FURB
UNIVERSIDADE DE BLUMENAU

Inteligência Artificial

Busca Heurística

Prof. Drª. Andreza Sartori
asartori@furb.br

Documentos Consultados/Recomendados

- KLEIN, Dan; ABBEEL, Pieter. **Intro to AI**. UC Berkeley. Disponível em: http://ai.berkeley.edu.

- LIMA, Edirlei Soares. **Inteligência Artificial.** PUC-Rio, 2015.

- RUSSELL, Stuart J. (Stuart Jonathan); NORVIG, Peter. **Inteligência artificial.** Rio de Janeiro: Campus, 2013. 1021 p, il.

- VIERIU, Radu-Laurenţiu. **Artificial Intelligence.** Università degli Studi di Trento, 2016.

Conteúdo Programático

Unidade 1: Fundamentos de Inteligência Artificial

Unidade 2: Busca

Unidade 3: Sistemas Baseados em Conhecimento

Unidade 4: Redes Neurais Artificiais

Unidade 5: Aplicações de Inteligência Artificial

Conteúdo Programático

Unidade 1: Fundamentos de Inteligência Artificial

Unidade 2: Busca

Unidade 3: Sistemas Baseados em Conhecimento

Unidade 4: Redes Neurais Artificiais

Unidade 5: Aplicações de Inteligência Artificial

Conteúdo Programático

Unidade 1: Fundamentos de Inteligência Artificial

Unidade 2: Busca

2.1. Resolução de Problemas por meio de busca

2.2. Busca Cega ou Exaustiva

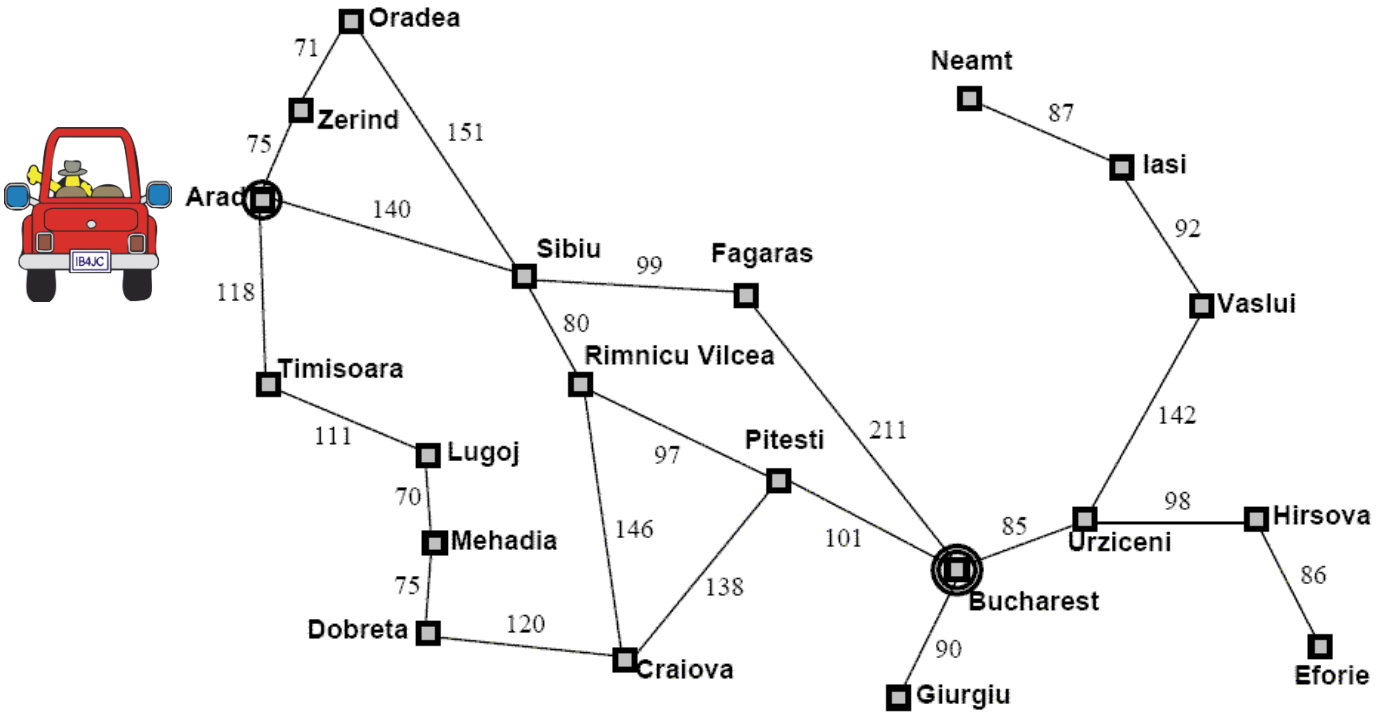
2.3. Busca Heurística

2.4. Busca Competitiva

2.5. Busca Local

2.5.1 Algoritmos Genéticos (AG)

Relembrando: Problema de Busca



Relembrando: Definição de um Problema

- **Estado Inicial:** Estado inicial do agente.
  - Ex: Em(Arad)
- **Estado Objetivo (Estado Final):** Estado buscado pelo agente.
  - Ex: Em(Bucharest)
- **Ações Possíveis (Função Sucessor):** Conjunto de ações que o agente pode executar.
  - Ex: Ir(Cidade, PróximaCidade)
- **Espaço de Estados:** Conjunto de estados que podem ser atingidos a partir do estado inicial.
  - Ex: Mapa da Romênia.
- **Custo de Caminho:** Custo numérico de cada caminho.
  - Ex: Distância em KM entre as cidades.

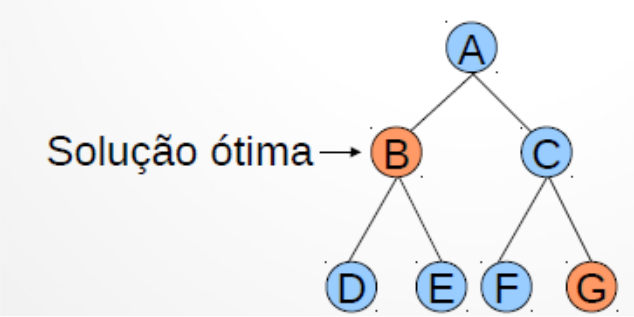
Relembrando: Solução para um Problema

- A **solução** para um problema é um caminho desde o estado inicial até o estado objetivo (estado final).

- A qualidade da solução é medida pela função de custo de caminho, isto é, a **solução que tiver menor custo** de caminho entre todas as soluções.

Medida de Desempenho do Algoritmo de Busca

- Uma estratégia de busca é definida pela escolha da ordem da expansão de nós
- Estratégias são avaliadas de acordo com os seguintes critérios:
  - **Completeza:** o algoritmo sempre encontra a solução se ela existe?
  - **Otimização (Custo de Caminho):** a estratégia encontra a solução ótima? - Qualidade da solução
    - Para passos com igual custo, é aquela em menor profundidade na árvore de busca



Medida de Desempenho do Algoritmo de Busca

- Uma estratégia de busca é definida pela escolha da ordem da expansão de nós
- Estratégias são avaliadas de acordo com os seguintes critérios:
  - **Complexidade De Tempo (Custo de Busca):** quanto tempo ele leva para encontrar a solução? - Número de nós gerados
  - **Complexidade De Espaço (Custo de Busca):** quanta memória é necessária para executar a busca? - Número máximo de nós na memória.

Custo Total

Custo do Caminho + Custo de Busca.

Métodos de Busca

- **Busca Cega ou Exaustiva:**
  - Não tem nenhuma informação adicional sobre os estados, isto é, não sabe qual o melhor nó da fronteira a ser expandido. Apenas distingue o estado objetivo dos não objetivos.

- **Busca Heurística:**
  - Ou busca com informação, estima qual o melhor nó da fronteira a ser expandido baseado em funções heurísticas.

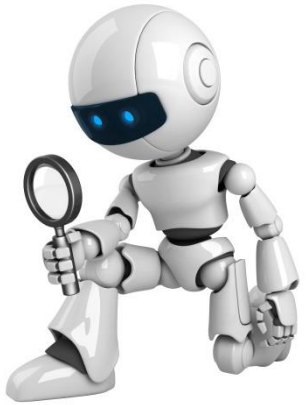
- **Busca Competitiva:**
  - Considera que há oponentes hostis e imprevisíveis. Ex: Jogos

- **Busca Local:**
  - Operam em um único estado e movem-se para a vizinhança deste estado.
  - **Algorítmos Genéticos:**
    - Variante de Busca Local em que é mantida uma grande população de estados. Novos estados são gerados por mutação e por crossover, que combina pares de estados da população.

Algoritmos de Busca Cega ou Exaustiva

As estratégias de busca sem informação se distinguem pela ordem em que os nós são expandidos.

1. Busca em extensão/largura;
2. Busca em profundidade;
3. Busca por aprofundamento iterativo;
4. Busca de custo uniforme.



Métodos de Busca

- **Busca Cega ou Exaustiva:**
  - Não tem nenhuma informação adicional sobre os estados, isto é, não sabe qual o melhor nó da fronteira a ser expandido. Apenas distingue o estado objetivo dos não objetivos.
- **Busca Heurística:**
  - Ou busca com informação, estima qual o melhor nó da fronteira a ser expandido baseado em funções heurísticas.
- **Busca Competitiva:**
  - Considera que há oponentes hostis e imprevisíveis. Ex: Jogos
- **Busca Local:**
  - Operam em um único estado e movem-se para a vizinhança deste estado.
  - **Algorítmos Genéticos:**
    - Variante de Busca Local em que é mantida uma grande população de estados. Novos estados são gerados por mutação e por crossover, que combina pares de estados da população.

Busca Heurística

- Busca pela melhor escolha
  - Escolhe o nó que parece ser o melhor de acordo com a função de avaliação.
    - Utiliza uma função de avaliação para cada nó.
    - Expande o nó que tem a função de avaliação mais baixa.
    - Dependendo da função de avaliação, a estratégia de busca muda.
- Utiliza conhecimento específico sobre o problema para encontrar soluções.
  - Leva em conta o objetivo para decidir qual caminho escolher.

Busca Cega X Busca Heurística

- Como encontrar um barco perdido?
  - **Busca Cega** -> Procura no oceano inteiro.
  - **Busca Heurística** -> Procura utilizando informações relativas ao problema.
    - Exemplo: correntes marítimas, vento, etc.

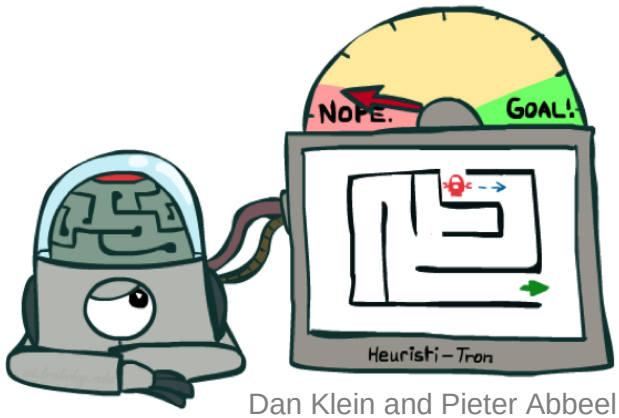
Uma *heurística* é usada para guiar o processo de busca.

Fonte: LIMA, Edirlei Soares. **Inteligência Artificial.** PUC-Rio, 2015.

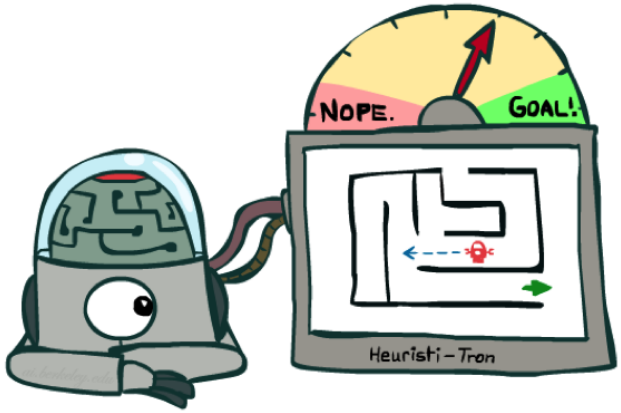
Função Heurística - h(n)

- h(n) = Custo estimado do caminho mais econômico do estado atual (n) até o estado objetivo.
  - Retorna um número de um estado;
  - Mostra se está ou não próximo de um objetivo.

- Cada problema **exige** uma função heurística diferente.



Dan Klein and Pieter Abbeel
ai.berkeley.edu



Dan Klein and Pieter Abbeel
ai.berkeley.edu

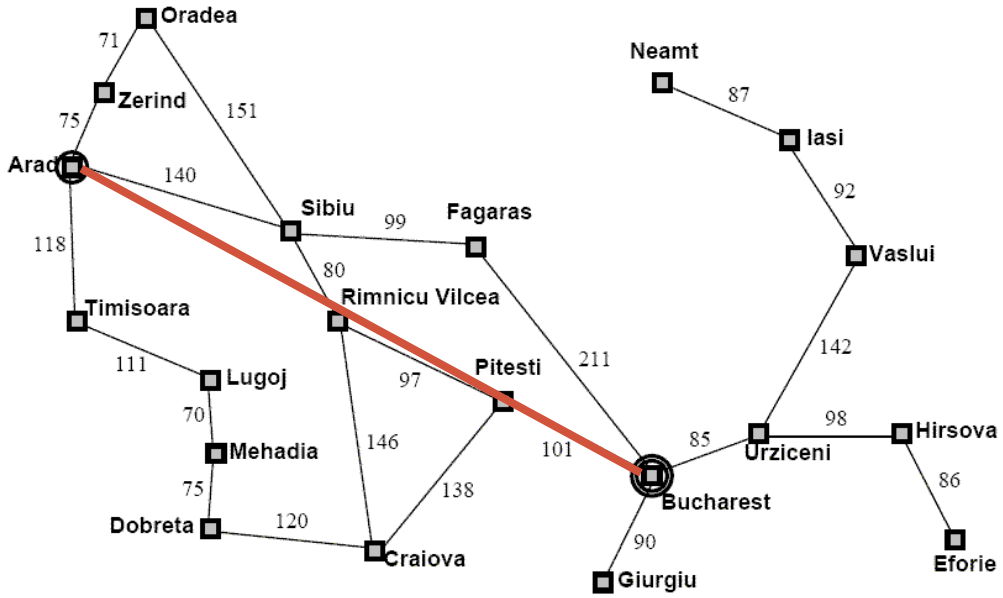
Busca Heurística

- Algoritmos de Busca Heurística
  - Busca Gulosa

  - A*

Busca Gulosa

- Expande os nós que estão mais próximos do objetivo, na suposição de que a busca provavelmente encontre uma solução rápida.
  - Localização de rotas da Romênia: utiliza-se a heurística de distância em linha reta conectando os dois pontos.



Busca Gulosa

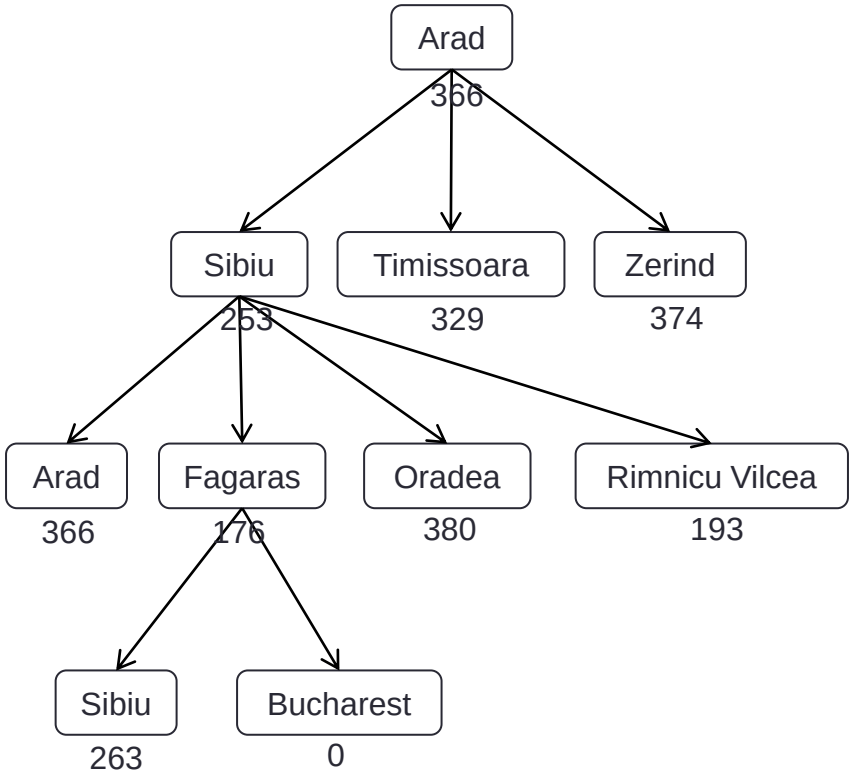
- A implementação do algoritmo é semelhante a busca em profundidade, porém **utiliza uma função heurística** para decidir qual nó deve ser expandido.

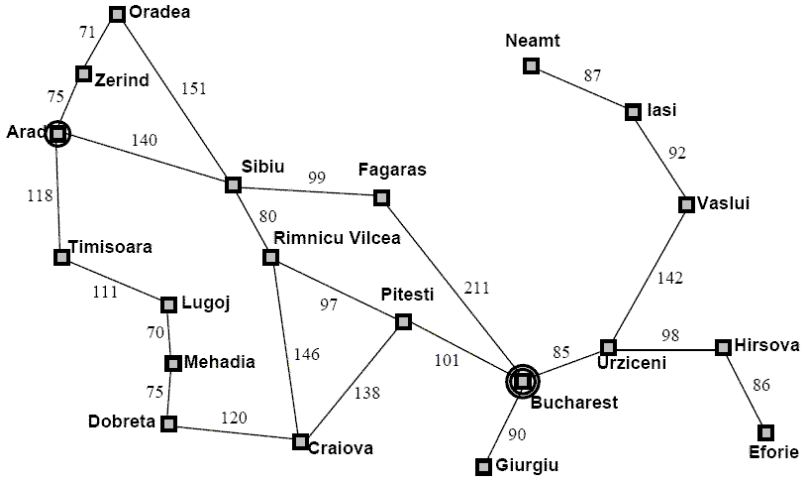
- Avalia os nós usando apenas a função heurística:

$$f(n) = h(n)$$

Dan Klein and Pieter Abbeel
ai.berkeley.edu

Busca Gulosa (Edirlei Soares de Lima - PUC)



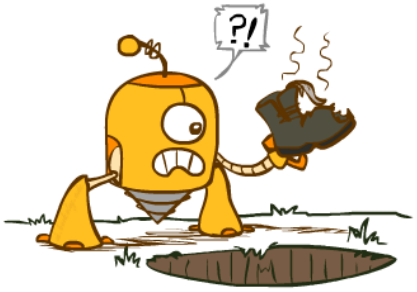


Arad	366	Mehadia	241
Bucharest	0	Neamt	234
Craiova	160	Oradea	380
Drobeta	242	Pitesti	100
Eforie	161	Rimnicu Vilcea	193
Fagaras	176	Sibiu	253
Giurgiu	77	Timisoara	329
Iasi	226	Vaslui	199
Lugoj	244	Zerind	374
Hirsova	151	Urziceni	80

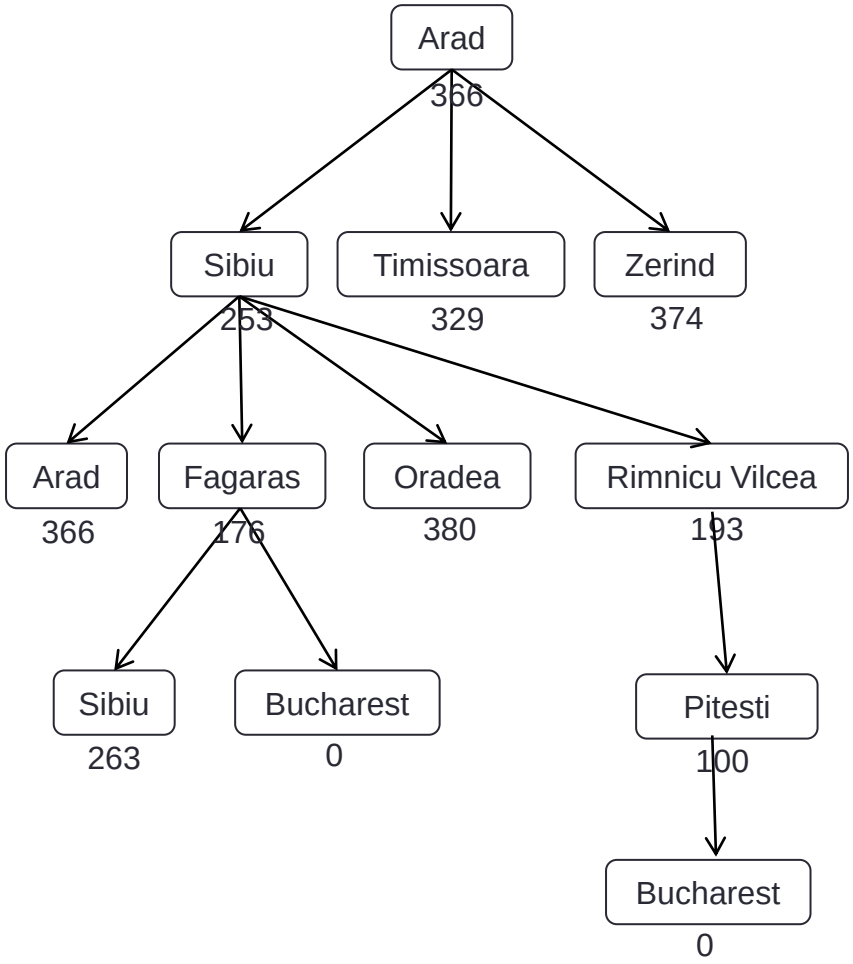
Função Heurística (h):
Distância em linha reta

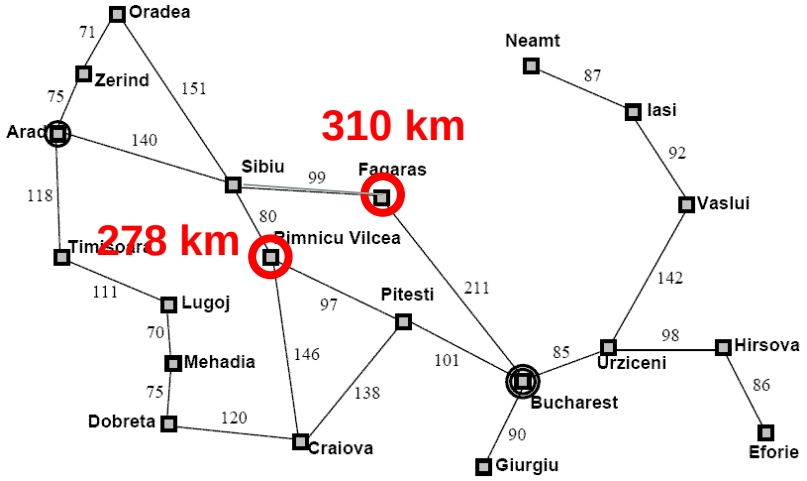
Busca Gulosa

- **Não é ótima:**
  - No exemplo, escolhe o caminho que é mais econômico à primeira vista, via Fagaras.
  - Porém, existe um caminho mais curto via Rimnicu Vilcea.



Busca Gulosa (Edirlei Soares de Lima - PUC)



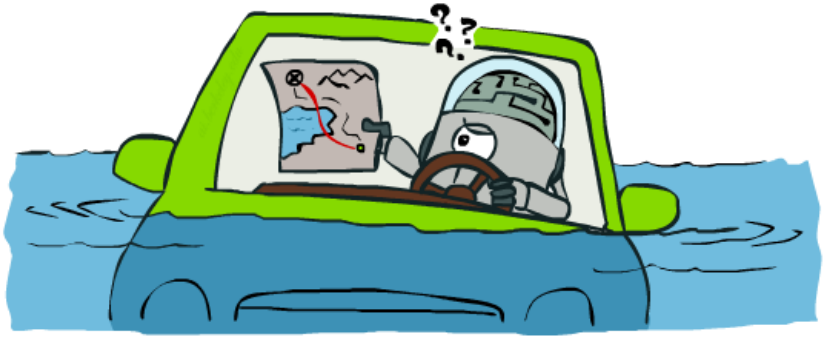


Arad	366	Mehadia	241
Bucharest	0	Neamt	234
Craiova	160	Oradea	380
Drobeta	242	Pitesti	100
Eforie	161	Rimnicu Vilcea	193
Fagaras	176	Sibiu	253
Giurgiu	77	Timisoara	329
Iasi	226	Vaslui	199
Lugoj	244	Zerind	374
Hirsova	151	Urziceni	80

Busca Gulosa

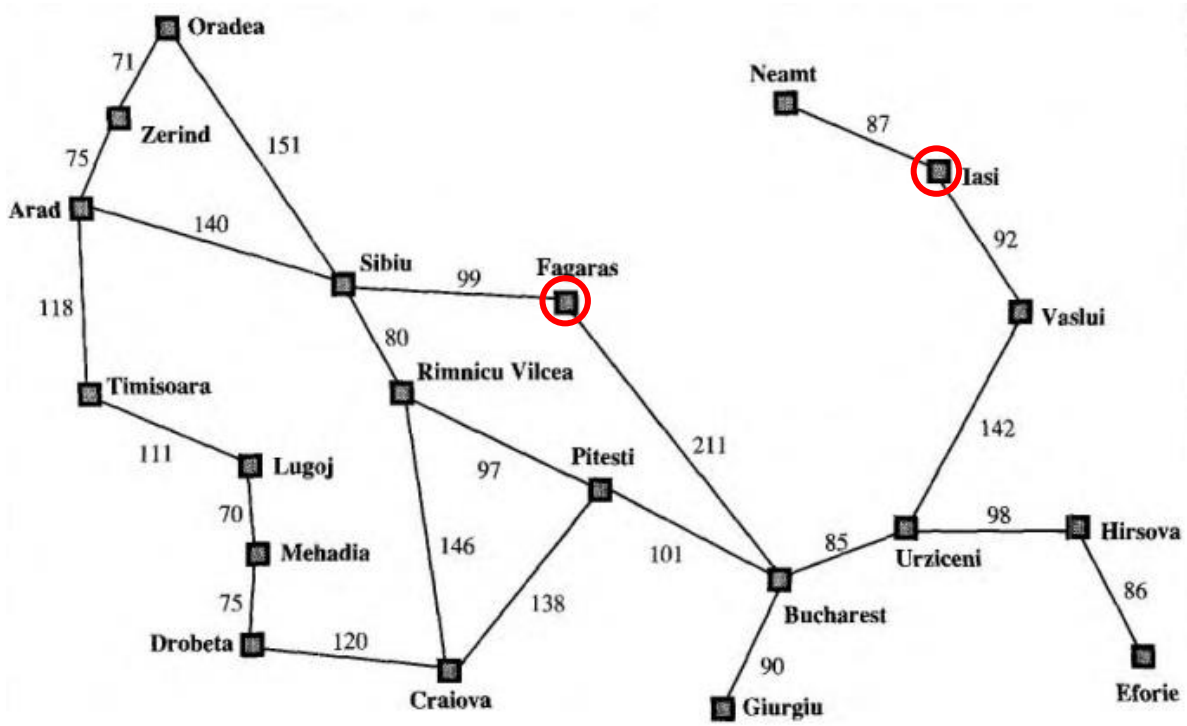
- **Não é ótima:**
  - No exemplo, escolhe o caminho que é mais econômico à primeira vista, via Fagaras.
  - Porém, existe um caminho mais curto via Rimnicu Vilcea.

- **Não é completa:**
  - Pode entrar em loop se não detectar a expansão de estados repetidos.
  - Pode entrar em um caminho infinito e nunca retornar para experimentar outras possibilidades.



Busca Gulosa

- Minimizar h(n) é uma ação suscetível a falsos inícios.
  - Ex. Ir de Iasi a Fagaras
    - Heurística sugerirá ir a Neamt, que é um beco sem saída.
    - Provoca a extensão de nós desnecessários.



Busca Heurística

- Algoritmos de Busca Heurística
  - Busca Gulosa

  - **A***

Busca Heurística

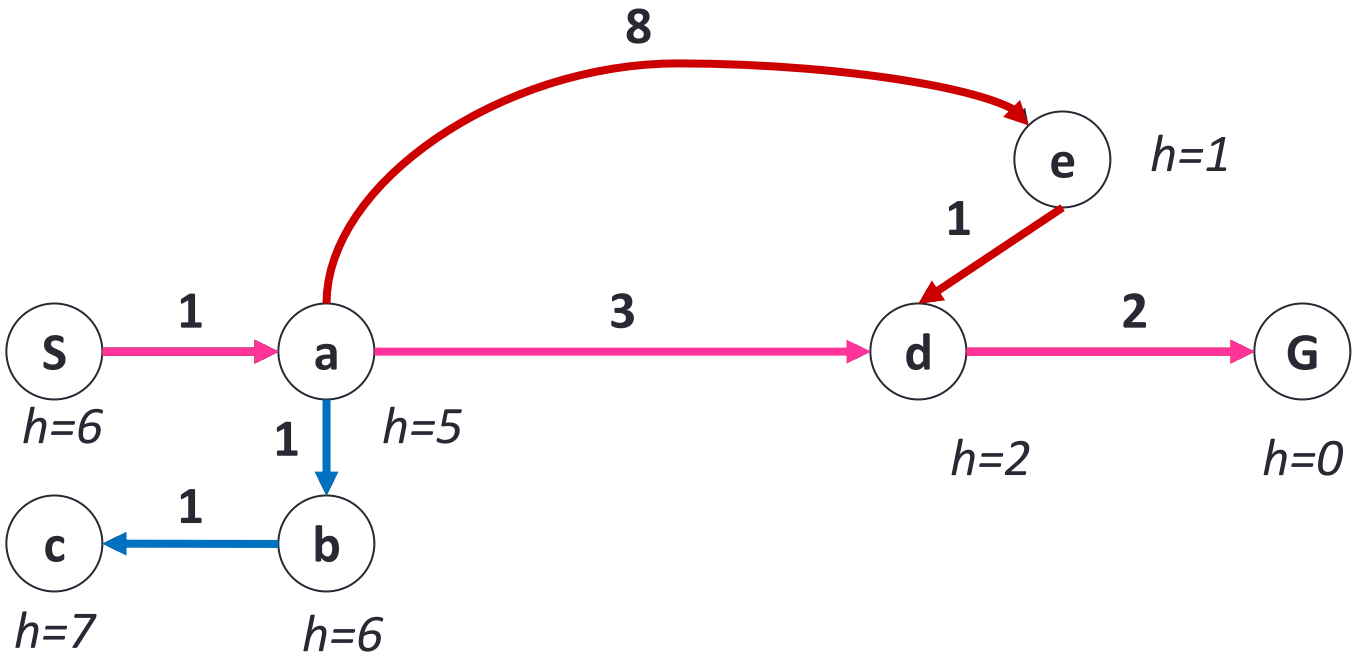
Busca de Custo Uniforme

Busca Gulosa

Busca A*

Busca A*

- **Busca de custo uniforme:** expande por custo de caminho ➔ **g(n)**
- **Busca Gulosa:** expande por proximidade do objetivo ➔ **h(n)**



- **Busca A*:** expande para o nó com menor valor de **g(n) + h(n)**

Busca A*

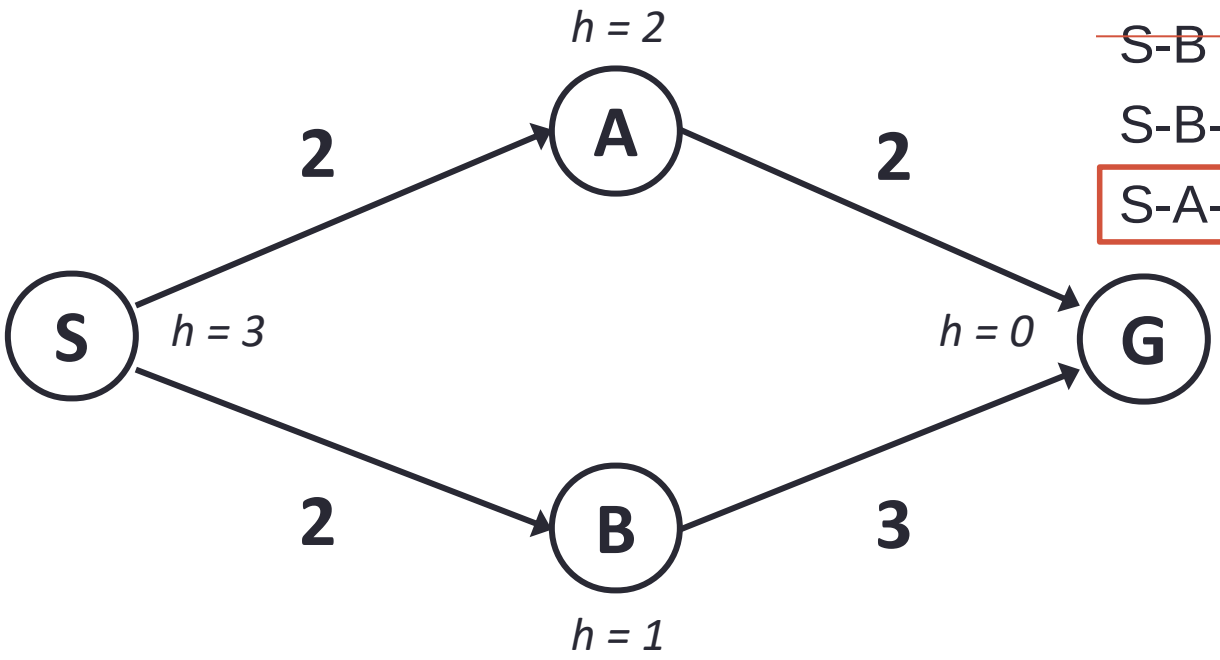
- Combina o **custo do caminho *g*(*n*)** com o **valor da heurística *h*(*n*)**
- *g*(*n*) = custo do caminho do nó inicial até o nó *n*
- *h*(*n*) = valor da função heurística do nó *n* até um nó objetivo

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

- Considera os nós que não foram expandidos ainda e expande o que tem o menor custo **f(n)**

Busca A*

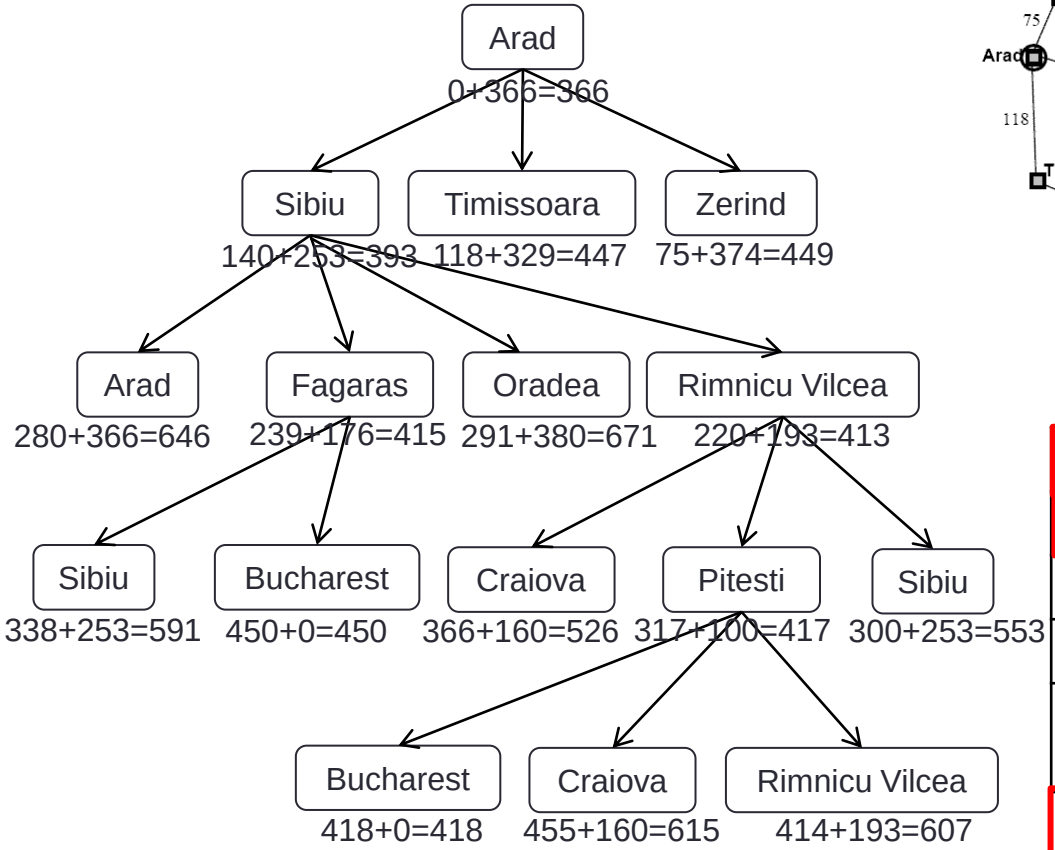
- Quando A* deve parar?

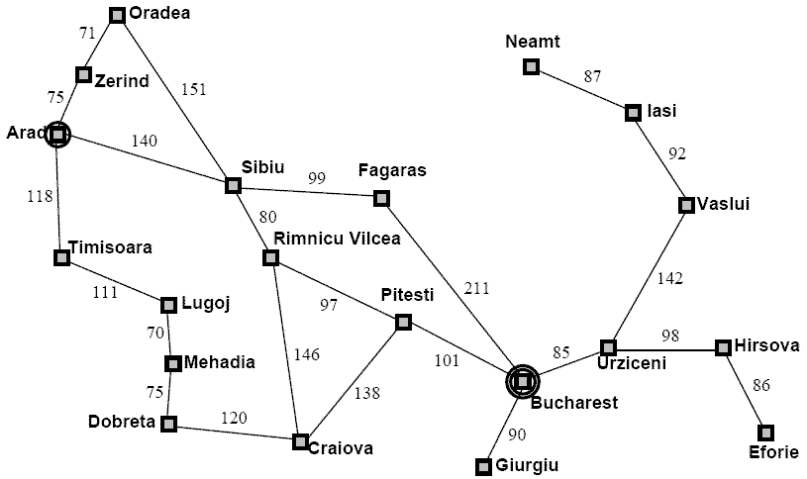


	g	h =	f
~~S~~	~~0~~	~~3~~	~~3~~
S-A	2	2	4
~~S-B~~	~~2~~	~~1~~	~~3~~
S-B-G	5	0	5
S-A-G	4	0	4

- O algoritmo expande todos os nós com f(n) <= C* (Custo da solução ótima).
  - Um algoritmo que não expande todos os nós com f(n)<C* corre o risco de omitir a solução ótima.

Busca A* (Edirlei Soares de Lima - PUC)





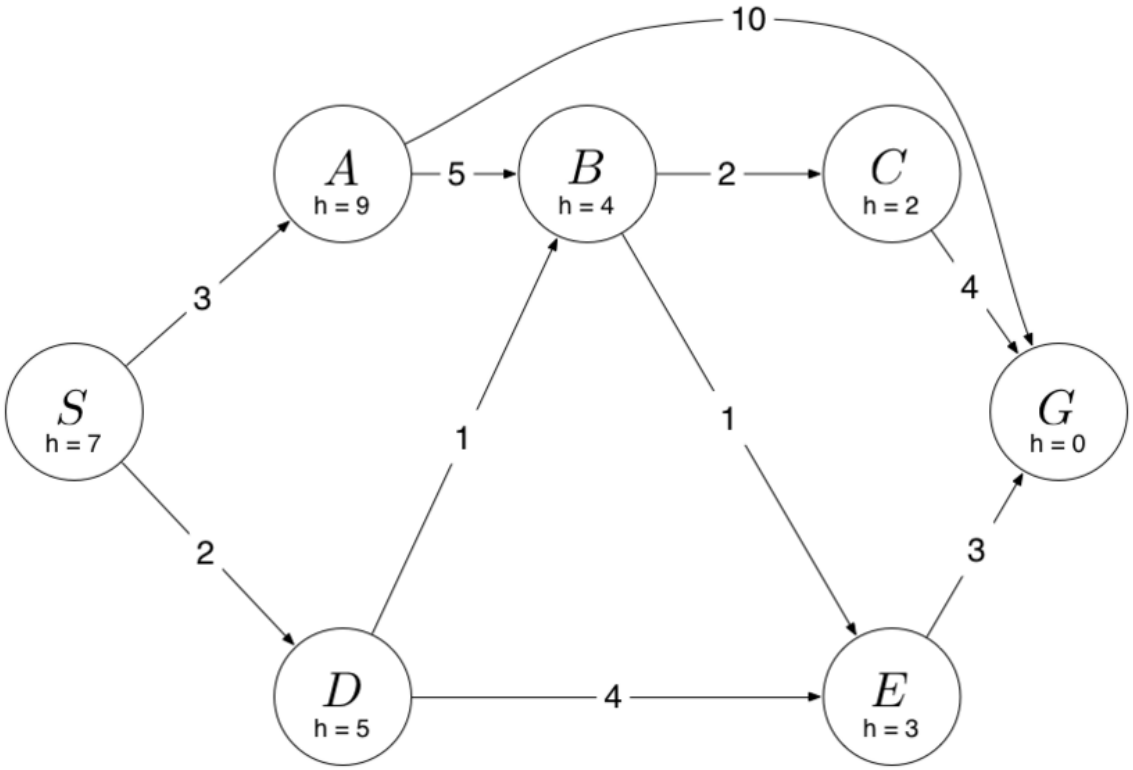
Arad	366	Mehadia	241
Bucharest	0	Neamt	234
Craiova	160	Oradea	380
Drobeta	242	Pitesti	100
Eforie	161	Rimnicu Vilcea	193
Fagaras	176	Sibiu	253
Giurgiu	77	Timisoara	329
Iasi	226	Vaslui	199
Lugoj	244	Zerind	374
Hirsova	151	Urziceni	80

Exercício:

Considere o grafo mostrado abaixo. Ao executar uma busca A*, o primeiro nó expandido é S, e após a expansão de S, teremos: (S → A) e (S → D). Qual é o valor de:

a) g(S → A)
b) h(S → A)
c) f(S → A)
d) g(S → D)
e) h(S → D)
f) f(S → D)

g) Qual será o próximo nó a ser expandido?
   1. (S → A)
   2. (S → D)



Exercício:

Considere o grafo mostrado abaixo. Ao executar uma busca A*, o primeiro nó expandido é S, e após a expansão de S, teremos: (S → A) e (S → D). Qual é o valor de:

a) g(S → A) **3**

b) h(S → A) **9**

c) f(S → A) **12**

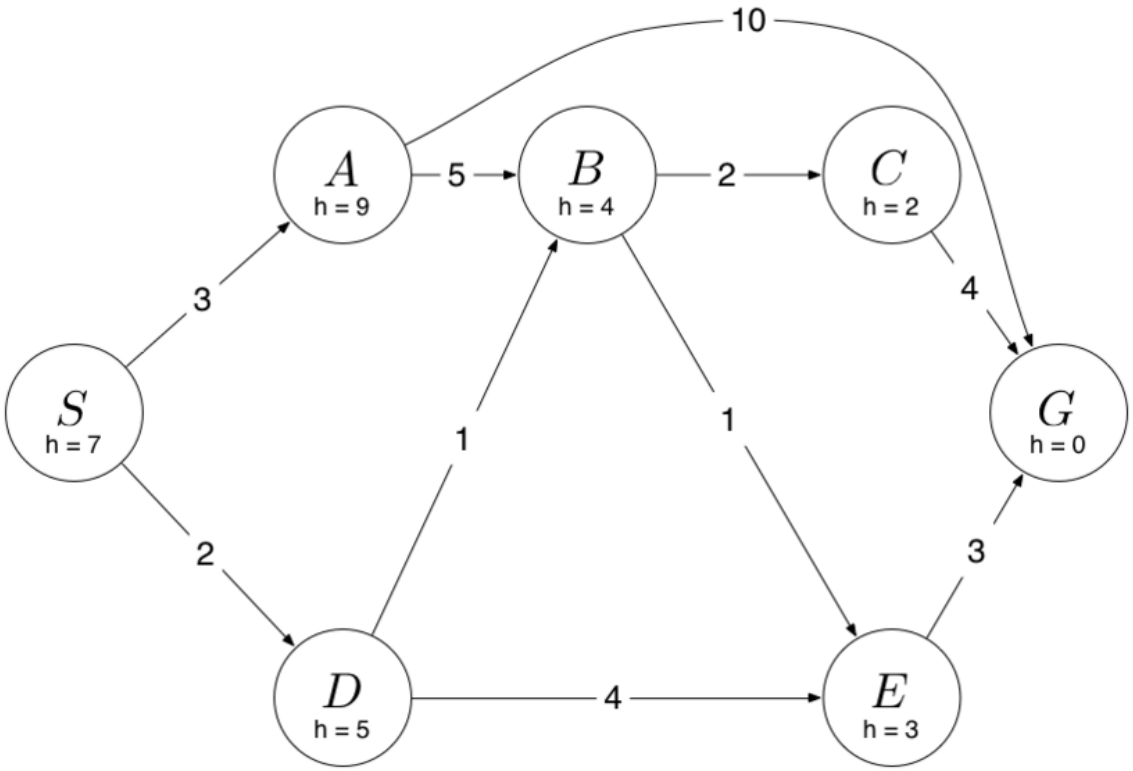
d) g(S → D) **2**

e) h(S → D) **5**

f) f(S → D) **7**

g) Qual será o próximo nó a ser expandido?

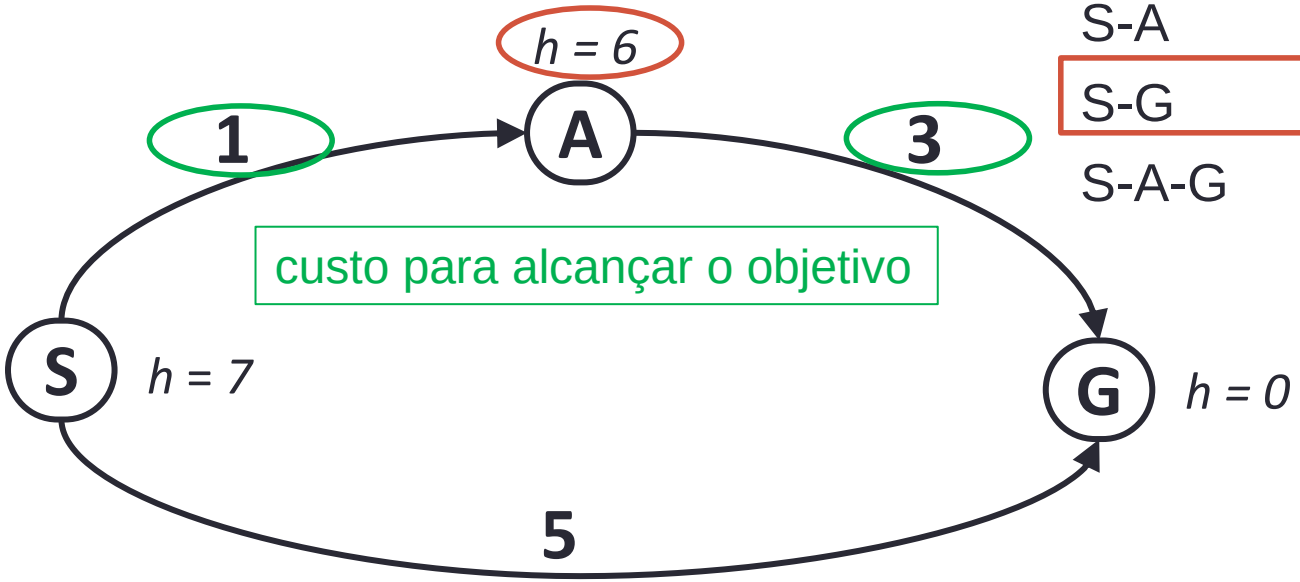
1. (S → A)
2. **(S → D)**



Busca A*

- A estratégia é **completa** e **ótima**.
  - Desde que possamos garantir que h(n) é **admissível ou consistente**, onde o custo heurístico nunca superestime o custo para alcançar o objetivo.

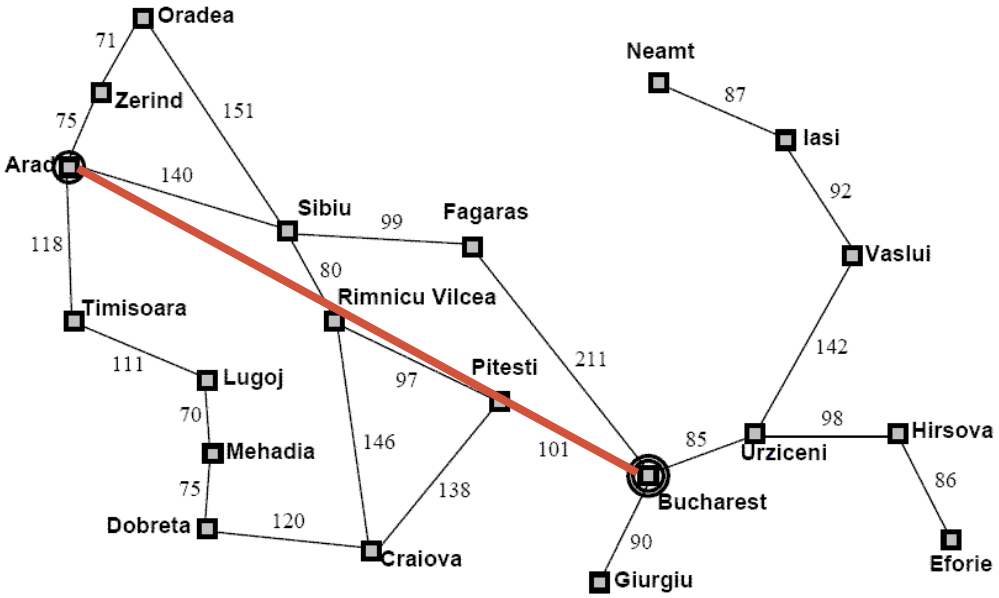
	g	h	f
S	0	7	7
S-A	1	6	7
S-G	5	0	5
S-A-G	4	0	4



Responda Rápido!

No exemplo da localização de rotas da Romênia: utiliza-se a heurística de distância em linha reta, conectando os dois pontos. Este exemplo é admissível?

- Sim. Porque o caminho mais curto entre dois pontos quaisquer é uma linha reta, assim a linha reta não pode ser superestimativa.



Busca A*

- A estratégia é **completa** e **ótima**.
  - Desde que possamos garantir que h(n) é admissível ou consistente, onde o custo heurístico nunca superestime o custo para alcançar o objetivo.

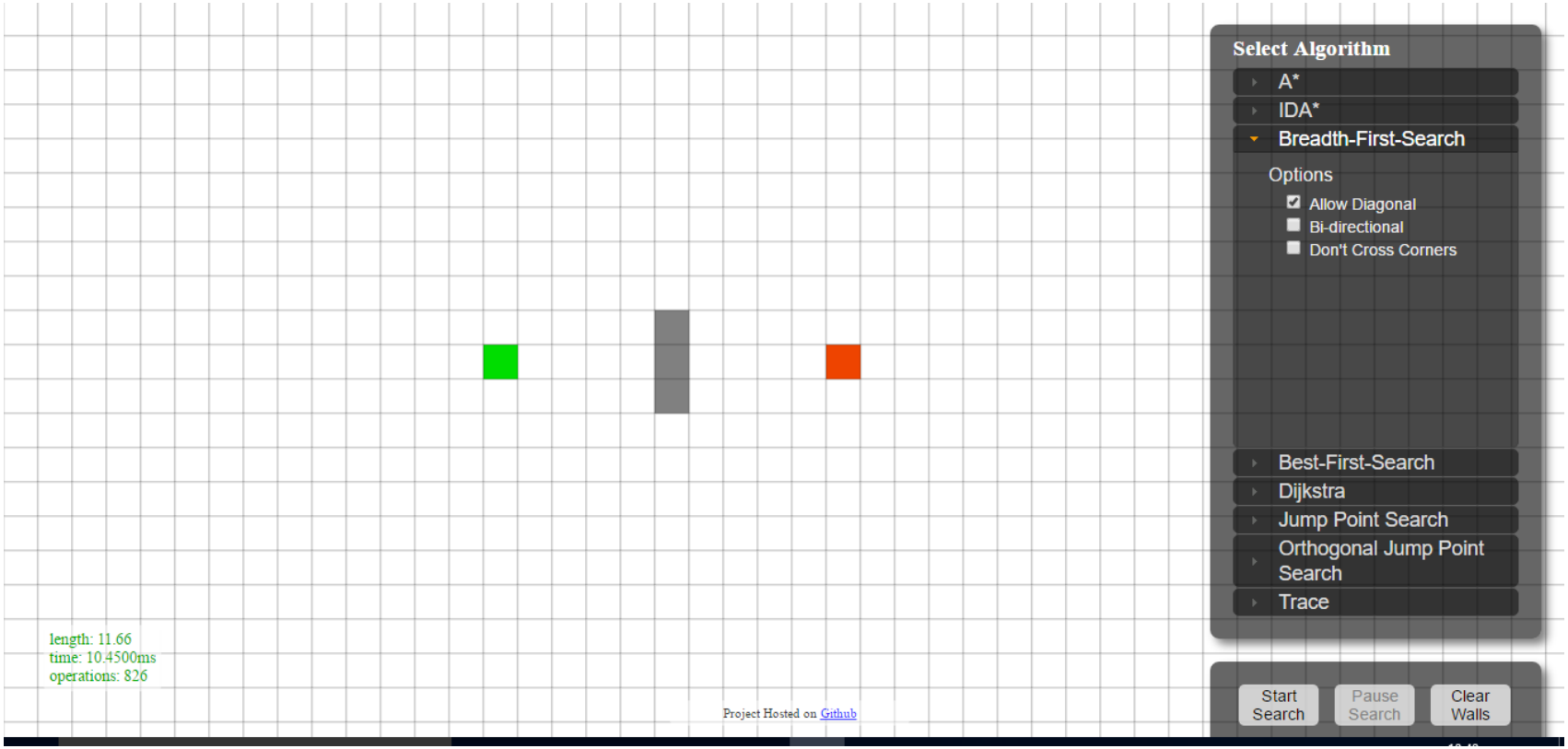
- **Custo de tempo:**
  - Exponencial com o comprimento da solução, porém boas funções heurísticas diminuem significativamente esse custo.

- **Custo memória:**
  - Guarda todos os nós expandidos na memória.

- Nenhum outro algoritmo ótimo garante expandir menos nós.

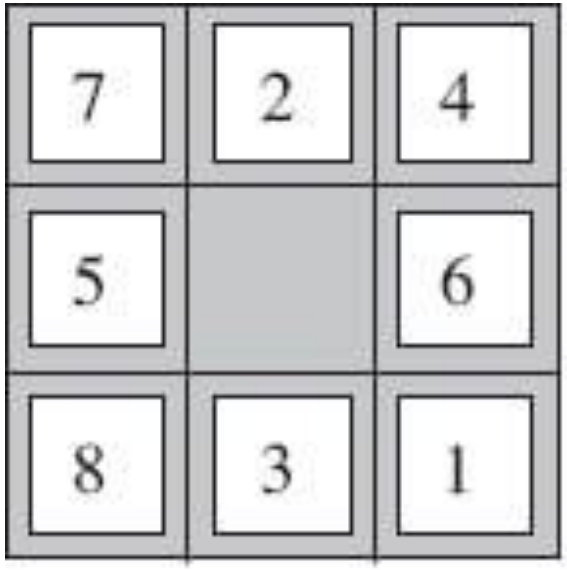
Busca Heurística

https://qiao.github.io/PathFinding.js/visual/

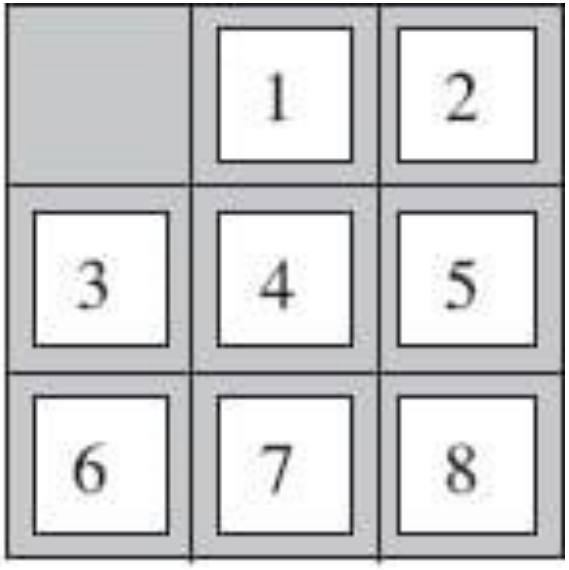


Exemplos de Heurísticas Admissíveis

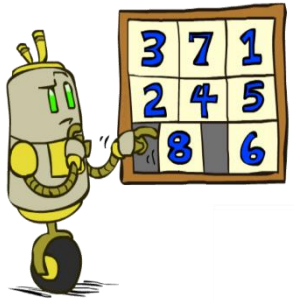
Quebra-Cabeça de 8 Peças



Estado inicial



Estado objetivo

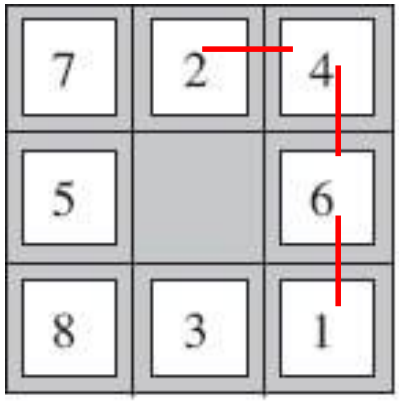


Funções Heurísticas

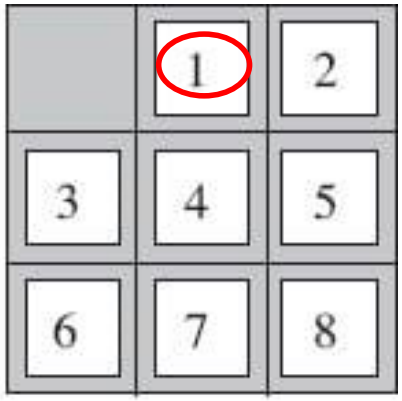
- **h1 = número de peças fora de lugar.**
  - todas as 8 peças estão fora de lugar, de modo que o estado inicial teria

  h1 = 8.

- **h2 = soma das distâncias das peças de suas posições-objetivo.**
  - Devido às peças não poderem ser movidas ao longo de diagonais, a distância que vai contar é a soma das distâncias horizontal e vertical (**distância de Manhattan**):
  - h2 = 3 + 1 +2 + 2 + 2 + 3 + 3 + 2 = 18.



Estado inicial

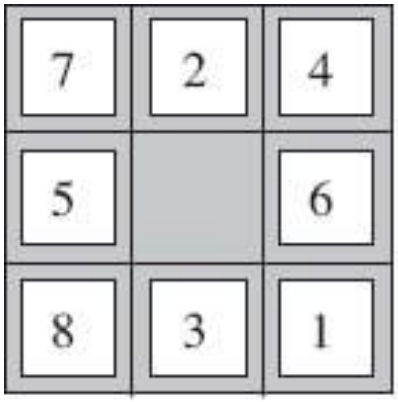


Estado objetivo

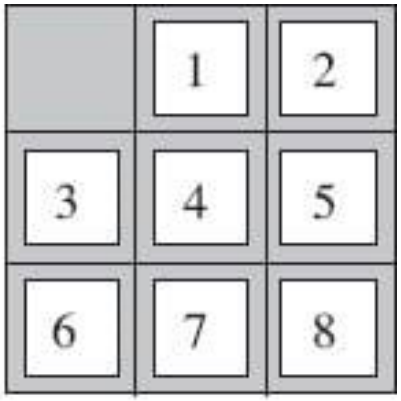
Funções Heurísticas

- **h1 = número de peças fora de lugar.**
  - h1 = 8.
  - h1 é uma heurística admissível porque é claro que qualquer peça que esteja fora de lugar deverá ser movida pelo menos uma vez.

- **h2 = soma das distâncias das peças de suas posições-objetivo.**
  - h2 = 3 + 1 +2 + 2 + 2 + 3 + 3 + 2 = 18. (**distância de Manhattan**)
  - h2 é também admissível porque todo movimento que pode ser feito move uma peça um passo mais perto do objetivo



Estado inicial



Estado objetivo

Nenhuma delas superestima o custo da solução verdadeira, que é 26.

Dominância

- **h2 é sempre melhor que h1, pois, $\forall n$ h2(n) ≥ h1(n)**

- Dizemos portanto que **h2 domina h1**, pois está mais próxima do custo real.

- Isto é, menos nós expandidos pela heurística dominante (escolhe nós mais próximos da solução).

Dominância

Para profundidade 14:

Busca por Aprofundamento Iterativo	= 3.373.941 nós
A*(h1)	= 539 nós
A*(h2)	= 113 nós

Para profundidade 24:

Busca por Aprofundamento Iterativo	= 54 bilhões de nós
A*(h1)	= 39.135 nós
A*(h2)	= 1.641 nós

Como criar heurísticas admissíveis?

A solução de uma simplificação de um problema (problema relaxado) é uma heurística para o problema original.

- **Admissível**: a solução do problema relaxado não vai superestimar a do problema original.
- É **consistente** para o problema original se for consistente para o relaxado.

Problema Relaxado

- Se as regras do quebra-cabeça forem alteradas de modo que uma peça possa ser movida para qualquer lugar em vez de apenas para o quadrado adjacente vazio, então h1 dará o número exato de passos para a solução mais curta.

- Da mesma forma, se uma peça puder ser movida um quadrado em qualquer direção, mesmo para um quadrado ocupado, h2 dará o número exato de passos para a menor solução.

- Um problema com poucas restrições sobre as ações é chamado de **problema relaxado**.