritmo selecionado e exibe o caminho da solução.
- Reiniciar:** Retorna ao estado objetivo padrão (`[[1, 2, 3], [4, 5, 6], [7, 8, 0]]`).

3. Memorizar e Carregar Tabuleiro

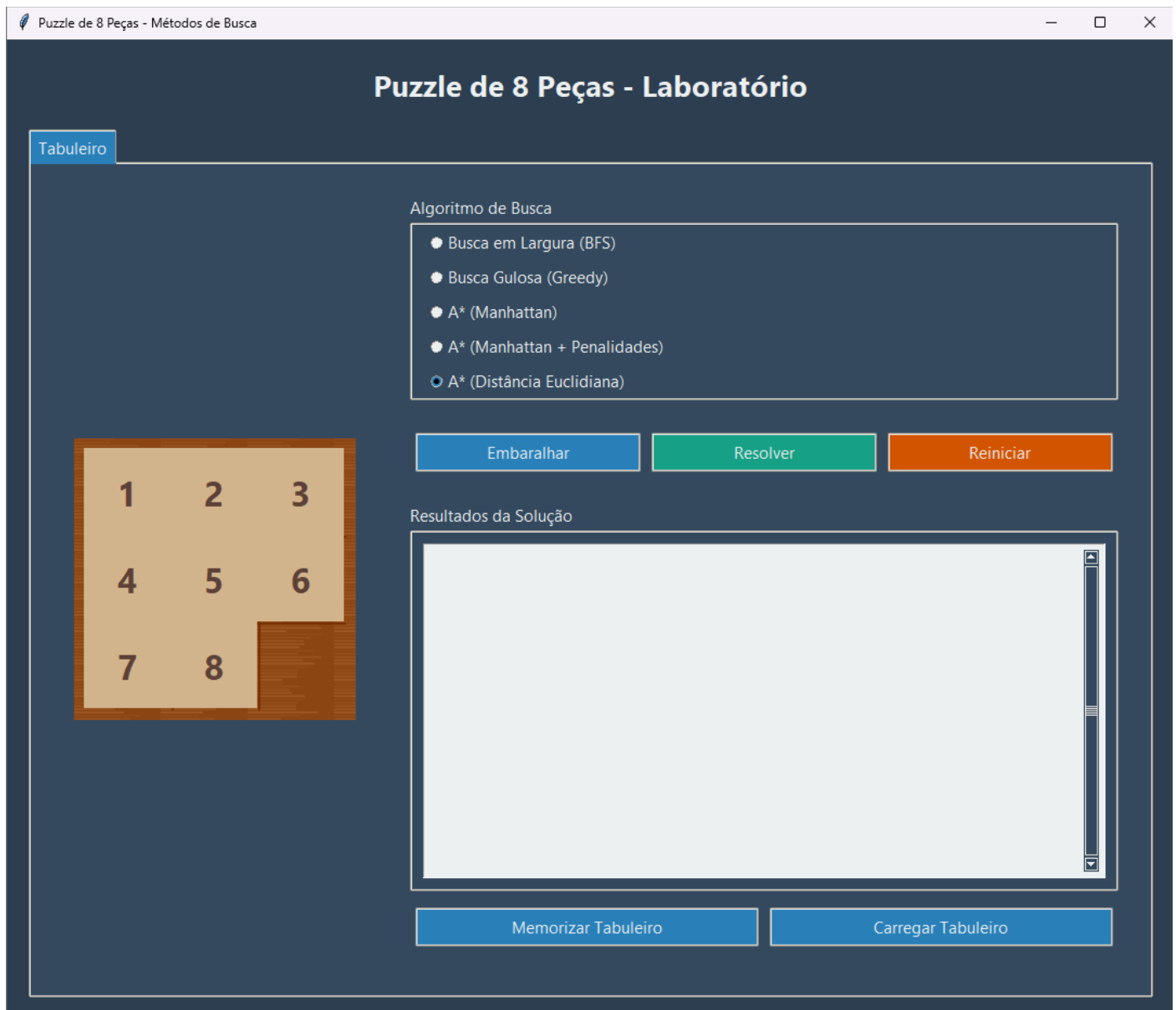
- Memorizar Tabuleiro:** Salva o estado atual em memória para uso futuro.
 - Uso interno:* Armazena a matriz numpy do estado em `self.saved_state`.
- Carregar Tabuleiro:** Restaura o último estado memorizado.
 - Validações:*
 - Exibe erro se nenhum tabuleiro foi memorizado.
 - Bloqueia operação durante a execução de algoritmos (`is_solving`).

Fluxo de Uso

- O usuário seleciona um algoritmo (ex: A com Manhattan*).
- Clica em **Embaralhar** para gerar um novo desafio ou **Memorizar** para salvar um estado personalizado, possibilitando testar o mesmo tabuleiro com outros algoritmos clicando em **Carregar Tabuleiro**.
- Ao clicar em **Resolver**:
 - O algoritmo é executado em uma *thread* separada para não travar a interface.

- b. O caminho da solução é animado passo a passo no tabuleiro.
- c. Métricas (tempo, nós expandidos) são exibidas em **Resultados da Solução**.

Imagem da interface:



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 0) 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. Inicialização

- a. O tempo de execução é iniciado e o custo g do estado inicial é registrado como zero.
- b. O estado inicial é adicionado à fila de prioridade (open_set), com $f = g + h$, onde h é o valor da heurística selecionada.

2. Seleção Dinâmica da Heurística

A heurística é determinada por um parâmetro string que pode ser:

- "manhattan" → Distância de Manhattan (heuristic).
- "manhattanPenalty" → Manhattan com penalidades por conflitos lineares (heuristic2).
- "euclidean" → Distância Euclidiana (heuristic_euclidean).
- Caso o parâmetro não seja reconhecido, usa-se Manhattan como padrão.

3. Loop Principal

Enquanto houver estados na fila de prioridade:

- Remove** o estado com menor valor de f.
- Se o estado já foi explorado (closed_set), é ignorado.
- Se é o estado objetivo ("123456780"):
 - Calcula o tempo total.
 - Reconstrói o caminho ótimo usando predecessores.
 - Retorna: caminho, tempo de execução e nós expandidos.

4. Expansão de Vizinhos

Para cada vizinho gerado a partir do estado atual:

- Se o vizinho **não foi explorado** ou se um **caminho mais curto** foi encontrado:
 - Atualiza g_score (custo real acumulado).
 - Recalcula $f = g + h$ usando a heurística selecionada.
 - Armazena o predecessor e insere o vizinho na fila de prioridade.

5. Finalização

Se a fila esvaziar sem encontrar 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 em que 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)

3. Heurística Euclidiana (*heuristic_euclidean*)

Esta heurística calcula a **distância geométrica real** (em linha reta) entre cada peça e sua posição no estado objetivo, utilizando a fórmula clássica da geometria analítica:

$$\text{distância} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Onde (x_1, y_1) é a posição atual da peça e (x_2, y_2) é sua posição no objetivo. O valor heurístico total é a **soma das distâncias de todas as peças** (exceto o espaço vazio).

Comparação com Outras Heurísticas

Critério	Manhattan	Manhattan + Penalidades	Euclidiana
Precisão	Boa	Excelente	Moderada
Custo Computacional	Baixo	Médio	Médio-Alto

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)	A* (Euclidean)

Caminho (nº de movimentos)	31	47	31	31	31
Tempo de execução (s)	23.6674s	0.0127s	2.6927s	1.6420s	7.8777s
Estados expandidos	181440	161	29757	18578	79127
Solução ótima?	Sim	Não	Sim	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 (47), 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** (18578) e **tempo de execução reduzido** (0,8419s). 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**.
- **A* (Euclidiana)** mostrou resultados interessantes, mantendo a solução ótima (31 movimentos) em todos os testes. Embora tenha um tempo de execução ligeiramente maior (1,521s) e mais nós expandidos (30,105) que o Manhattan com penalidades, sua abordagem geométrica pode ser vantajosa em problemas onde a distância real entre as peças é mais relevante que o número de movimentos.