Busca não Informada

Inteligência Artificial

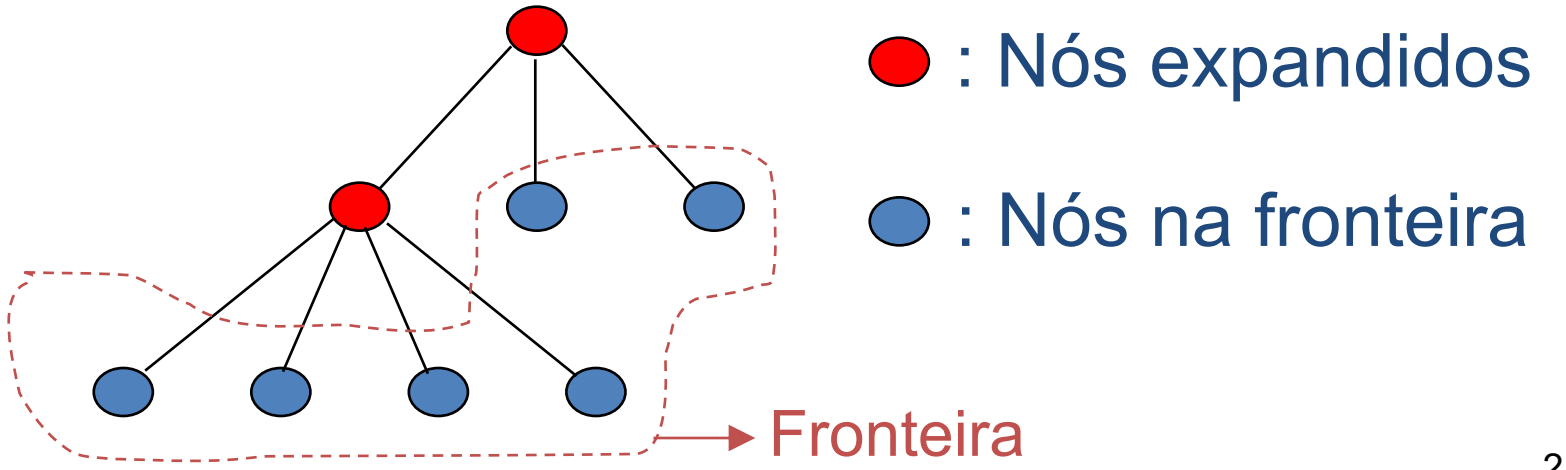
PCS3438

Escola Politécnica da USP

Engenharia de Computação (PCS)

Busca não informada

- A busca não informada (ou busca cega) não possui estimativas sobre qual sucessor é mais promissor para atingir a meta.
- Fronteira (ou borda): todos os nós **gerados** e ainda não **expandidos** (ou não **visitados**) da árvore de busca.



Estratégias de Busca Cega

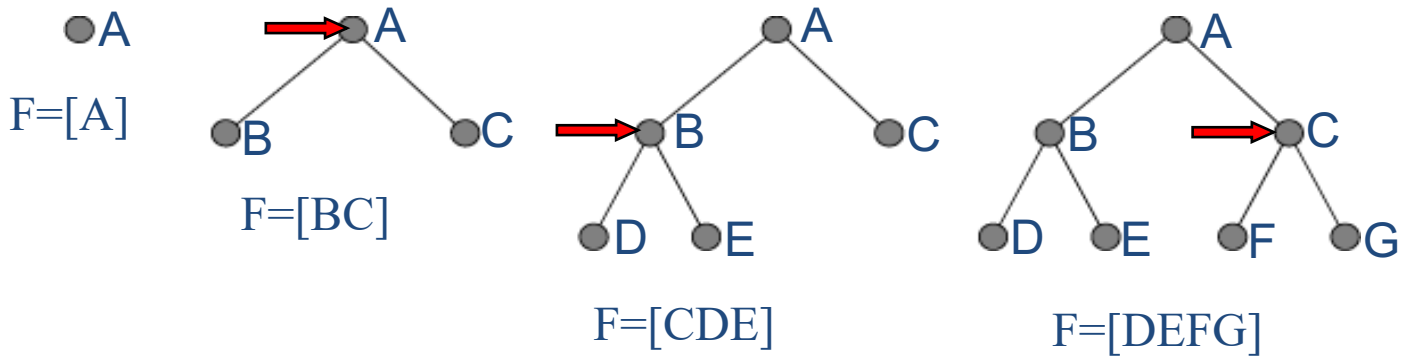
- **Busca em Largura**
- Busca de Custo Uniforme
- Busca em Profundidade
- Busca em Profundidade Limitada
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- Busca Bidirecional
- Evitando Estados Repetidos
- Busca com Conhecimento Incompleto

Busca em Largura (BFS)

- Ordem de expansão dos nós:
  1. Nó raiz
  2. Todos os nós de profundidade 1
  3. Todos os nós de profundidade 2, etc…

Fronteira = FIFO (first-in-first-out)

➔ insere no fim da fila



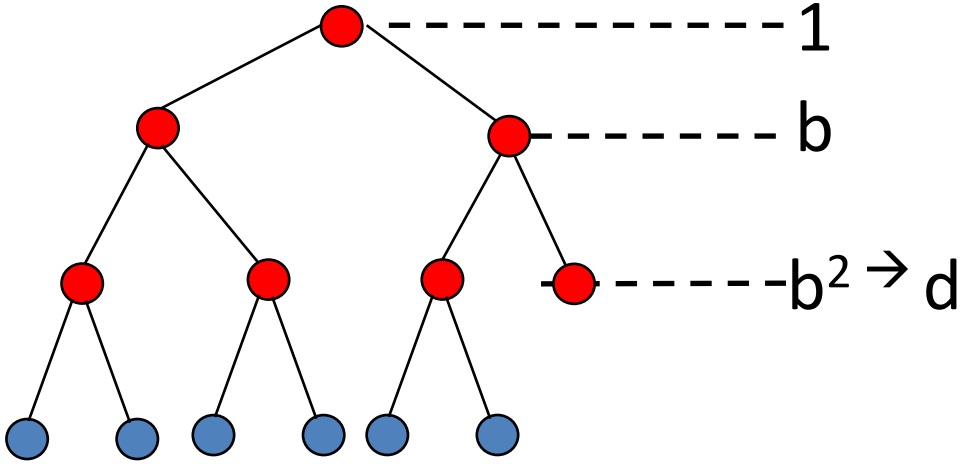
Desempenho da busca em largura

- Completa?
  - Se b finito, é completa: se um nó-meta estiver a uma profundidade d, a busca em largura sempre irá encontrá-lo.
- Ótima?
  - Nem sempre – caminho mais curto (nó-meta mais próximo da raiz) ≠ melhor caminho
  - É ótima se o custo do caminho for uma função não-decrescente da profundidade do nó (ex: todas ações têm mesmo custo) e custo dos passos é igual

Desempenho da busca em largura

- Complexidade de tempo
  - Meta em d, cada nó tem b filhos. No pior caso, vem (teste ao **expandir/visitar** cada nó):

$$1 + b + b^2 + b^3 + \ldots + b^d + (b^{d+1} - b) = \mathcal{O}(b^{d+1})$$

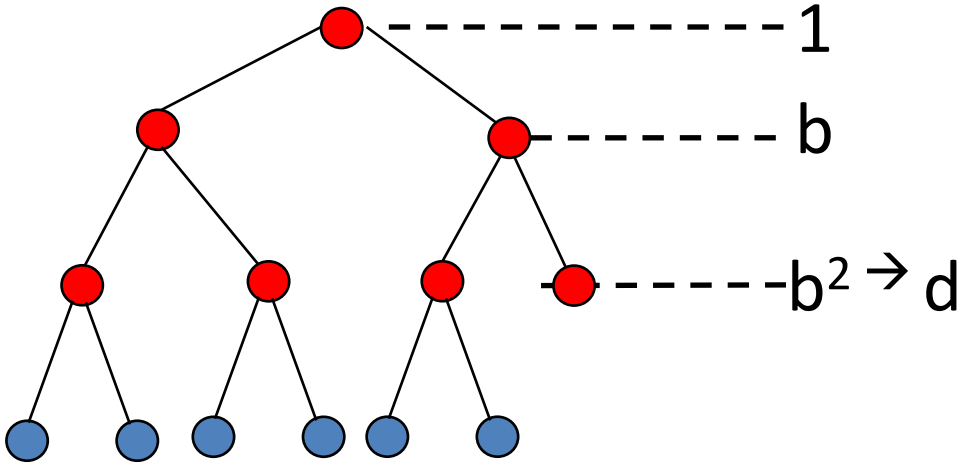


Se testar ao gerar: $1 + b + b^2 + \ldots + b^d = \mathcal{O}(b^d)$

Desempenho da busca em largura

- Complexidade de espaço
  - Mantém todos nós gerados (ou está na fronteira ou está na lista de visitados)

$$1 + b + b^2 + b^3 + \ldots + b^d + (b^{d+1} - b) = \mathcal{O}(b^{d+1})$$



Estratégias de Busca Cega

- Busca em Largura
- **Busca de Custo Uniforme**
- Busca em Profundidade
- Busca em Profundidade Limitada
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- Busca Bidirecional
- Evitando Estados Repetidos
- Busca com Conhecimento Incompleto

Busca de Custo Uniforme

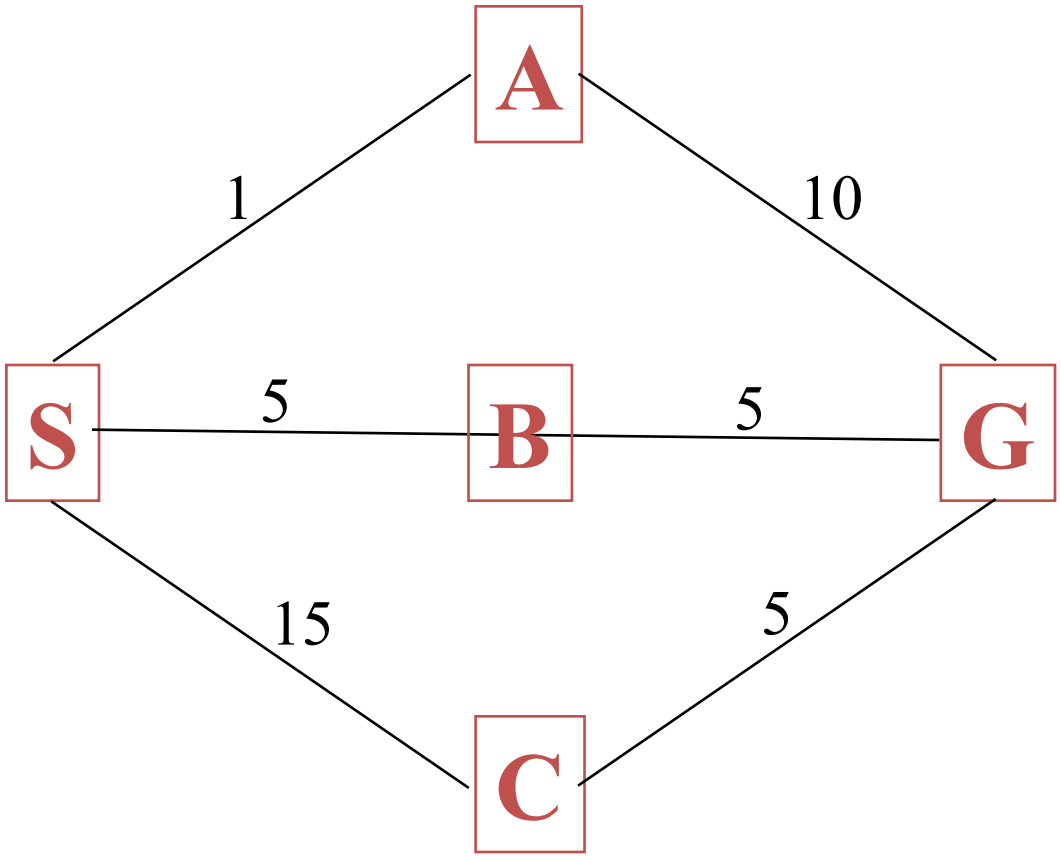
- Modifica a busca em largura:
  - **Em vez de expandir o nó gerado primeiro, expande o nó da fronteira com menor custo de caminho (da raiz ao nó)**
  - Sempre testa objetivo ao visitar (não ao gerar)

Fronteira ➔ insere em ordem crescente de custo

- g(n) dá o custo do caminho da raiz ao nó n
  - Na busca em largura: *g(n)* = *profundidade*(*n*)

Busca de Custo Uniforme

- **Exemplo**: gerar a árvore de busca usando busca de custo uniforme, partindo de S e chegando a G. Mostre todos os estados da fronteira.



Busca de Custo Uniforme
Fronteira do exemplo anterior

- F = {S}; V = ∅
  - testa se S é o estado objetivo, expande-o e guarda seus filhos A, B e C ordenadamente (segundo custo) na fronteira
- F = {A, B, C}, V = {S}
  - testa A, expande-o e guarda seu filho GA ordenadamente

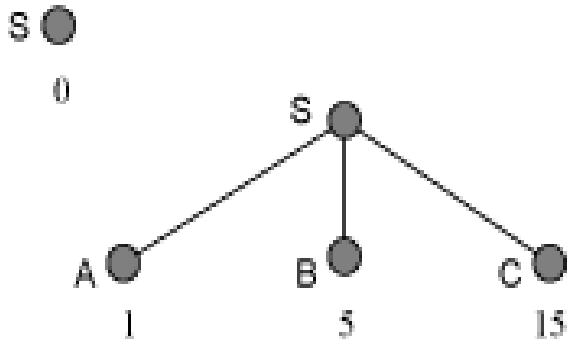
obs.: aqui o algoritmo de geração guarda na fronteira todos os nós gerados. O teste de nó **apenas** é feito quando ele é **retirado** da fronteira e visitado (ou expandido)!

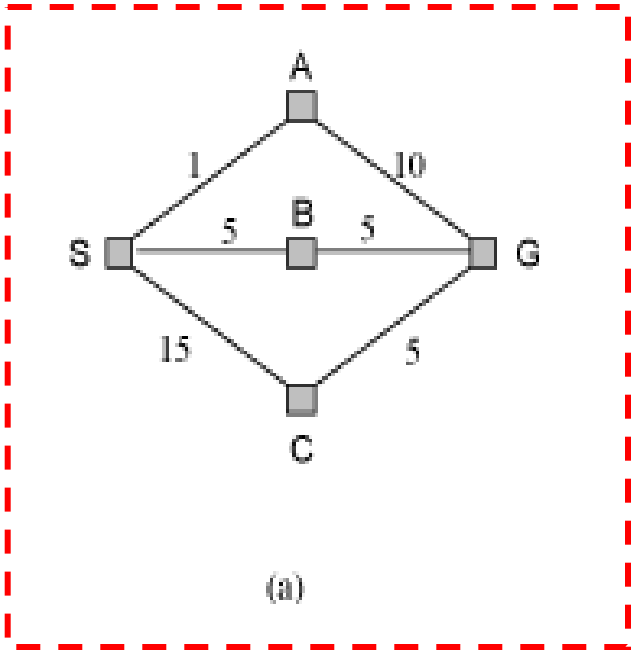
Busca de Custo Uniforme
Fronteira do exemplo anterior

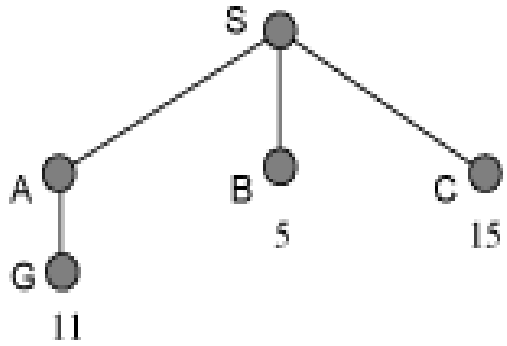
- F= {B, GA, C}; V = {S, A}
  - testa B, expande-o e guarda seu filho GB ordenadamente
- F= {GB, GA, C}; V = {S, A, B}
  - testa GB e para!
  - V_{final} = {S, A, B, GB}; F_{final} = {GA, C}

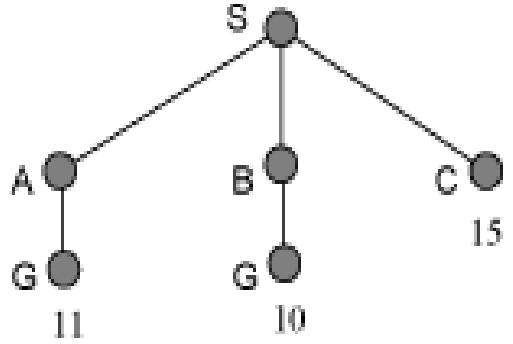
Observe que o menor custo (portanto, o melhor caminho) é armazenado para cada vértice (G pelo caminho por A foi trocado por G pelo caminho por B).

Busca de Custo Uniforme









(b)

Desempenho da Busca de Custo Uniforme

- Completa? Só *se custo de cada ação* $\geq \varepsilon$, $\forall n$
  - ε *é uma constante pequena positiva*
    - *Loop* infinito: se existir um caminho com uma sequência infinita de ações de custo=0
- Ótima? *Só se g(sucessor(n)) > g(n)*
  - *custo* ***no mesmo caminho*** *sempre cresce (i.e., não tem ação com* ***custo negativo ou 0****)*
- Complexidade de tempo
  - *C*=custo da solução ótima (custo de cada ação*$\geq \varepsilon$*)*

➔ Pior caso: $O(b^{1+\lfloor C^*/\varepsilon \rfloor})$, o que pode ser bem maior que b^d

Estratégias de Busca Cega

- Busca em Largura
- Busca de Custo Uniforme
- **Busca em Profundidade**
- Busca em Profundidade Limitada
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- Busca Bidirecional
- Evitando Estados Repetidos
- Busca com Conhecimento Incompleto

Busca em Profundidade (DFS)

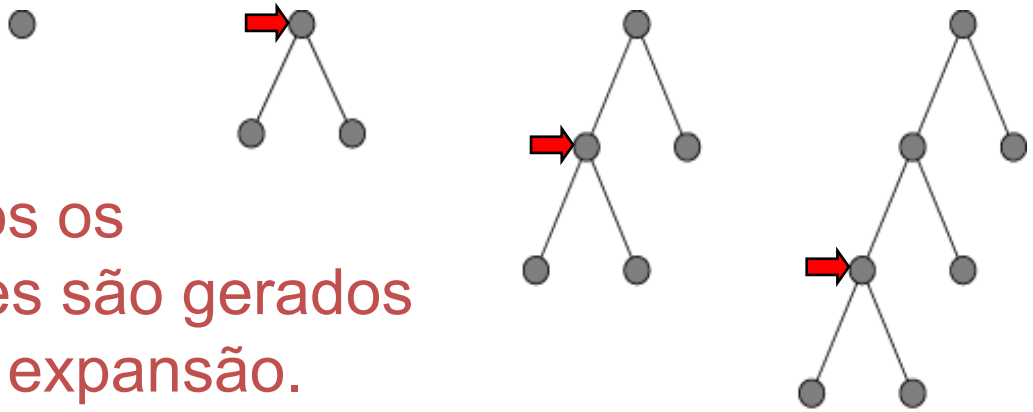
- Ordem de expansão dos nós:
  1. Nó raiz
  2. Primeiro nó de profundidade 1
  3. Primeiro nó de profundidade 2, etc…

Fronteira = LIFO (last-in-first-out)

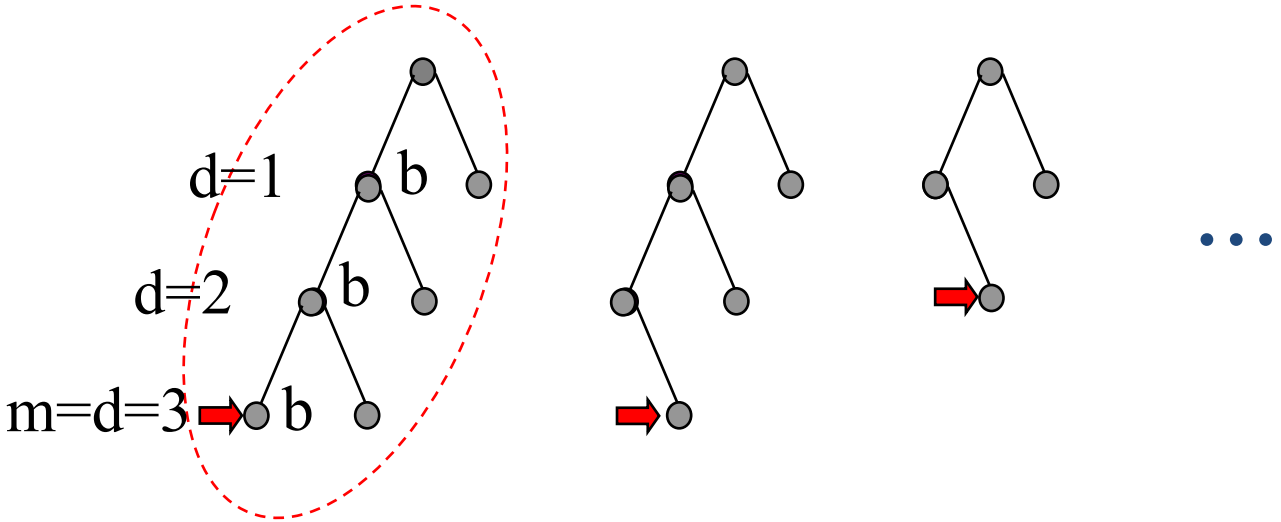
➔ insere na pilha

– Em cada visita a um nó, gera todos seus sucessores

Busca em Profundidade



Aqui, todos os sucessores são gerados durante a expansão.



Neste exemplo, nós com profundidade 3 não têm sucessores.
Nós sem sucessores e já expandidos são “apagados”.

Desempenho da Busca em Profundidade

- Esta estratégia **não é *completa*** (caminho pode ser infinito) **nem é *ótima*.**
  - Se usar uma estratégia que não permite estados repetidos nem caminhos redundantes, ela é completa (mas isso piora a complexidade espacial por ter que armazenar o histórico de estados).
- Complexidade espacial:
  - mantém na memória o caminho que está sendo expandido no momento, e os nós irmãos dos nós no caminho para possibilitar o retrocesso (*backtracking*)
  - Apaga subárvores já visitadas
  - Para espaço de estados com fator de ramificação b e **profundidade máxima m** (m pode ser >> d), requer apenas **bm+1** de memória ➔ $\mathcal{O}$(bm)

Desempenho da Busca em Profundidade

- Complexidade temporal: $O(b^m)$, no pior caso.
  - Para problemas com várias soluções, esta estratégia pode ser bem mais rápida do que a busca em largura.
  - Esta estratégia deve ser evitada quando as árvores geradas são muito *profundas* (**m** muito grande) ou geram *caminhos infinitos*.

Variante: **Busca com Retrocesso (backtracking search)**

- Parecida com BP, mas **somente UM sucessor é gerado em cada iteração**
  - na BP, todos os sucessores são gerados na expansão do nó pai
- Portanto, requer só $\mathcal{O}$(m) de memória
  - BP requer $\mathcal{O}$(bm) de memória
- **Restrição**: deve ser capaz de retornar ao pai e criar o novo sucessor

Estratégias de Busca Cega

- Busca em Largura
- Busca de Custo Uniforme
- Busca em Profundidade
- **Busca em Profundidade Limitada**
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- Busca Bidirecional
- Evitando Estados Repetidos
- Busca com Conhecimento Incompleto

Busca em Profundidade Limitada

- Evita o problema de árvores não limitadas ao impor um limite máximo (l) de profundidade para os caminhos gerados.
  - O domínio do problema estabelece a profundidade limite.
  - Problema: definir limite l adequado!
- Completa? Somente se $l \geq d$.
- Ótima? Não, exceto se l = d e custo dos passos é igual.
- Complexidade espacial: $\mathcal{O}(bl)$
- Complexidade temporal: $\mathcal{O}(b^l)$ no pior caso.

BP é caso particular de BPL, com $l = \infty$

Estratégias de Busca Cega

- Busca em Largura
- Busca de Custo Uniforme
- Busca em Profundidade
- Busca em Profundidade Limitada
- **Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo**
- Busca Bidirecional
- Evitando Estados Repetidos
- Busca com Conhecimento Incompleto

Busca com Aprofundamento Iterativo (BAI)

- Tenta limites com valores crescentes, partindo de zero, até encontrar a primeira solução (em d).
  - Combina vantagens da busca em largura (BL) com as da busca em profundidade (BP).
  - **Em geral, é a estratégia preferida de busca cega para quando o espaço de estados é muito grande e a profundidade da solução d é desconhecida.**
- Possui uma variante, a **Busca com Comprimento Iterativo (BCI)** – analogia entre BAI e BL, e BCI e Custo Uniforme: usa incremento iterativo do **custo** do caminho em vez de incremento na profundidade (mas BCI não é eficiente!)

Desempenho da BAI

- Completa? Sim se b for finito (idem BL).
- Ótima? Sim se o custo do caminho for uma função crescente com a profundidade do nó e custo dos passos é igual (idem BL).
- Complexidade espacial: $\mathcal{O}(bd)$ (idem BP).

Desempenho da BAI

- Complexidade temporal: nós na profundidade da menor solução (d) são gerados 1 vez, em d-1 são gerados 2 vezes, ... na profundidade 1 são gerados d vezes:

$(d)b + (d-1)b^2 + (d-2)b^3 + ... + (1)b^d = \mathcal{O}(b^d)$

OBS: BL gera alguns nós em d+1 e BAI não gera.

BL: $\mathcal{O}(b^{d+1})$

Na realidade, BAI é mais rápida que BL.

Estratégias de Busca Cega

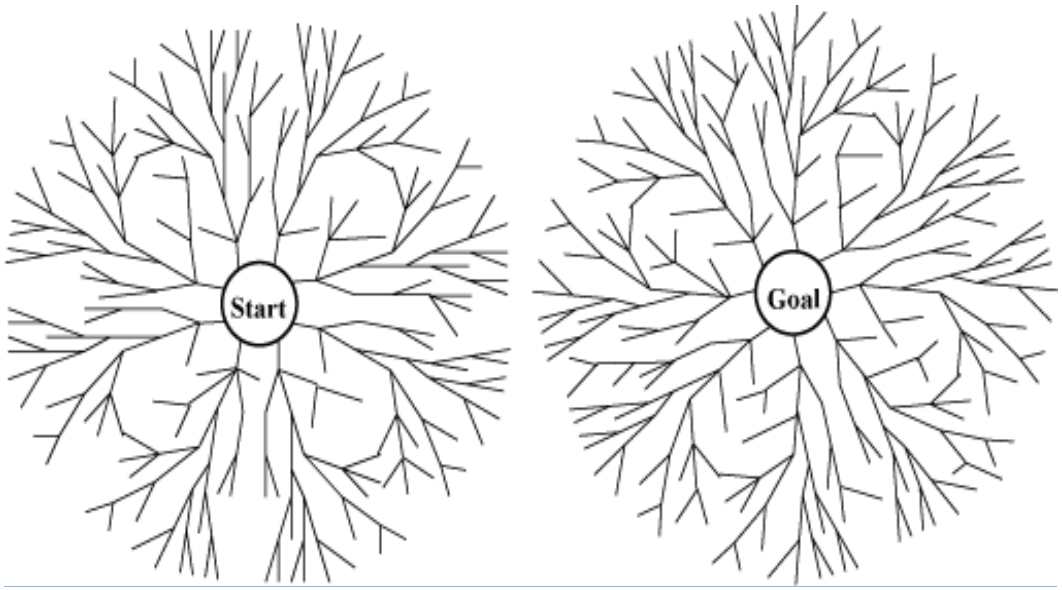
- Busca em Largura
- Busca de Custo Uniforme
- Busca em Profundidade
- Busca em Profundidade Limitada
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- **Busca Bidirecional**
- Evitando Estados Repetidos
- Busca com Conhecimento Incompleto

Busca Bidirecional

- Busca em duas direções (duas buscas simultâneas):
  - para frente, a partir do nó inicial, e
  - para trás, a partir do nó final (objetivo)
- A busca para quando o nó a ser expandido por uma busca se encontra na fronteira da outra busca.
- **Motivação:**

$$b^{d/2} + b^{d/2} < b^{d}.$$

Ou: a área de dois círculos de raio R é menor que a área de um círculo de raio 2R



Busca Bidirecional

- Para BL nas duas direções: $\mathcal{O}(b^{d/2})$ no tempo e no espaço. Completeza e otimalidade: idem BL.
  - É possível utilizar *estratégias* diferentes em cada direção da busca (podendo sacrificar desempenho)
- Porém, encadeamento reverso (da meta para o início) só é possível se todas as ações no espaço de estados forem reversíveis.
- Outro problema: quando há vários estados-meta ou quando é muito difícil computar os estados-meta pelo teste de término (ex. estados para cheque-mate).

Estratégias de Busca Cega

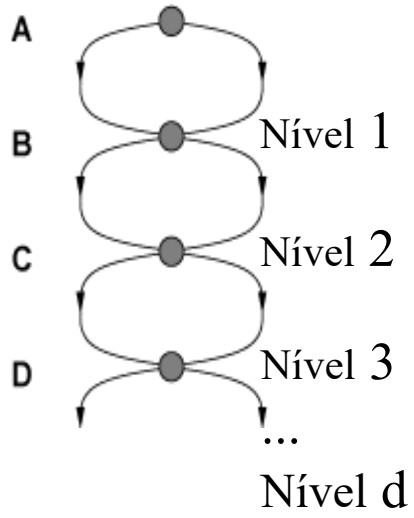
- Busca em Largura
- Busca de Custo Uniforme
- Busca em Profundidade
- Busca em Profundidade Limitada
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- Busca Bidirecional
- **Evitando Estados Repetidos**
- Busca com Conhecimento Incompleto

Evitando Estados Repetidos

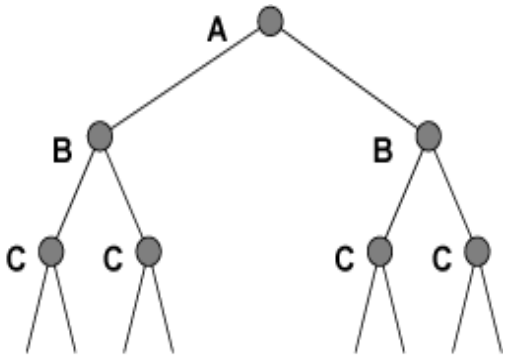
- Problema geral em Busca
  - expandir estados já previamente encontrados e expandidos
- É inevitável quando há operadores reversíveis
  - ex. encontrar rotas, canibais e missionários, 8-números, etc.
  - a árvore de busca é potencialmente infinita

Evitando Estados Repetidos

Espaço de estados



Árvore de busca



Exemplo:

Número de estados= **d+1;**

2^d caminhos na árvore de busca (combinações possíveis de caminhos de A ao último estado, no nível d).

Idéia: podar (*prune*) estados repetidos, para gerar apenas a parte da árvore que corresponde ao grafo do espaço de estados (que é finito!)

Evitando Estados Repetidos

- **Problema**: deve armazenar todos nós gerados!
  - Além da lista de fronteira (também chamada de ***open list***), os algoritmos precisam da lista de nós visitados / expandidos (***closed list***)
  - Cada nó gerado é comparado com aqueles da *closed list*: se for repetido, **descarta aquele de caminho com custo pior.**
  - Pode ser implementado mais eficientemente com *hash tables*
  - BP e BAI: perdem propriedade de complexidade linear no espaço.

Estratégias de Busca Cega

- Busca em Largura
- Busca de Custo Uniforme
- Busca em Profundidade
- Busca em Profundidade Limitada
- Busca em Profundidade com Aprofundamento Iterativo
- Busca Bidirecional
- Evitando Estados Repetidos
- **Busca com Conhecimento Incompleto**

Busca com Conhecimento Incompleto

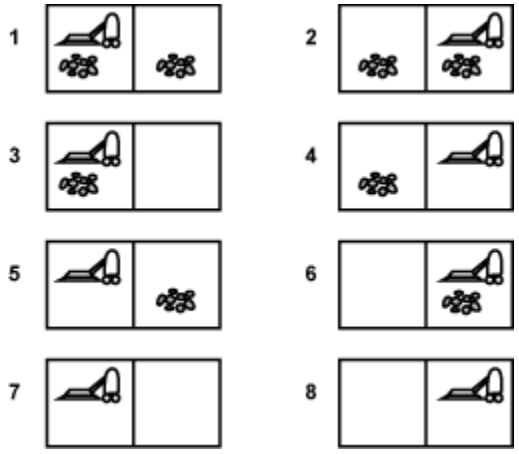
E se o ambiente não for totalmente observável, determinístico e o agente não souber as consequências de suas ações?

1. Problemas **conformantes** (sem sensores): não sabe seu estado inicial e, assim, cada ação poderia levar a muitos estados sucessores.
2. Problemas **contingenciais**: quando o ambiente é parcialmente observável ou suas ações possuem incertezas. Se a incerteza é causada por ações de outro agente, é um problema com adversário.
3. Problemas de **exploração**: quando os estados e a dinâmica do ambiente são desconhecidos, o agente precisa atuar para descobrí-los (caso extremo dos problemas contingenciais).

Problemas Conformantes (sem sensores)

- Estado de crença (***belief state*** – *bs*): conjunto de estados em que o agente acredita estar.
- **Busca ocorre no espaço de *bs:***
  - ações são aplicadas nos bs, gerando bs sucessores (∪ sucessores da ação aplicada a cada estado ∈ bs)
  - *Solução*: caminho que leva a um bs que só contenha estados-meta
  - Mesmo procedimento para ações não determinísticas

Exemplo com o agente aspirador

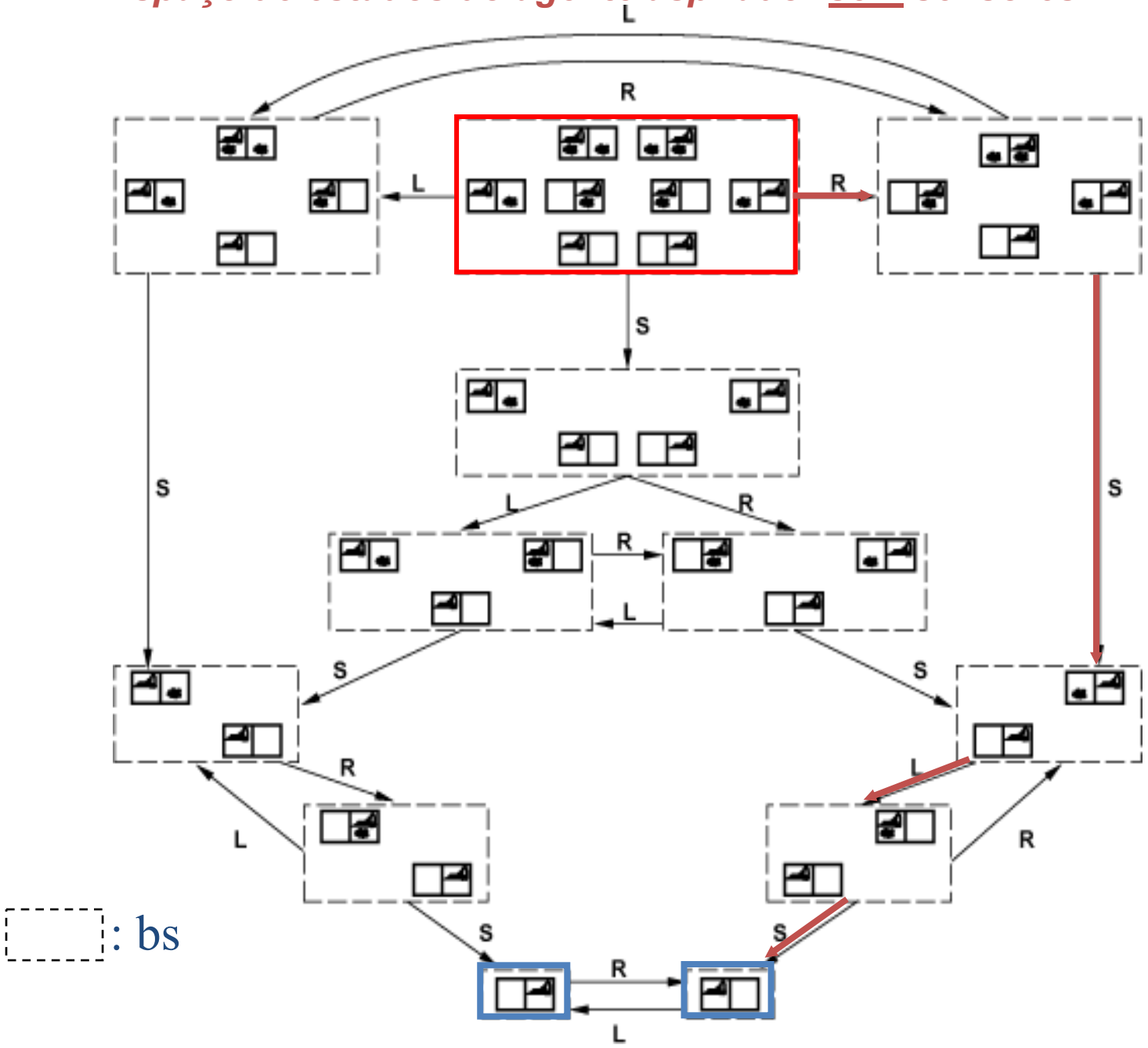


Bs inicial = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}

Se aplicar a = Right em bs, vem:
bs'={2, 4, 6, 8} ...

Assim,
seq=[Right, Suck, Left, Suck]
é uma solução!

Espaço de estados do agente aspirador sem sensores



: bs

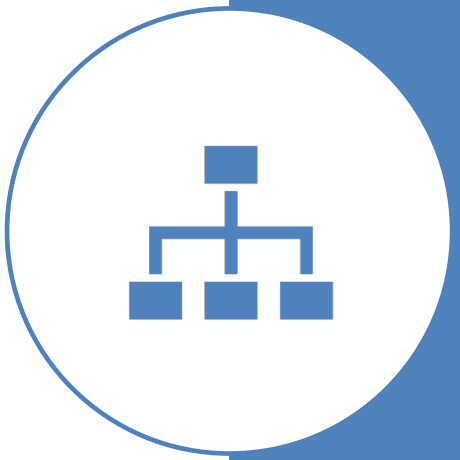
Problemas Contingenciais (incertezas e observabilidade parcial)

- Nenhuma sequência fixa de ações garante a solução.
- Muitos problemas reais são contingenciais pois a predição exata é impossível.
- **Planejamento condicional**:
  - no meio da solução são inseridas ações de sensoriamento que direcionam a execução.
  - A solução normalmente é uma árvore, onde ações são selecionadas em função das contingências sensoriadas.
- Uso de abordagem probabilística

Problemas Contingenciais

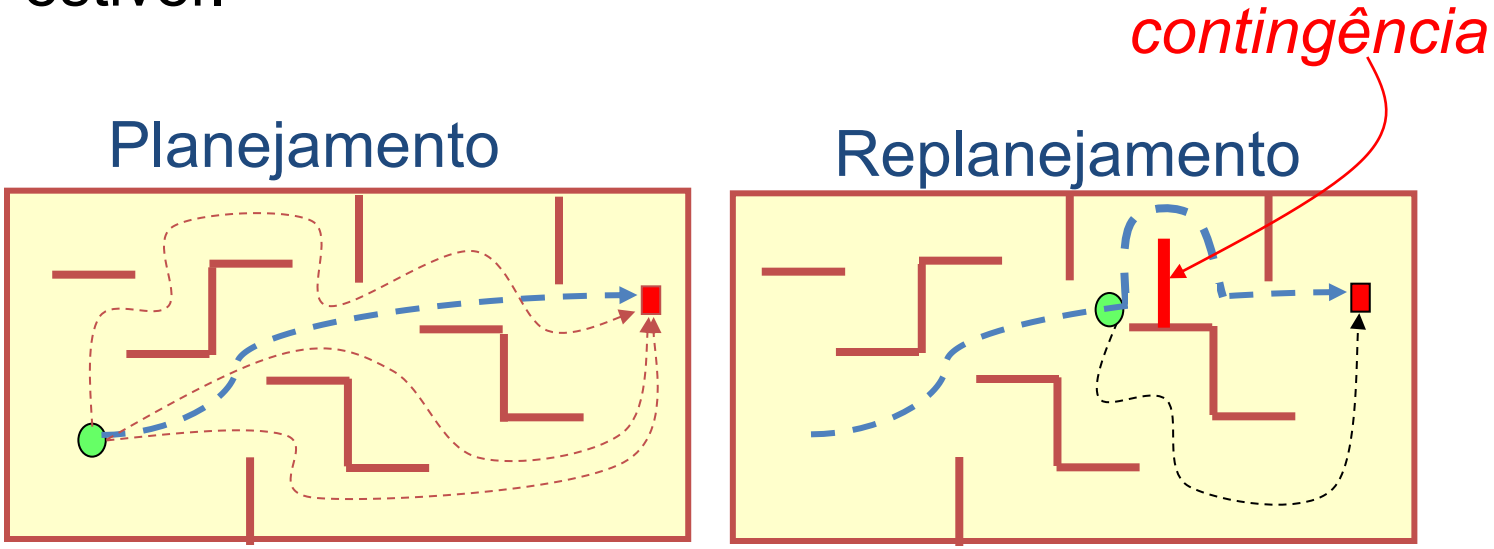
Planejamento contínuo

- monitora e atualiza seu modelo do mundo continuamente, mesmo quando em deliberação;
- assim que tiver um plano parcial, executa; revê metas, inclui novas metas, descarta metas, etc.
- Projetado para interagir indefinidamente com o ambiente. Também usado em problemas de exploração.



Problemas Contingenciais

- Monitoramento da execução e replanejamento:
  - agente planeja uma solução e a executa, monitorando a execução;
  - se ocorrer contingências e o plano precisar ser revisado, o agente replaneja a partir do estado que estiver.



Resumo

- Vimos como modelar um problema como busca de solução para o agente baseado em objetivos
- Vimos como formular o problema e várias estratégias para buscar a solução no espaço de estados
- Flexibilizamos as aplicações dando possíveis soluções para os casos de problemas conformantes (sem sensores), problemas contingenciais e de exploração.

Próxima aula

Como melhorar a eficiência da busca com o uso de informação