CEFET-MG

Engenharia de Computação
Inteligência Artificial
03 - Representação do Conhecimento e Solução de Problemas

Organização da aula

- Retomada: agentes, metas e medidas de desempenho.
- Conhecimento, informação e representação em IA.
- Representações simbólicas e sub-simbólicas.
- Formulação de problemas: estados, ações, transições, metas e custos.
- Resolução de problemas por meio de busca: espaço de estados, árvore de busca e fronteira.

Fio condutor

Como transformar uma meta de um agente em uma representação computável de problema e, depois, em uma sequência de ações?

Retomada da aula anterior

Retomando

Na aula sobre agentes, vimos que um agente percebe um ambiente, escolhe ações e é avaliado por uma medida de desempenho.

- Um agente racional não precisa ser perfeito; ele age com base nas informações disponíveis.
- Agentes orientados por metas precisam escolher ações que levem a estados desejados.
- Para escolher ações, o agente precisa representar o ambiente, os estados possíveis e os efeitos de suas ações.

Pergunta

Se um agente tem uma meta, o que ele precisa representar para conseguir agir?

Da meta à solução

- Uma meta descreve uma situação desejada.
- Uma ação altera o estado do ambiente.
- Uma solução é uma sequência de ações que leva do estado inicial a um estado meta.
- Antes de buscar uma solução, é necessário definir uma representação adequada do problema.

Observação

Representação não é apenas um detalhe de implementação. Ela define o que o agente consegue considerar, comparar, inferir e resolver.

Dado, informação, conhecimento e representação

- **Dado:** registro bruto de uma observação, medida ou símbolo.
- **Informação:** dado interpretado em um contexto.
- **Conhecimento:** informação organizada para interpretar, prever, inferir ou orientar ações.
- **Representação:** forma computável usada para armazenar e manipular esse conhecimento.

Pergunta

Uma tabela de dados é conhecimento ou apenas uma forma de armazenar observações?

Exemplo: temperatura corporal

- **Dado:** 39,2 °C.
- **Informação:** a temperatura está elevada.
- **Conhecimento:** febre pode estar associada a infecção, inflamação ou outras condições clínicas.
- **Representação:** regra, grafo, modelo probabilístico, árvore de decisão ou vetor aprendido.

Observação

O mesmo conhecimento pode ser representado de formas diferentes, com vantagens e limitações diferentes.

Representação do conhecimento

- Uma representação deve cobrir as situações relevantes do domínio.
- Deve ser estável o suficiente para permitir manipulação computacional.
- Deve reduzir redundâncias e explicitar relações importantes.
- Deve permitir algoritmos viáveis para consulta, inferência, decisão ou aprendizagem.

Pergunta

Uma representação fácil para humanos entenderem é sempre a melhor para um algoritmo?

Componentes de uma representação

- **Léxica:** símbolos do vocabulário da representação.
- **Estrutural:** restrições sobre como os símbolos podem ser organizados.
- **Procedimental:** operações para criar, modificar, consultar ou derivar soluções.
- **Semântica:** significado associado aos símbolos, relações e estruturas.

Observação

Em IA, representar não é apenas armazenar: é permitir que algum processo computacional use a representação.

Propósitos da representação

- **Interpretar o ambiente:** relacionar percepções a objetos, eventos ou estados.
- **Organizar o domínio:** identificar similaridades, diferenças e relações.
- **Questionar:** formular consultas e revisar modelos quando algo não se encaixa.
- **Prever:** estimar consequências de ações ou eventos.
- **Deduzir:** derivar novos fatos a partir de conhecimento já representado.

Exemplo de dedução

- Todo homem é mortal.
- João é homem.
- Logo, João é mortal.

Pergunta

Para que um sistema derive essa conclusão, o que precisa estar representado: as frases, a regra lógica ou o significado das relações?

Simbólico e sub-simbólico

- **Abordagem simbólica:**
  - usa símbolos explícitos, regras, relações e estruturas interpretáveis;
  - exemplos: lógica, redes semânticas, ontologias, sistemas baseados em regras.
- **Abordagem sub-simbólica:**
  - usa representações distribuídas, numéricas ou aprendidas;
  - exemplos: redes neurais, embeddings, representações latentes.

Observação

Sistemas modernos frequentemente combinam representações simbólicas e sub-simbólicas.

Onde está o conhecimento do ChatGPT?

Discussão

Quando um modelo de linguagem responde uma pergunta, o conhecimento está em uma base explícita de fatos, nos parâmetros do modelo, no contexto da conversa ou nas ferramentas externas usadas pelo sistema?

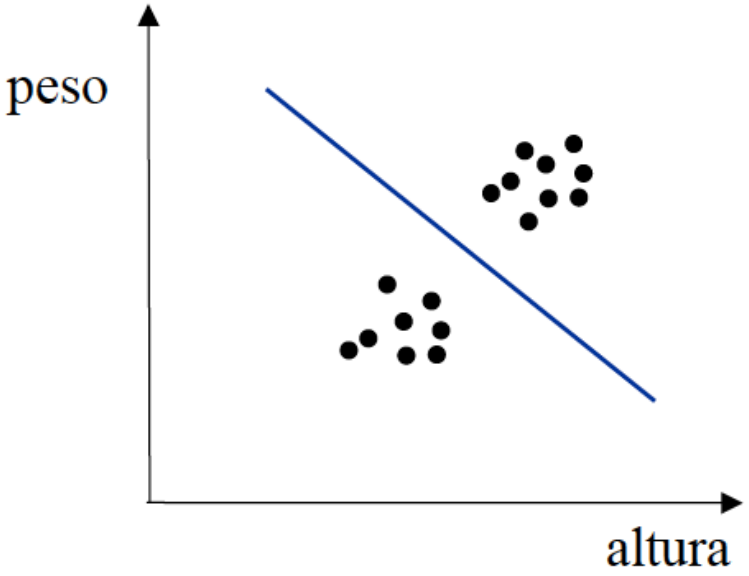
- Parte do comportamento vem de padrões aprendidos durante o treinamento.
- Parte depende do texto disponível no contexto da conversa.
- Sistemas com busca, RAG ou ferramentas podem consultar conhecimento externo durante a execução.

Pergunta

Isso é o mesmo tipo de representação de uma regra lógica ou de uma rede semântica?

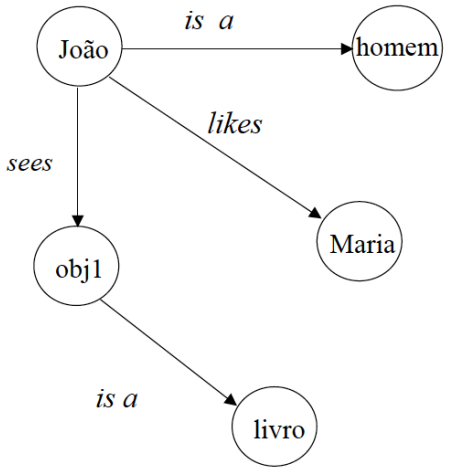
Espaços de atributos

- Cada dimensão do espaço corresponde a um atributo do objeto ou exemplo.
- A posição de um ponto representa uma instância.
- A separação entre regiões pode ser usada para classificação ou decisão.



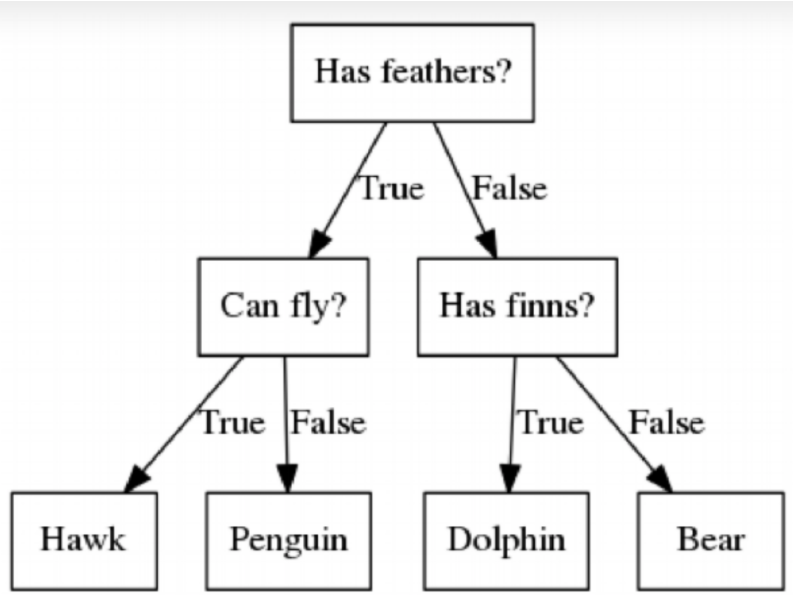
Rede semântica

- Rede semântica é um grafo relacional que descreve objetos e relações.
- **Nós:** entidades, conceitos ou instâncias.
- **Arcos:** relações entre nós.
- **Rótulos:** significado das entidades e relações.



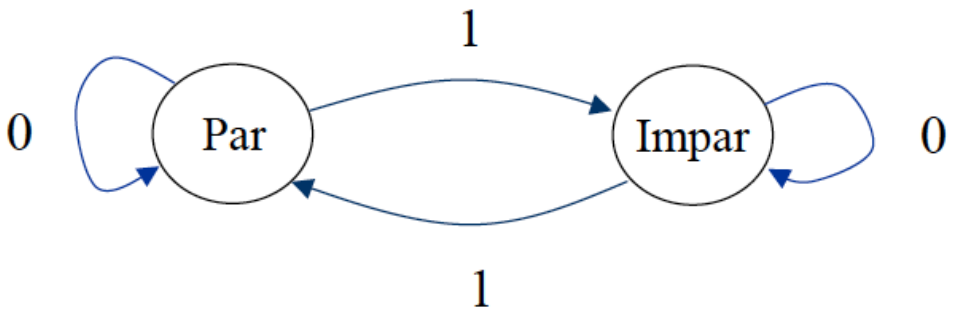
Árvores de decisão

- Uma árvore de decisão organiza testes sobre atributos.
- Cada nó interno representa uma pergunta ou condição.
- Cada ramo representa uma alternativa.
- Cada folha representa uma decisão, classe ou conclusão.



Grafos de transição de estados

- Nós representam estados possíveis do problema.
- Arcos representam ações ou transições entre estados.
- Condições podem determinar quando uma transição é aplicável.
- Esse tipo de representação será central para busca.



Regras de produção

- Regras de produção representam conhecimento na forma condição-ação ou condição-conclusão.
- Forma geral:

$$\textbf{se} \ < \text{condição} > \ \textbf{então} \ < \text{ação ou conclusão} >$$

- Exemplo:

se febre e dor no corpo então investigar infecção

Observação

Regras são interpretáveis, mas podem se tornar difíceis de manter em domínios grandes e incertos.

Frames

- Frames representam conhecimento sobre objetos, eventos ou situações típicas.
- Um frame reúne atributos, valores esperados, restrições e relações.
- São úteis quando há estruturas recorrentes em um domínio.

```
( ?
  a dog
     with [breed = ?]
          [feet   = 4]  default
          [ears   = 2] default
          [name  = ?]
          [size    = ?]
          [color   = ?] )
```

```
( dog1
  a dog
     with [breed =  dalmata]
          [feet   = 3]
          [ears   = 2] default
          [name  = Pirata]
          [size    = ?]
          [color   = preto e branco] )
```

Lógica matemática

- Representa fatos e relações por meio de fórmulas formais.
- Permite inferência por regras lógicas.
- Exemplos:
  - cálculo proposicional;
  - cálculo de predicados.
- Exemplo:

$$(\forall x)[dog(x) \Rightarrow animal(x)]$$

Modelos matemáticos

- Muitas representações em IA são numéricas ou matemáticas.
- Exemplos: matrizes, vetores, funções, coordenadas, distribuições, séries e modelos probabilísticos.
- Um modelo matemático pode representar relações entre variáveis e prever comportamentos.
- Exemplo:

$$R(x, u) = a\cos(x) + b\sin(u)$$

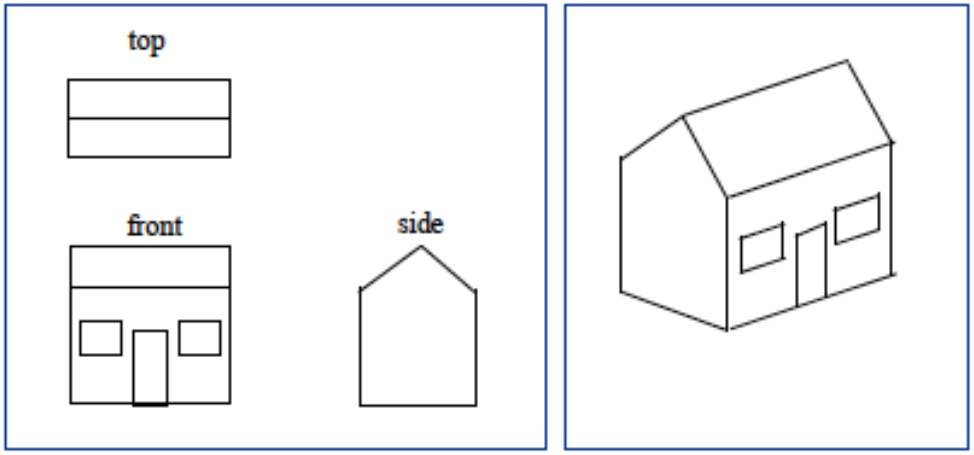
Procedimentos

- Alguns conhecimentos são melhor descritos por procedimentos.
- O foco deixa de ser apenas “o que é verdadeiro” e passa a incluir “como fazer”.
- Exemplo: uma sequência de passos para executar uma tarefa.

```
procedure boil water
 begin
    obtain a pot and put water in it
     put the pot over range burner
     turn burner on
     turn off burner when steam rises
end
```

Isomorfismos e analogias

- Algumas representações preservam relações estruturais do objeto representado.
- Mapas, ícones, diagramas e analogias podem ajudar a resolver problemas.
- A estrutura da representação facilita certas operações e dificulta outras.



Representação Realidade

Representações vetoriais e embeddings

- Um embedding representa palavras, textos, imagens ou objetos como vetores.
- A proximidade entre vetores pode indicar similaridade semântica ou funcional.
- A representação é aprendida a partir de dados, não necessariamente escrita manualmente.
- Exemplo conceitual:

$$\text{“cachorro”} \rightarrow [0.12, -0.83, \ldots, 0.41]$$

Observação

A representação vetorial pode ser útil para similaridade e generalização, mas tende a ser menos interpretável que uma regra ou uma rede semântica.

Discussão: rede semântica ou embedding?

Discussão

Uma rede semântica pode representar explicitamente que cachorro é um mamífero. Um embedding pode posicionar “cachorro” próximo de palavras ou objetos semanticamente relacionados.

- A rede semântica explicita relações.
- O embedding captura padrões distribuídos em um espaço vetorial.
- As duas formas podem apoiar tarefas diferentes.

Pergunta

Qual dessas representações você escolheria para explicar uma decisão? E para buscar textos semelhantes?

Comparando formas de representação

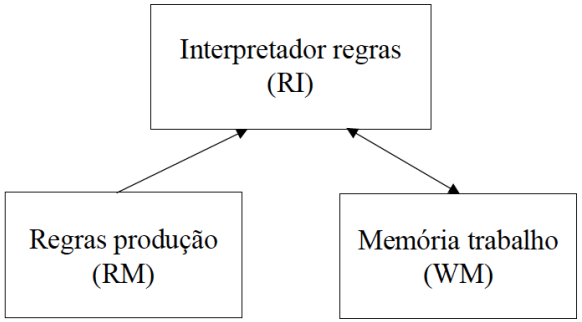
- **Regras:** interpretáveis, mas difíceis de escalar manualmente.
- **Lógica:** formal e precisa, mas pode ser rígida em ambientes incertos.
- **Grafos:** bons para relações, caminhos e dependências.
- **Árvores:** boas para decisões hierárquicas.
- **Vetores:** bons para similaridade, aprendizagem e generalização.
- **Procedimentos:** bons para tarefas com sequência operacional clara.

Pergunta

A escolha da representação pode determinar quais algoritmos se tornam possíveis?

Sistemas de produção

- Sistemas de produção usam regras para transformar estados ou derivar conclusões.
- Elementos principais:
  - memória de trabalho: estado ou fatos atuais;
  - regras de produção: conjunto de regras condição-ação;
  - interpretador de regras: escolhe e dispara regras aplicáveis.
- Aqui, eles aparecem como ponte entre representação e solução de problemas.



Atividade: escolhendo representações

Atividade

Para cada situação, indique uma representação possível e justifique:

1. recomendar disciplinas a um aluno;
2. diagnosticar uma falha em um equipamento;
3. encontrar uma rota entre duas cidades;
4. buscar documentos semelhantes a uma pergunta;
5. controlar um robô aspirador simples.

Pergunta

Em algum caso você escolheria combinar duas representações diferentes?

Ponto de parada: representação

Retomando

Até aqui, vimos que conhecimento pode ser representado de formas simbólicas, sub-simbólicas, estruturais, matemáticas ou procedimentais.

- A representação define o que pode ser consultado, inferido, comparado ou aprendido.
- Agentes orientados por metas precisam representar estados, ações e objetivos.
- Resolver problemas em IA exige transformar uma situação do mundo em uma estrutura computável.

Para pensar

Se a representação escolhida omite uma informação importante do ambiente, o agente ainda pode encontrar uma boa solução?

Retomada: da representação à busca

Retomando

Para resolver um problema, o agente precisa representar o estado inicial, as ações possíveis, os efeitos das ações e a condição que define a meta.

- A partir dessa formulação, o agente pode simular sequências de ações.
- Cada sequência leva a novos estados.
- A busca procura uma sequência que alcance a meta com custo aceitável ou mínimo.

Pergunta

Se há muitas sequências possíveis, como decidir quais caminhos explorar primeiro?

Solução de problemas

- Agentes de solução de problemas consideram sequências de ações para alcançar um estado objetivo.
- Nesta formulação inicial, assumimos ambientes mais simples:
  - agente único;
  - totalmente observável;
  - determinístico;
  - estático;
  - discreto;
  - conhecido.
- Essas hipóteses serão relaxadas em aulas posteriores.

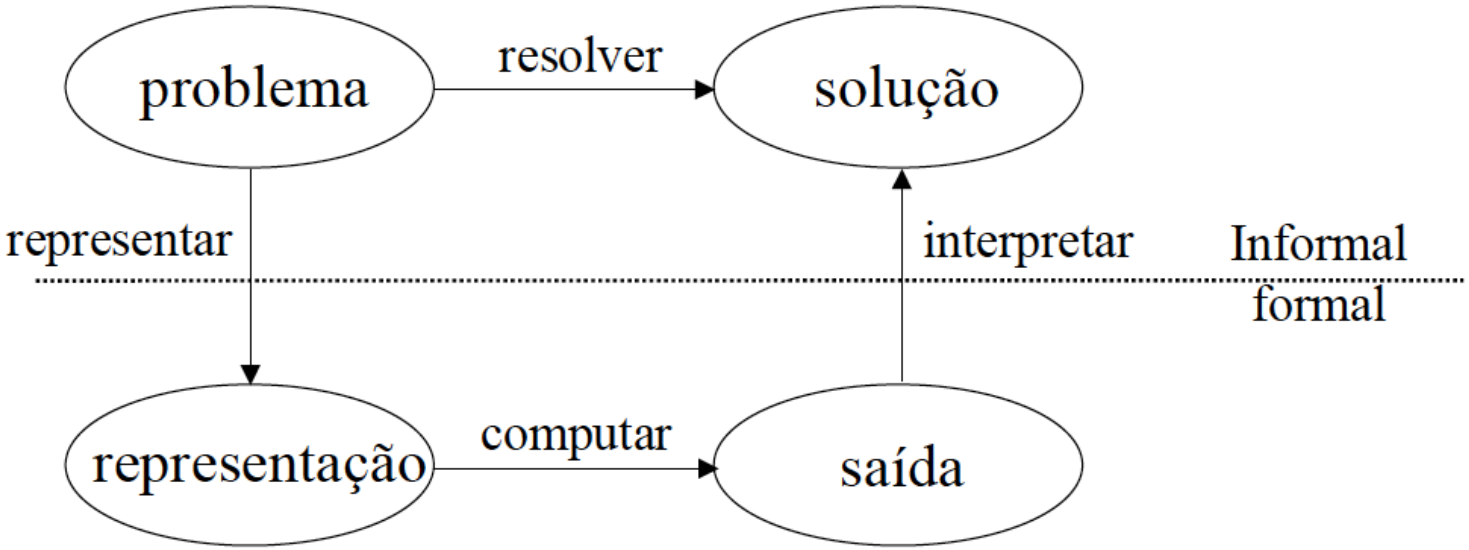
Agentes de solução de problemas

- **Formulação de metas:** define quais estados são desejáveis.
- **Formulação do problema:** descreve estados, ações, transições, meta e custo.
- **Busca:** simula sequências de ações para encontrar um caminho até a meta.
- **Execução:** aplica no ambiente a sequência de ações encontrada.

Observação

Primeiro formulamos o problema. Depois escolhemos uma estratégia de busca.

Papel das representações na solução de problemas



Pergunta

Qual é a diferença entre resolver um problema no mundo real e resolver a representação abstrata desse problema?

Circuito em malha aberta e em malha fechada

- **Malha aberta:** depois de encontrar uma solução, o agente executa a sequência de ações sem reconsiderar novas percepções.
- **Malha fechada:** o agente monitora percepções durante a execução e pode ajustar seu comportamento.
- A malha aberta é adequada para ambientes determinísticos e previsíveis.
- A malha fechada é necessária quando há incerteza, falhas ou mudanças no ambiente.

Problema de busca

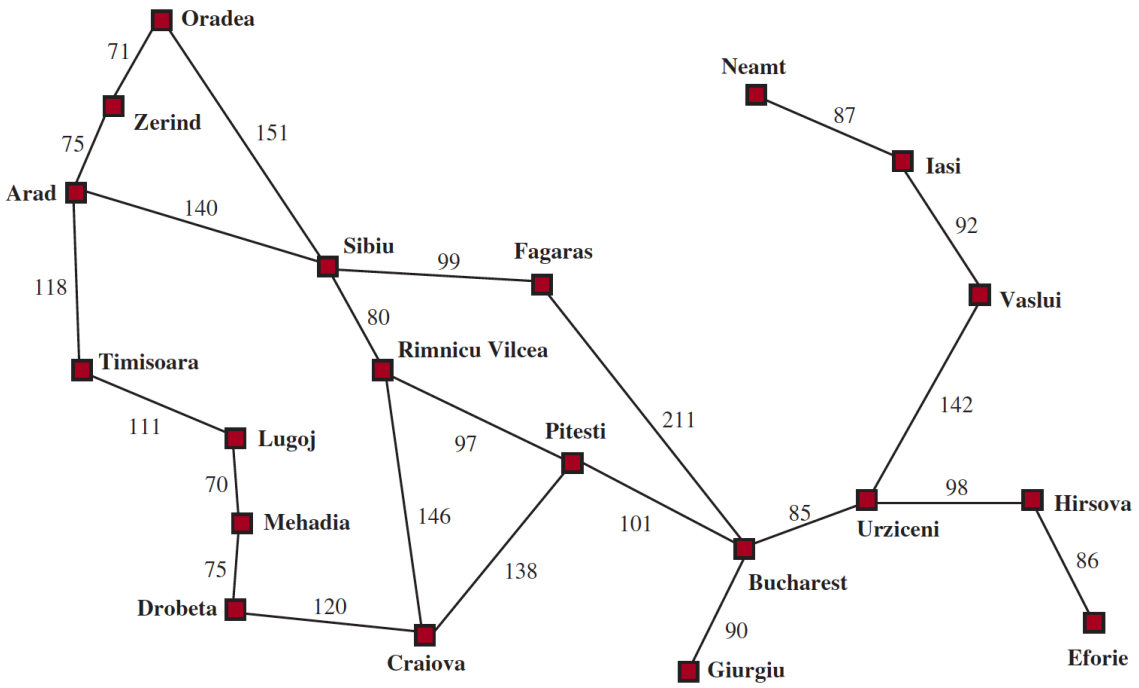
- **Espaço de estados:** conjunto de todos os estados possíveis.
- **Estado inicial:** estado em que o agente começa.
- **Estados meta:** estados que satisfazem o objetivo.
- **Ações disponíveis:** ações aplicáveis em cada estado.
- **Modelo de transição:** descreve o resultado de aplicar uma ação a um estado.
- **Teste de meta:** determina se um estado é solução.
- **Custo:** valor associado a ações ou caminhos.

Observação

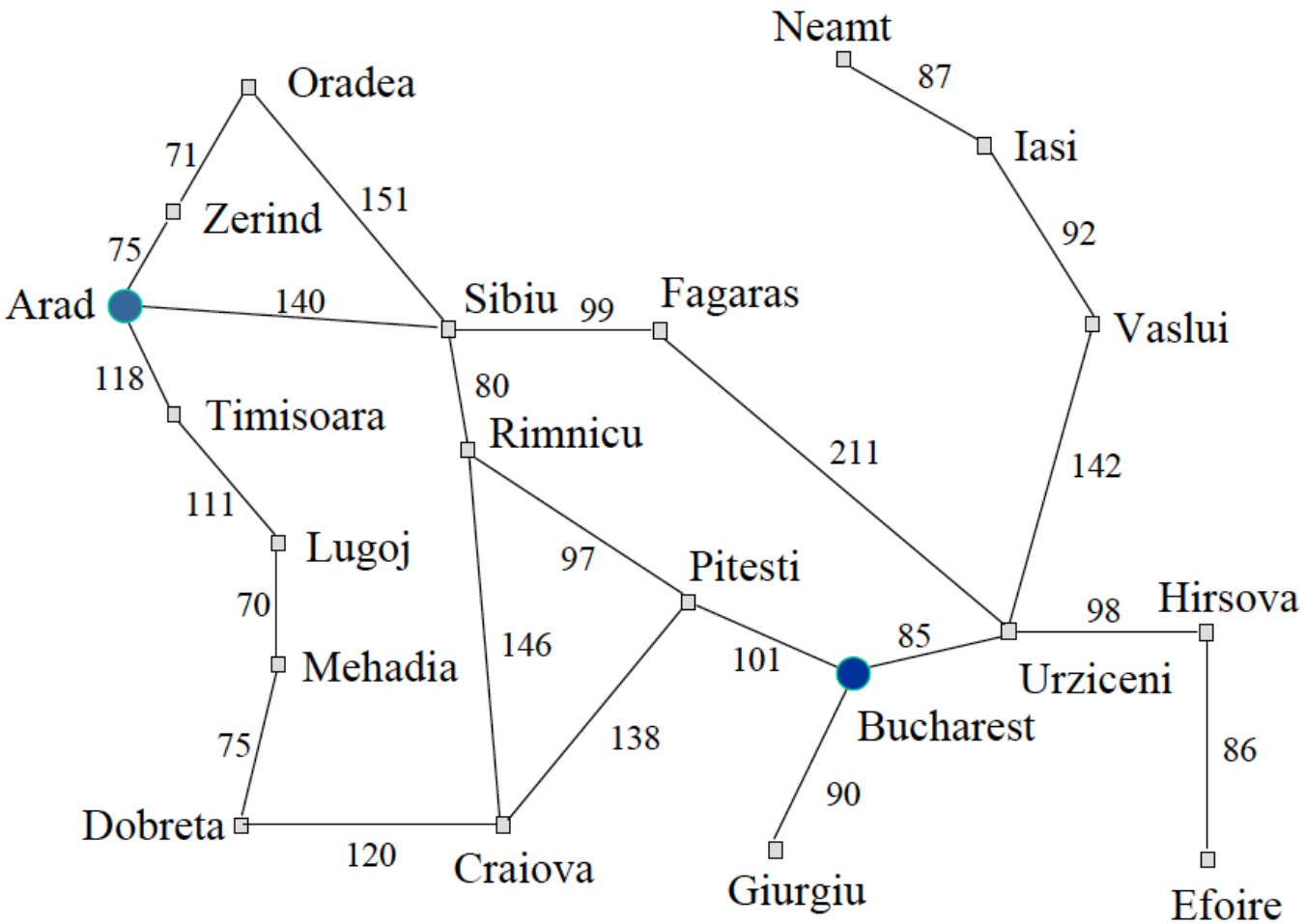
A formulação define o problema. A busca define como explorar essa formulação.

Formulação do problema

- Exemplo: chegar de Arad a Bucareste.
- **Abstração:** remover detalhes irrelevantes para tornar o problema tratável.
- Uma boa abstração remove o máximo de detalhes possível, mantendo a validade das soluções.



Exemplo: Arad para Bucareste



Arad para Bucareste: estados e ações

- **Estado inicial:** *In(Arad)*.
- **Ações aplicáveis:**

$$ACTIONS(In(Arad)) = \{go(Sibiu), go(Timisoara), go(Zerind)\}$$

- **Modelo de transição:**

$$RESULT(In(Arad), go(Zerind)) = In(Zerind)$$

- Estado inicial, ações e modelo de transição definem o espaço de estados atingível.

Arad para Bucareste: meta e custo

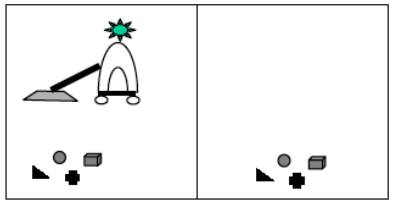
- **Teste de meta:** verifica se o estado atual é *In(Bucharest)*.
- **Custo de caminho:** soma dos custos das ações executadas.
- **Solução:** caminho do estado inicial até um estado meta.
- **Solução ótima:** solução com menor custo segundo a função definida.

Pergunta

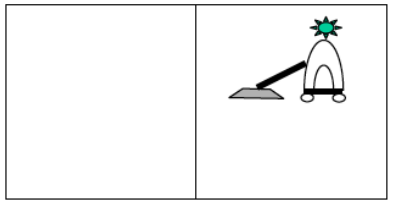
Se mudarmos o custo de distância para tempo de viagem, a solução ótima pode mudar?

Exemplo: Vacuum World

- **Estados:** posição do agente e presença de sujeira em cada local.
- **Estado inicial:** qualquer estado do ambiente.
- **Ações:** *Right*, *Left*, *Suck*.
- **Modelo de transição:** descreve o efeito de mover ou aspirar.
- **Teste de meta:** todos os locais estão limpos.
- **Custo:** número de passos ou custo energético.

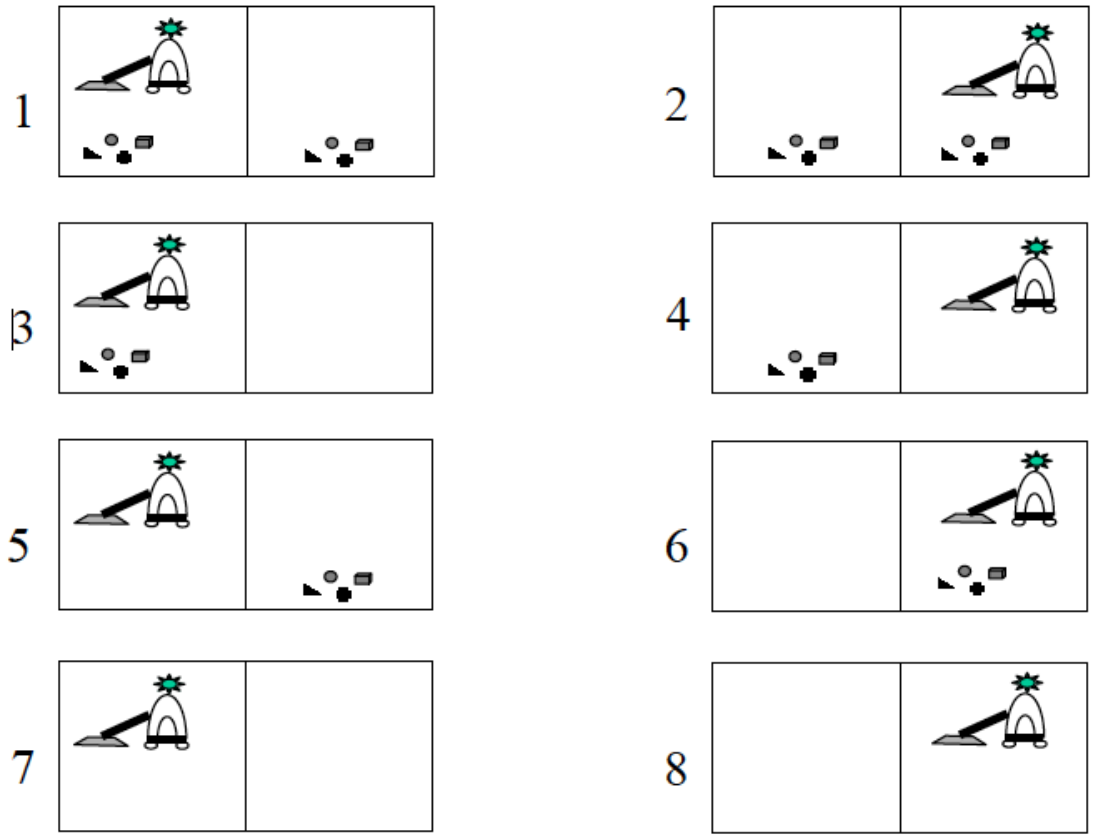


Estado inicial



Meta

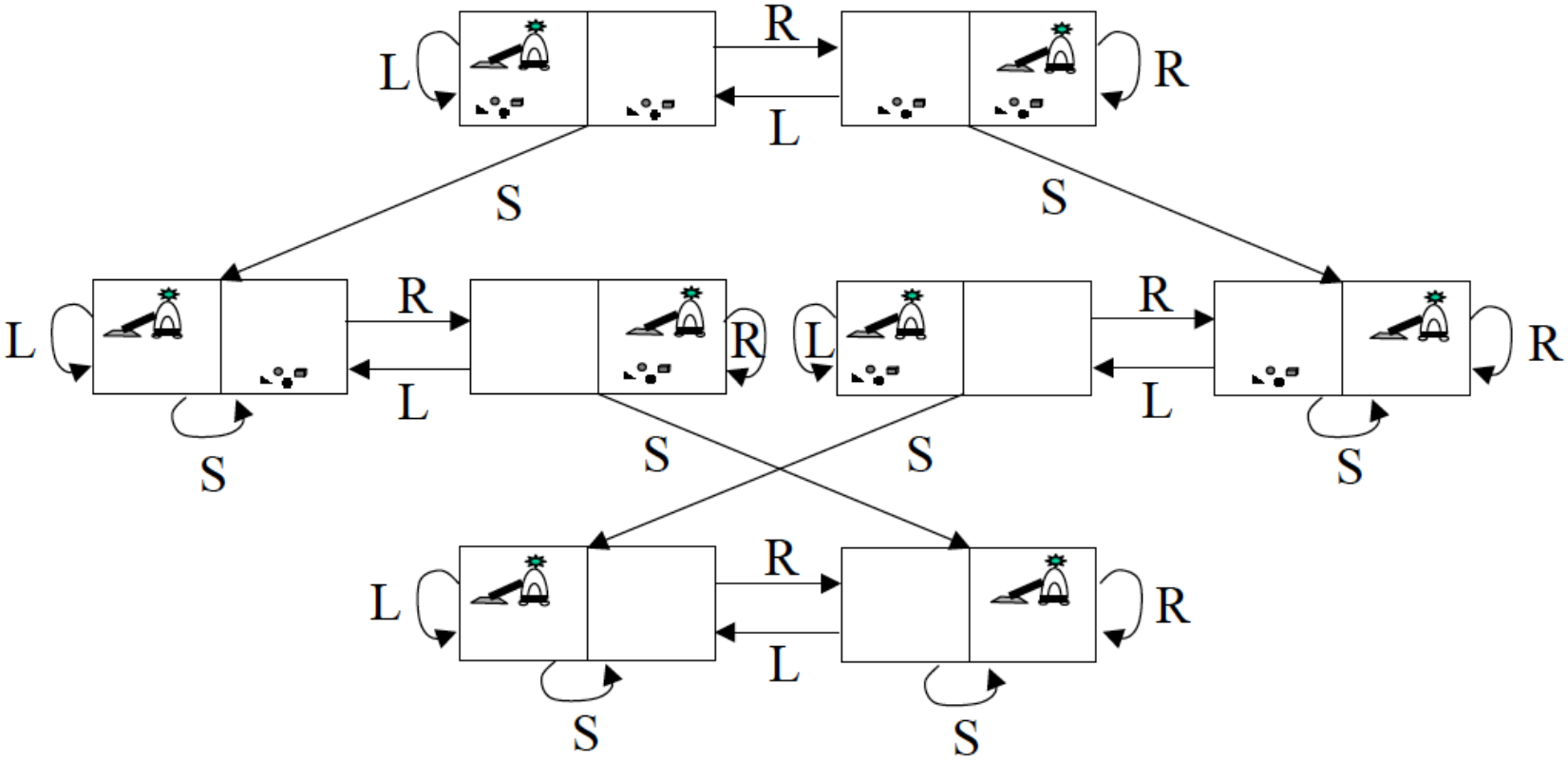
Vacuum World: espaço de estados



Pergunta

Quantos estados existem se houver mais locais no ambiente?

Vacuum World: transições



Observação

O grafo representa possibilidades; o agente ainda precisa escolher quais caminhos explorar.

Exemplo: planejamento de viagens

- **Estado inicial:** aeroporto de origem e horário atual.
- **Ações disponíveis:** pegar voos compatíveis com horário e conexões.
- **Modelo de transição:** novo aeroporto e novo horário de chegada.
- **Estado meta:** chegar à cidade de destino.
- **Custo:** preço, tempo, escalas, espera, conforto ou risco de atraso.

Pergunta

Qual solução é melhor: a mais barata, a mais rápida ou a mais confiável?

Atividade: formulando um problema

Atividade

Escolha um dos problemas abaixo e formule como problema de busca:

- encontrar uma rota entre dois pontos do campus;
- organizar uma sequência de disciplinas até a conclusão do curso;
- planejar a limpeza de salas por um robô;
- escolher uma sequência de ações em um jogo simples.

Indique: estado inicial, ações, modelo de transição, teste de meta e custo.

Do problema à busca

- Formular o problema define o espaço de estados.
- Resolver o problema exige explorar esse espaço.
- Um algoritmo de busca recebe um problema formulado e retorna uma solução ou falha.
- Diferentes estratégias de busca exploram o mesmo espaço de modos diferentes.

Pergunta

Se duas estratégias encontram soluções diferentes, como decidir qual é melhor?

Algoritmos de busca

- **Entrada:** um problema de busca formulado.
- **Saída:** uma solução ou indicação de falha.
- Uma solução é uma sequência de ações do estado inicial até uma meta.
- A qualidade da solução depende do custo definido no problema.

Observação

Nesta aula, a busca aparece como mecanismo geral. As estratégias específicas serão aprofundadas na Aula 4.

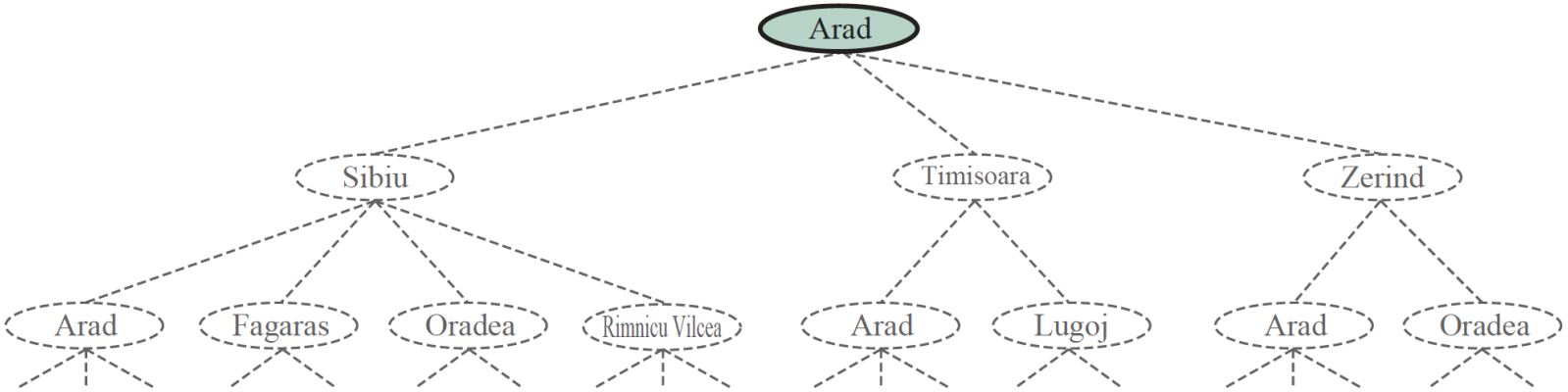
Espaço de estados $\neq$ árvore de busca

- **Espaço de estados:** descreve os estados e as transições possíveis.
- **Árvore de busca:** descreve os caminhos considerados pelo algoritmo durante a exploração.
- O mesmo estado pode aparecer mais de uma vez na árvore de busca por caminhos diferentes.

Pergunta

Por que representar caminhos é diferente de representar apenas estados?

Árvore de busca

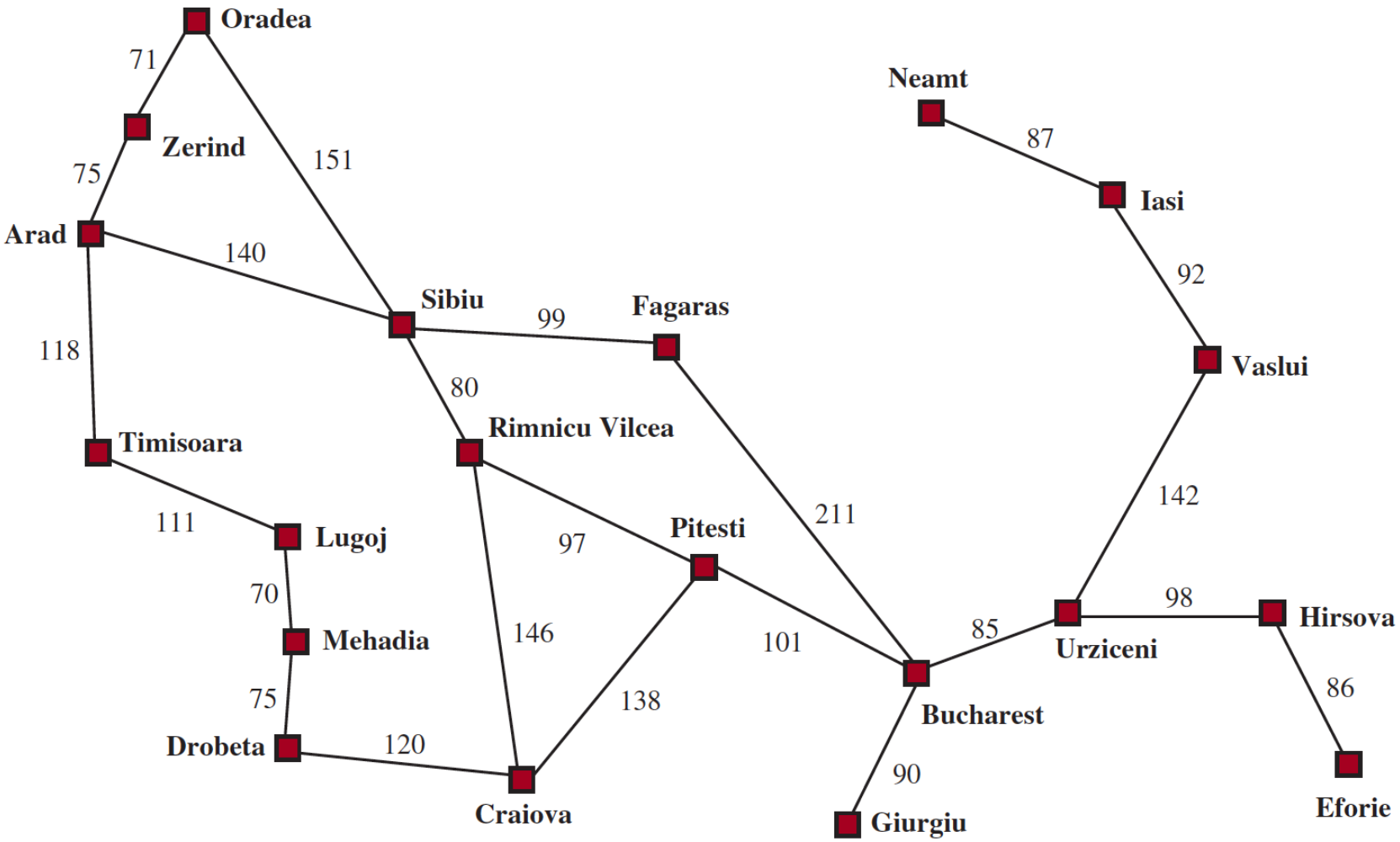


- A raiz corresponde ao estado inicial.
- Expandir um nó significa aplicar ações possíveis e gerar sucessores.
- A estratégia de busca define qual nó será expandido em seguida.

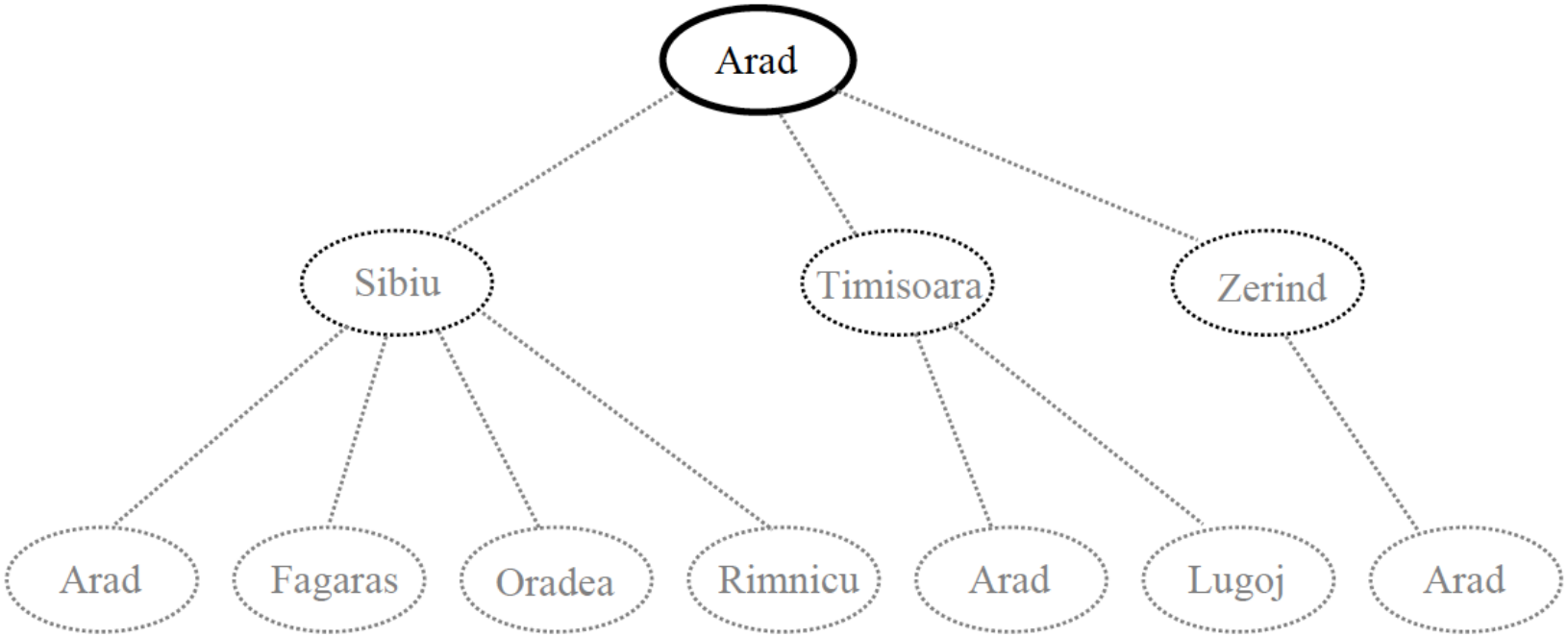
Conceitos básicos de busca

- **Nó:** elemento da árvore de busca associado a um estado, um pai, uma ação e um custo.
- **Nó folha:** nó ainda não expandido.
- **Fronteira:** conjunto de nós folha disponíveis para expansão.
- **Conjunto explorado:** nós ou estados já expandidos.
- **Estratégia de busca:** critério usado para escolher o próximo nó da fronteira.

Caminho Arad-Bucareste

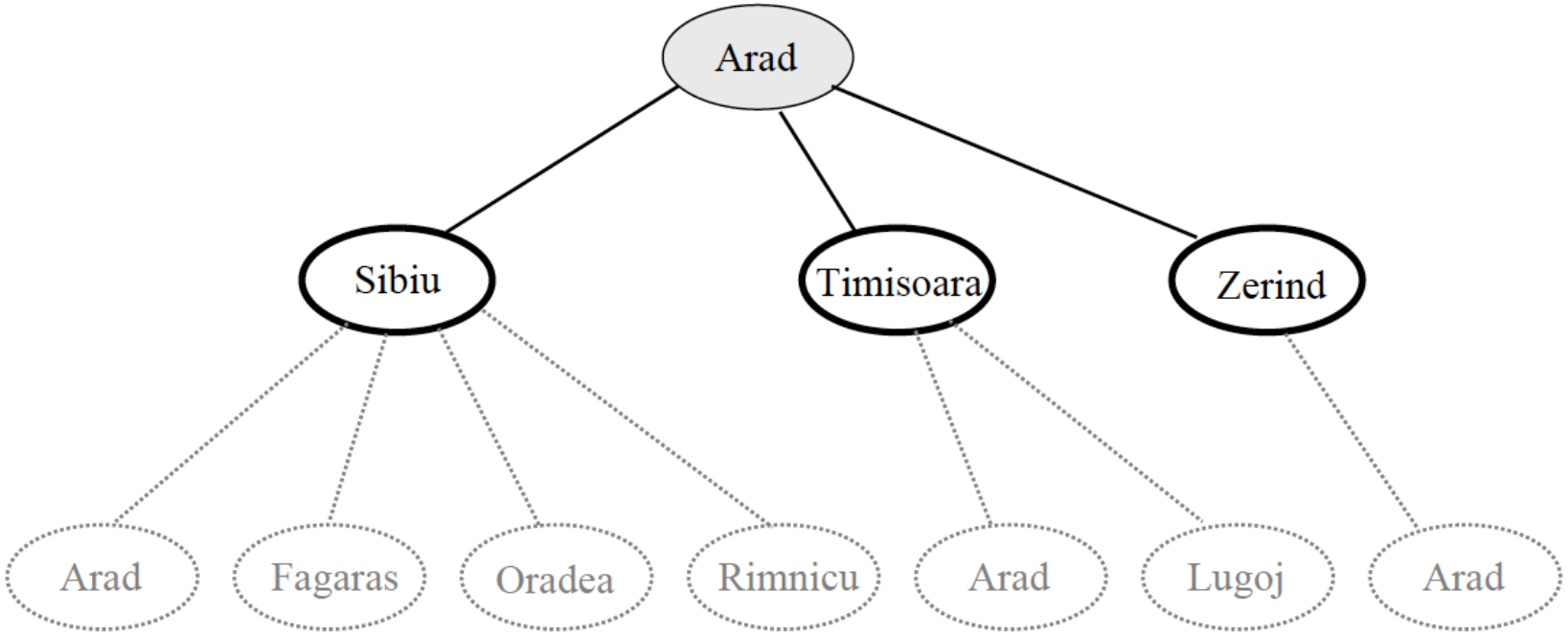


Estado inicial: In(Arad)



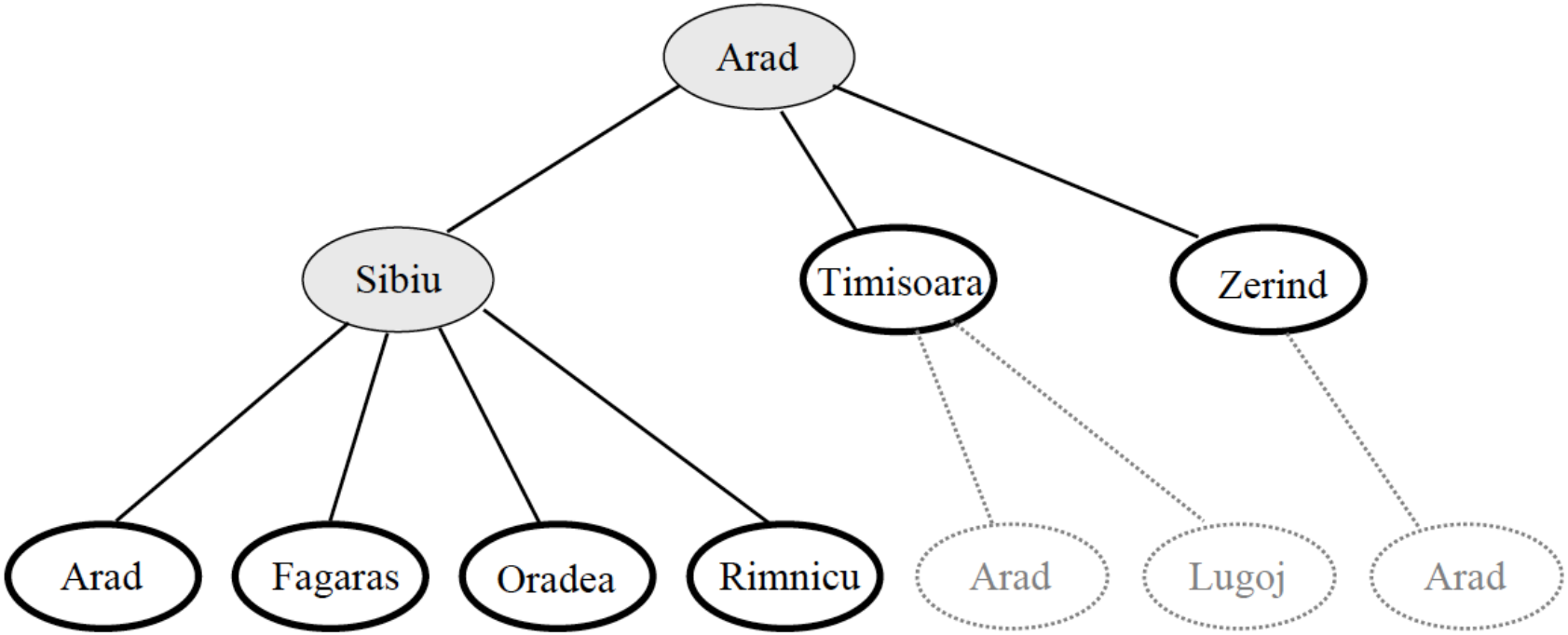
- A árvore de busca começa com um único nó: o estado inicial.

Expansão de In(Arad)



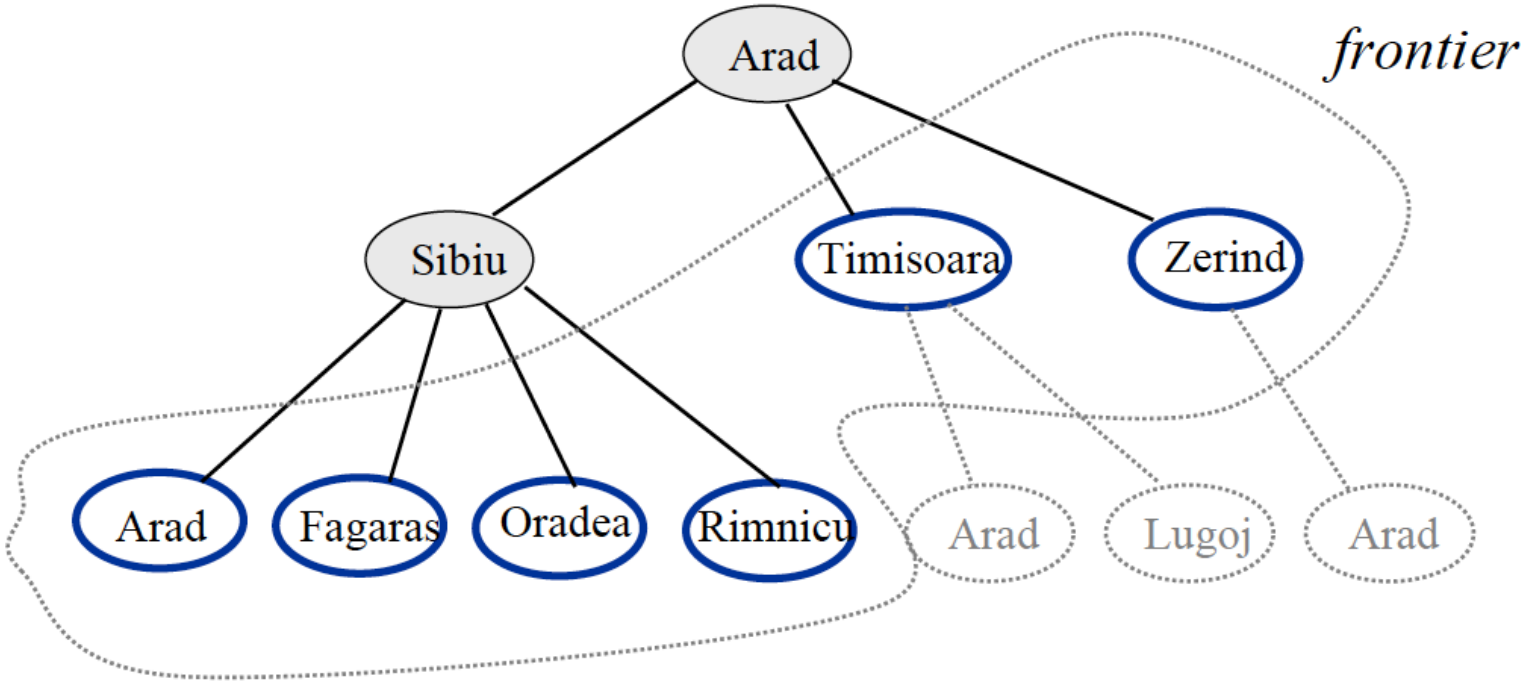
- Expandir o nó gera sucessores correspondentes às ações aplicáveis.

Expansão de In(Sibiu)



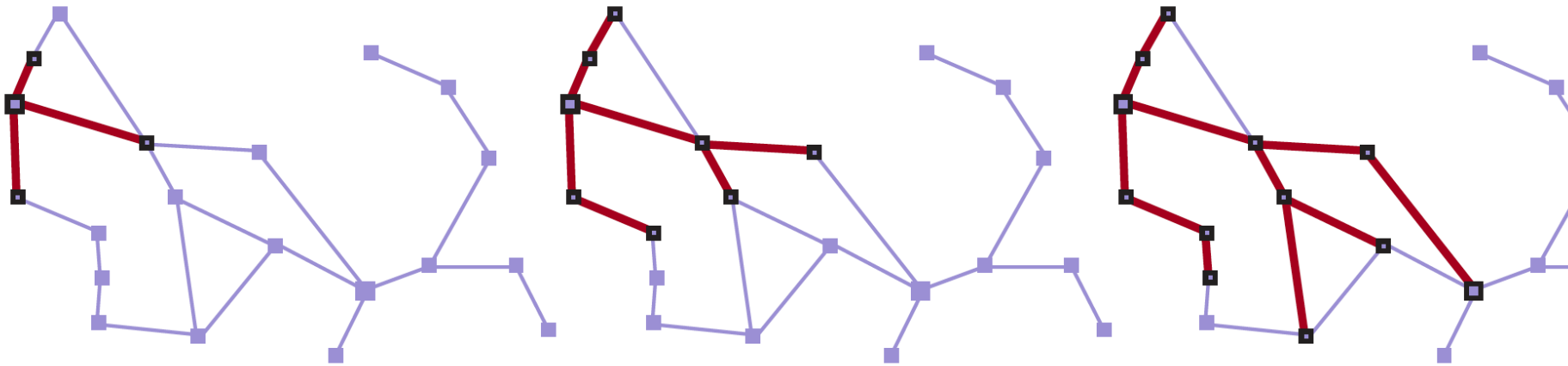
- A árvore cresce conforme novos nós são selecionados e expandidos.

Fronteira



- A fronteira contém os nós ainda não expandidos.
- A forma de escolher um nó da fronteira define a estratégia de busca.

Sequência de árvores de busca



Pergunta

A cada expansão, o algoritmo está mais próximo da meta ou apenas conhece mais possibilidades?

Estrutura de dados de um nó

- $n.STATE$: estado do espaço de estados correspondente ao nó n.
- $n.PARENT$: nó da árvore que gerou n.
- $n.ACTION$: ação aplicada ao pai para gerar n.
- $n.PATH\text{-}COST$: custo do caminho da raiz até n, denotado por $g(n)$.

Observação

O nó armazena informações sobre o caminho, não apenas sobre o estado.

Estrutura da fronteira

- *IS-EMPTY*: verifica se a fronteira está vazia.
- *POP*(*frontier*): remove e retorna o próximo nó escolhido.
- *TOP*(*frontier*): consulta o próximo nó sem removê-lo.
- *ADD*(*node*, *frontier*): insere um nó na fronteira.

Pergunta

O que muda se a fronteira for organizada como fila FIFO, pilha LIFO ou fila de prioridade?

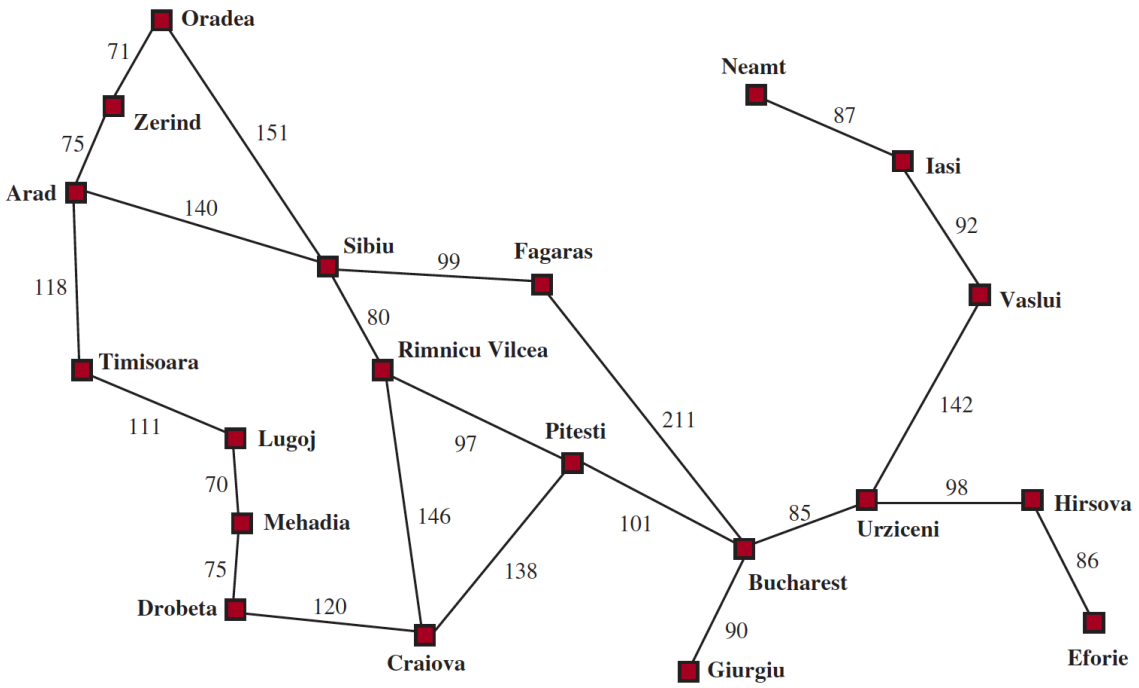
Tipos de fronteira

- **FIFO queue:** primeiro nó inserido é o primeiro removido.
- **LIFO queue:** último nó inserido é o primeiro removido.
- **Priority queue:** o nó removido depende de uma prioridade definida.
- Essas estruturas dão origem a estratégias de busca diferentes.

Observação

A Aula 4 aprofunda as consequências de cada escolha: largura, profundidade, custo uniforme, busca gulosa e A*.

Caminhos redundantes e laços



- Um mesmo estado pode ser alcançado por caminhos diferentes.
- Laços podem fazer o algoritmo revisitar estados sem necessidade.
- Busca em grafo controla estados já explorados; busca em árvore pode não controlar redundâncias.

O que fica para a próxima aula?

- Nesta aula, o objetivo é entender a formulação do problema e a mecânica geral da busca.
- Na próxima aula, discutiremos estratégias de busca:
  - busca em largura;
  - busca de custo uniforme;
  - busca em profundidade;
  - busca informada;
  - heurísticas e A*.
- A pergunta passa a ser: qual nó da fronteira deve ser expandido primeiro?

Atividade final de discussão

Atividade

Considere um agente que precisa planejar uma rota entre dois pontos do campus.

1. Defina estado inicial, ações, modelo de transição, teste de meta e custo.
2. Desenhe uma parte do espaço de estados.
3. Explique o que seria um nó da árvore de busca.
4. Defina o que ficaria na fronteira após a primeira expansão.
5. Indique uma situação em que caminhos redundantes poderiam aparecer.

Síntese

- Representar conhecimento permite interpretar, consultar, inferir, prever e agir.
- Representações podem ser simbólicas, sub-simbólicas, matemáticas, procedimentais ou estruturais.
- Um problema de busca é definido por estado inicial, ações, modelo de transição, teste de meta e custo.
- Espaço de estados e árvore de busca não são a mesma coisa.
- A fronteira define quais possibilidades ainda podem ser exploradas.

Ponto de parada: para a Aula 4

Retomando

Agora sabemos formular problemas e representar a busca como exploração de uma árvore sobre um espaço de estados.

- O espaço de busca pode crescer rapidamente.
- A ordem de expansão dos nós altera tempo, memória, completude e qualidade da solução.
- A próxima etapa é estudar estratégias para escolher o próximo nó da fronteira.

Para pensar

Uma estratégia que encontra uma solução rapidamente encontra necessariamente a melhor solução?

Dúvidas

Dúvida é o começo da sabedoria.