



# INF 1771 – Inteligência Artificial

## Aula 10 – Planejamento

Edirlei Soares de Lima  
<elima@inf.puc-rio.br>

# Agentes Vistos Anteriormente

- **Agentes Baseados em Busca.**
  - Busca cega;
  - Busca heurística;
  - Busca local;
- **Agentes Lógicos.**
  - Lógica proposicional;
  - Lógica de primeira ordem;
  - Prolog;

# Planejamento

- **Planejamento** consiste na tarefa de apresentar uma sequência de ações para alcançar um determinado objetivo.

Ir(Mercado), Comprar(Biscoito), Ir(Farmácia), Comprar(Remédio), Ir(Casa)

- Dado um objetivo, um **agente planejador** deve ser capaz de construir um plano de ação para chegar ao seu objetivo.
- Após planejar, o agente deve **executar as ações do plano** uma a uma.

# Funcionamento de um Agente Planejador

- Inicialmente um agente planejador **gera um objetivo** a alcançar.
- **Constrói um plano** para atingir o objetivo a partir do estado atual do ambiente.
- **Executa o plano** do começo ao fim.
- **Gera um novo objetivo** com base no novo estado do ambiente.

# Planejamento

- Em **planejamento clássico** o ambiente do problema possui as seguintes características:
  - Observável
  - Determinístico
  - Finito
  - Estático

# Resolução de Problemas X Planejamento

- **Algoritmos de busca** tendem a tomar ações irrelevantes.
  - Grande fator de ramificação.
  - Pouco conhecimento para guiar a busca.
- **Planejador** não considera ações irrelevantes.
  - Faz conexões diretas entre estados (sentenças) e ações (pré-condições + efeitos)
  - Objetivo: Ter(Leite).
    - Ação: Comprar(Leite) => Ter(Leite)

# Resolução de Problemas X Planejamento

- Em problemas do mundo real é difícil definir uma boa heurística para **algoritmos de busca heurística**.
- Um **planejador** tem acesso a representação explícita do objetivo.
  - Objetivo: conjunção de sub-objetivos que levam ao objetivo final.
  - Heurística **única**: número de elementos da conjunção não-satisfeitos.

# Resolução de Problemas X Planejamento

- **Algoritmos de busca** não tiram proveito da decomposição do problema.
- **Planejadores** aproveitam a estrutura do problema. É possível decompor com facilidade sub-objetivos.
  - Exemplo:  $\text{Ter}(A) \wedge \text{Ter}(B) \wedge \text{Ter}(C) \wedge \text{Ter}(D)$



# Linguagem STRIPS

- **Linguagem formal** para a especificação de problemas de planejamento.
- **Representação de estados:** conjunção de literais positivos sem variáveis.
  - **Inicial:** Em(Casa)
  - **Final:** Em(Casa)  $\wedge$  Ter(Leite)  $\wedge$  Ter(Bananas)  $\wedge$  Ter(Furadeira)
  - **Hipótese do mundo fechado:** qualquer condição não mencionada em um estado é considerada negativa.
    - Exemplo:  $\neg$ Ter(Leite)  $\wedge$   $\neg$ Ter(Bananas)  $\wedge$   $\neg$ Ter(Furadeira)

# Linguagem STRIPS

- **Objetivos:** conjunção de literais e possivelmente variáveis:
  - $\text{Em}(\text{Casa}) \wedge \text{Ter}(\text{Leite}) \wedge \text{Ter}(\text{Bananas}) \wedge \text{Ter}(\text{Furadeira})$
  - $\text{Em}(x) \wedge \text{Vende}(x, \text{Leite})$
- **Ações** são especificadas em termos de pré-condições e efeitos:
  - **Descritor da ação:** predicado lógico
  - **Pré-condição:** conjunção de literais positivos
  - **Efeito:** conjunção de literais (positivos ou negativos)

# Linguagem STRIPS

- Operador para ir de um lugar para outro:

**Ação** Ir(Destino),

**Pré-condição** Em(Partida)  $\wedge$  Caminho(Partida, Destino),

**Efeito** Em(Destino)  $\wedge$   $\neg$  Em(Partida))

# Exemplo – Transporte Aéreo de Carga

Início( $\text{Em}(C1, \text{SFO}) \wedge \text{Em}(C2, \text{JFK}) \wedge \text{Em}(A1, \text{SFO}) \wedge \text{Em}(A2, \text{JFK}) \wedge \text{Carga}(C1) \wedge \text{Carga}(C2) \wedge \text{Avião}(A1) \wedge \text{Avião}(A2) \wedge \text{Aeroporto}(\text{JFK}) \wedge \text{Aeroporto}(\text{SFO})$ )

Objetivo( $\text{Em}(C1, \text{JFK}) \wedge \text{Em}(C2, \text{SFO})$ )

Ação(**Carregar**( $c, a, l$ ))

PRÉ-CONDIÇÃO:  $\text{Em}(c, l) \wedge \text{Em}(a, l) \wedge \text{Carga}(c) \wedge \text{Avião}(a) \wedge \text{Aeroporto}(l)$

EFEITO:  $\neg \text{Em}(c, l) \wedge \text{Dentro}(c, a)$

Ação(**Descarregar**( $c, a, l$ ))

PRÉ-CONDIÇÃO:  $\text{Dentro}(c, a) \wedge \text{Em}(a, l) \wedge \text{Carga}(c) \wedge \text{Avião}(a) \wedge \text{Aeroporto}(l)$

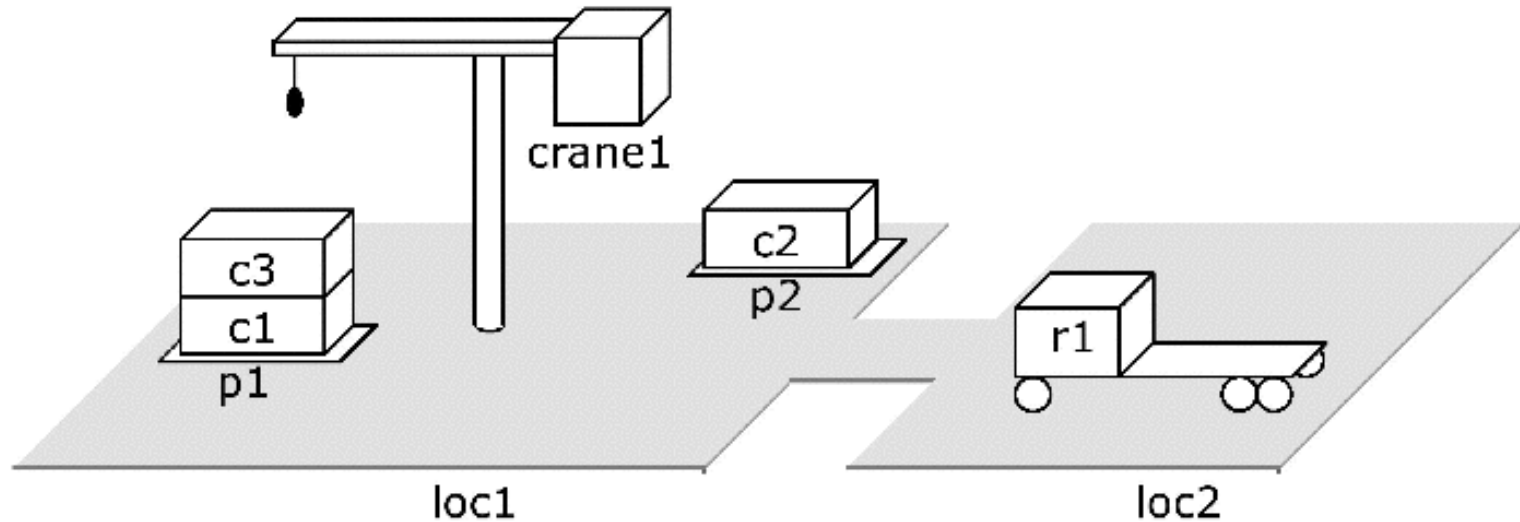
EFEITO:  $\text{Em}(c, l) \wedge \neg \text{Dentro}(c, a)$

Ação(**Voar**( $a, de, para$ ))

PRÉ-CONDIÇÃO:  $\text{Em}(a, de) \wedge \text{Avião}(a) \wedge \text{Aeroporto}(de) \wedge \text{Aeroporto}(para)$

EFEITO:  $\neg \text{Em}(a, de) \wedge \text{Em}(a, para)$

# Exemplo – Doca Automatizada



Exemplo de Estado:

$s_1 = \{ \text{attached}(p1, loc1), \text{in}(c1, p1), \text{in}(c3, p1), \text{top}(c3, p1), \text{on}(c3, c1), \text{on}(c1, \text{pallet}), \text{attached}(p2, loc1), \text{in}(c2, p2), \text{top}(c2, p2), \text{on}(c2, \text{pallet}), \text{belong}(\text{crane1}, loc1), \text{empty}(\text{crane1}), \text{adjacent}(loc1, loc2), \text{adjacent}(loc2, loc1), \text{at}(r1, loc2), \text{occupied}(loc2), \text{unloaded}(r1) \}$ .

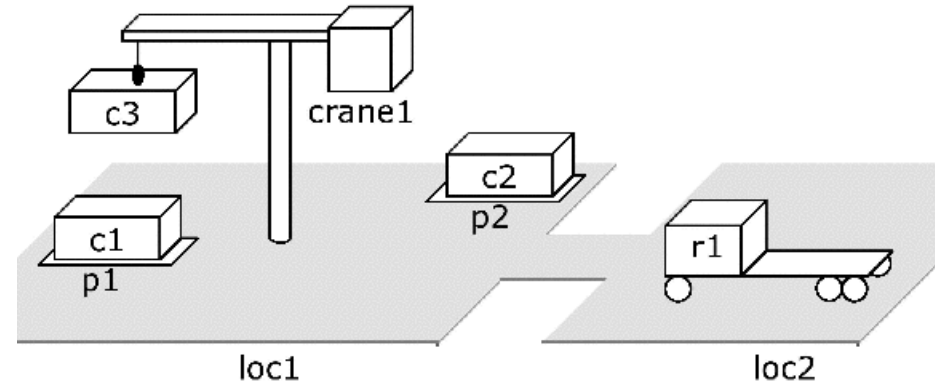
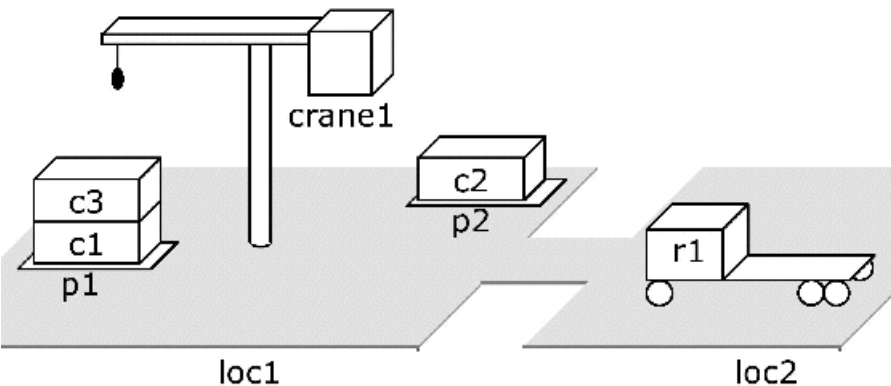
# Exemplo – Doca Automatizada

```
take(crane1,loc1,c3,c1,p1)
```

```
;; crane crane1 at location loc1 takes c3 off c1 in pile p1
```

```
precond: belong(crane1,loc1), attached(p1,loc1),  
empty(crane1), top(c3,p1), on(c3,c1)
```

```
effects: holding(crane1,c3), ¬empty(crane1), ¬in(c3,p1),  
¬top(c3,p1), ¬on(c3,c1), top(c1,p1)
```



# Exemplo – Doca Automatizada

$move(r, l, m)$

;; robot  $r$  moves from location  $l$  to location  $m$

precond:  $adjacent(l, m), at(r, l), \neg occupied(m)$

effects:  $at(r, m), occupied(m), \neg occupied(l), \neg at(r, l)$

$load(k, l, c, r)$

;; crane  $k$  at location  $l$  loads container  $c$  onto robot  $r$

precond:  $belong(k, l), holding(k, c), at(r, l), unloaded(r)$

effects:  $empty(k), \neg holding(k, c), loaded(r, c), \neg unloaded(r)$

$unload(k, l, c, r)$

;; crane  $k$  at location  $l$  takes container  $c$  from robot  $r$

precond:  $belong(k, l), at(r, l), loaded(r, c), empty(k)$

effects:  $\neg empty(k), holding(k, c), unloaded(r), \neg loaded(r, c)$

$put(k, l, c, d, p)$

;; crane  $k$  at location  $l$  puts  $c$  onto  $d$  in pile  $p$

precond:  $belong(k, l), attached(p, l), holding(k, c), top(d, p)$

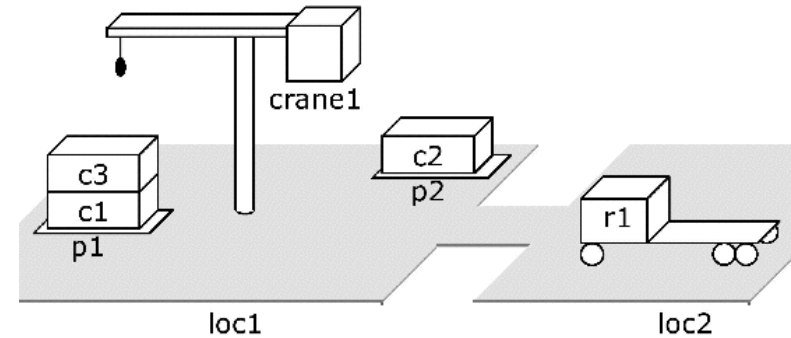
effects:  $\neg holding(k, c), empty(k), in(c, p), top(c, p), on(c, d), \neg top(d, p)$

$take(k, l, c, d, p)$

;; crane  $k$  at location  $l$  takes  $c$  off of  $d$  in pile  $p$

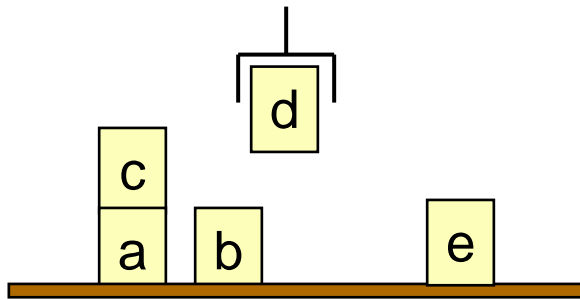
precond:  $belong(k, l), attached(p, l), empty(k), top(c, p), on(c, d)$

effects:  $holding(k, c), \neg empty(k), \neg in(c, p), \neg top(c, p), \neg on(c, d), top(d, p)$

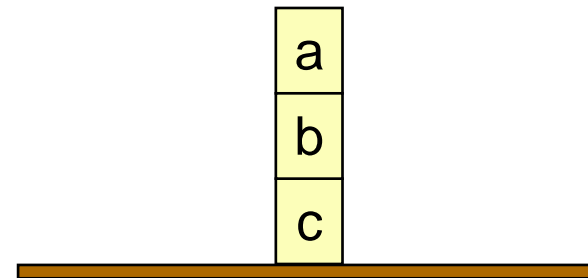


# Exemplo - Mundo dos Blocos

- Mesa infinitamente larga, número finito de blocos;
- Ignora a posição em que um bloco está sobre a mesa;
- Um bloco pode estar sobre a mesa ou sobre um outro bloco;
- Os blocos devem ser movidos de uma configuração para outra;



Estado Inicial



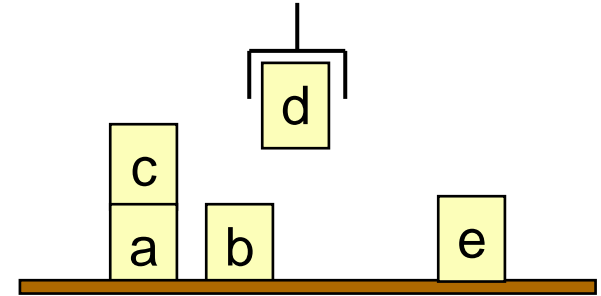
Estado Objetivo



# Exemplo - Mundo dos Blocos

- **Símbolos constantes:**

- Os blocos: a, b, c, d, e



- **Predicados:**

- `ontable(x)` - bloco x está sobre a mesa
- `on(x,y)` - bloco x está sobre o bloco y
- `clear(x)` - bloco x não tem nada sobre ele
- `holding(x)` - a garra do robô está segurando o bloco x
- `handempty` - a garra do robô não está segurando nada

# Exemplo - Mundo dos Blocos

- Operadores:

**unstack(x,y)**

Precond:  $on(x,y)$ ,  $clear(x)$ ,  $handempty$   
Effects:  $\sim on(x,y)$ ,  $\sim clear(x)$ ,  $\sim handempty$ ,  
 $holding(x)$ ,  $clear(y)$

**stack(x,y)**

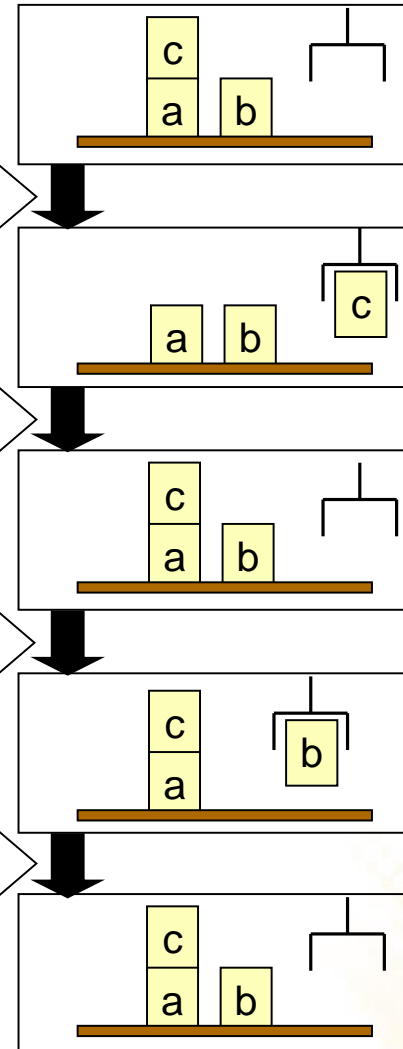
Precond:  $holding(x)$ ,  $clear(y)$   
Effects:  $\sim holding(x)$ ,  $\sim clear(y)$ ,  
 $on(x,y)$ ,  $clear(x)$ ,  $handempty$

**pickup(x)**

Precond:  $ontable(x)$ ,  $clear(x)$ ,  $handempty$   
Effects:  $\sim ontable(x)$ ,  $\sim clear(x)$ ,  
 $\sim handempty$ ,  $holding(x)$

**putdown(x)**

Precond:  $holding(x)$   
Effects:  $\sim holding(x)$ ,  $ontable(x)$ ,  
 $clear(x)$ ,  $handempty$



# Tipos de Planejadores

- Formas de Buscas de Planos:
  - **Progressivo:** estado inicial -> objetivo.
  - **Regressivo:** objetivo -> estado inicial.
    - mais eficiente (há menos caminhos partindo do objetivo do que do estado inicial)
- Espaços de busca:
  - **Espaço de situações:** Funciona da mesma forma que na resolução de problemas por meio de busca.
  - **Espaço de planos:** planos parciais.
    - mais flexível.

# Planejamento Progressivo

Forward-search( $O, s_0, g$ )

$s \leftarrow s_0$

$\pi \leftarrow$  the empty plan

loop

if  $s$  satisfies  $g$  then return  $\pi$

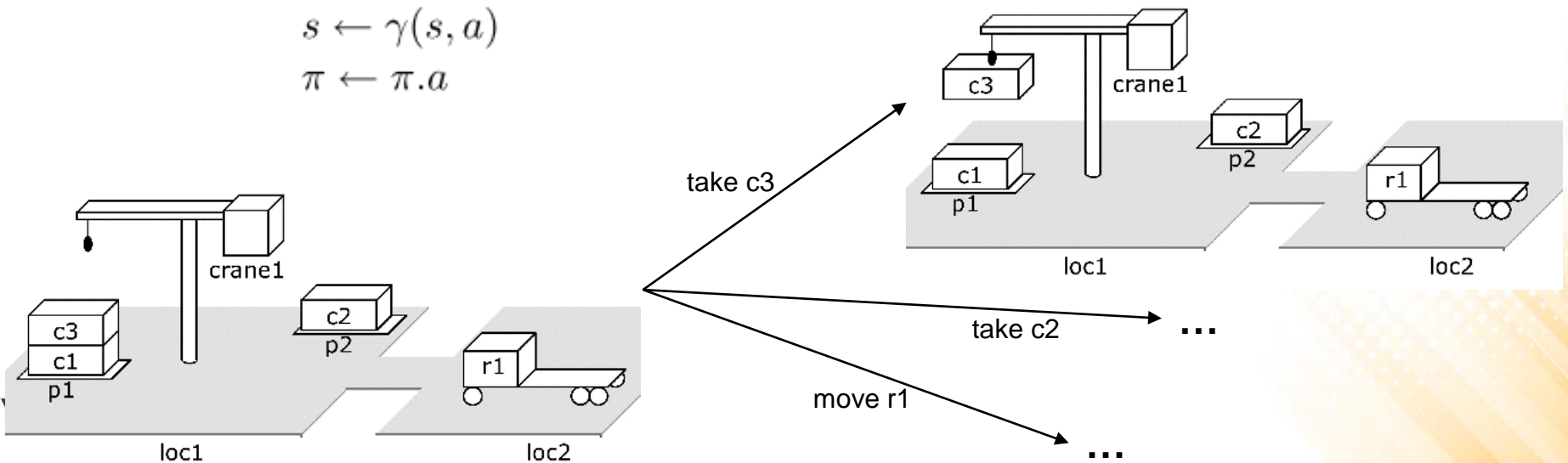
$E \leftarrow \{a \mid a \text{ is a ground instance an operator in } O,$   
and  $\text{precond}(a) \text{ is true in } s\}$

if  $E = \emptyset$  then return failure

nondeterministically choose an action  $a \in E$

$s \leftarrow \gamma(s, a)$

$\pi \leftarrow \pi.a$



# Planejamento Progressivo

- **Algoritmos de busca clássicos:**
  - Busca em profundidade;
  - Busca em largura;
  - Busca de custo uniforme;
- Pode ter um fator de ramificação muito grande.

# Planejamento Regressivo

Backward-search( $O, s_0, g$ )

$\pi \leftarrow$  the empty plan

loop

if  $s_0$  satisfies  $g$  then return  $\pi$

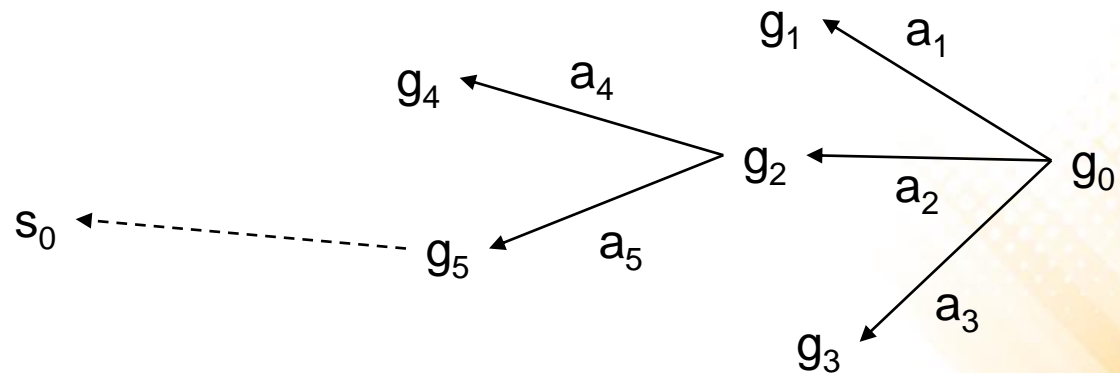
$A \leftarrow \{a \mid a \text{ is a ground instance of an operator in } O$   
and  $\gamma^{-1}(g, a)$  is defined}

if  $A = \emptyset$  then return failure

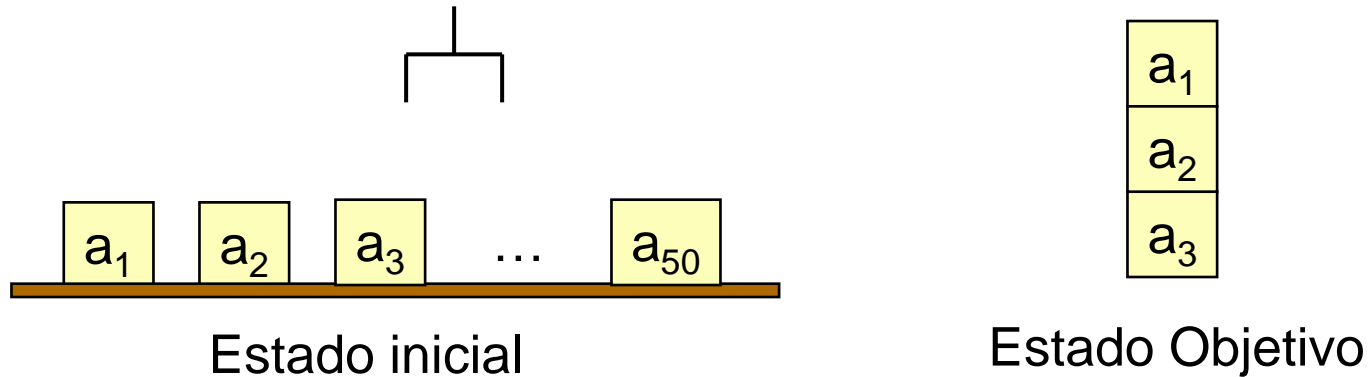
nondeterministically choose an action  $a \in A$

$\pi \leftarrow a.\pi$

$g \leftarrow \gamma^{-1}(g, a)$



# Planejamento Regresivo



- O fator de ramificação da busca para trás é menor, mas existem casos onde pode ainda ser muito grande.
  - Muitas instâncias de operadores são avaliadas.

# Planning Domain Definition Language (PDDL)

- **Linguagem formal** para a codificação de problemas de planejamento clássicos.
  - Baseada no modelo STRIPS
- Possui varias versões com a incorporação de novas características.
  - 1.2 - Versão básica ([Manual](#))
  - 2.1 - Funções e métricas ([Manual](#))
  - 3.1 - Versão atual ([Manual](#))



# Planning Domain Definition Language (PDDL)

- **Componentes da linguagem PDDL:**
  - **Objetos:** objetos que compõem o problema de planejamento.
  - **Predicados:** propriedades dos objetos – podem ser verdadeiros ou falsos.
  - **Estado Inicial:** estado do mundo onde o processo de planejamento se inicia.
  - **Objetivos:** predicados que devem ser verdade para concluir o processo de planejamento.
  - **Ações/Operadores:** ações que podem ser executadas e modificam o estado do mundo.

# PDDL - Exemplo

- *“Existe um robô que pode se mover entre duas salas, pegar e soltar caixas com ambas as suas mãos. Inicialmente, o robô e 4 caixas estão na sala 1. O objetivo é que o robô leve as caixas para a sala 2.”*

# PDDL – Domain & Problem

- Tarefas de planejamento especificadas em PDDL são separadas em dois arquivos:
  - **Domain File:** tipos, predicados e ações.
  - **Problem File:** objetos, estado inicial e objetivos.

# PDDL - Domain File

- Sintaxe:

```
(define (domain <domain name>)
  (:requirements :strips :equality :typing)
  (:types <list of types>)
  (:constants <list of constants>)
  <PDDL code for predicates>
  <PDDL code for first action>
  [...]
  <PDDL code for last action>
)
```

# PDDL – Types & Constants

- **Tipos:** sala, caixa, braço
- **PDDL:**  
`(:types room box arm)`
- **Constantes** – objetos que podem ser usados no arquivos de domínio.
- **PDDL:**  
`(:constants left right - arm)`

# PDDL - Predicates

- **Predicados:**

- robot-at(x) – verdadeiro se o robô estiver na sala x
- box-at(x, y) – verdadeiro se a caixa x estiver na sala y
- free(x) – verdadeiro se o braço x não estiver segurando uma caixa
- carry(x, y) – verdadeiro se o braço y estiver segurando a caixa x

- **PDDL:**

```
(:predicates  
  (robot-at ?x - room)  
  (box-at ?x - box ?y - room)  
  (free ?x - arm)  
  (carry ?x - box ?y - arm)  
)
```

# PDDL - Actions

- **Descrição:** O robô se move da sala x para a sala y.
- **Precondição:** robot-at(x) ser verdade.
- **Efeito:** robot-at(y) se torna verdade. robot-at(x) se torna falso.

- **PDDL:**

```
(:action move
  :parameters (?x ?y - room)
  :precondition (robot-at ?x)
  :effect (and (robot-at ?y) (not (robot-at ?x)))
)
```

# PDDL - Domain File

```
(define (domain robot)
  (:requirements :strips :equality :typing)
  (:types room box arm)
  (:constants left right - arm)
  (:predicates
    (robot-at ?x - room)
    (box-at ?x - box ?y - room)
    (free ?x - arm)
    (carry ?x - box ?y - arm)
  )

  (:action move
    :parameters (?x ?y - room)
    :precondition (robot-at ?x)
    :effect (and (robot-at ?y) (not (robot-at ?x))))
  )

  (:action pickup
    :parameters (?x - box ?y - arm ?w - room)
    :precondition (and (free ?y) (robot-at ?w) (box-at ?x ?w))
    :effect (and (carry ?x ?y) (not (box-at ?x ?w)) (not (free ?y))))
  )

  (:action putdown
    :parameters (?x - box ?y -arm ?w - room)
    :precondition (and (carry ?x ?y) (robot-at ?w))
    :effect (and (not (carry ?x ?y)) (box-at ?x ?w) (free ?y))
  )
)
)
```



# PDDL – Problem File

- Sintaxe:

```
(define (problem <problem name>)  
  (:domain <domain name>)  
  <PDDL code for objects>  
  <PDDL code for initial state>  
  <PDDL code for goal specification>  
)
```

# PDDL - Objects

- **Objetos:**
  - Salas: room1, room2
  - Caixas: box1, box2, box3, box4
  - Braços: left, right

- **PDDL:**

```
(:objects  
  room1 room2 - room  
  box1 box2 box3 box4 - box  
  left right - arm  
)
```

# PDDL - Estado Inicial

- **Estado Inicial:** todas as caixas e robô estão na primeira sala.

- **PDDL:**

```
(:init
  (robot-at room1)
  (box-at box1 room1)
  (box-at box2 room1)
  (box-at box3 room1)
  (box-at box4 room1)
  (free left)
  (free right)
)
```

# PDDL - Objetivo

- **Objetivo:** todas as caixas estão na segunda sala.

- **PDDL:**

```
(:goal  
  (and (box-at box1 room2)  
        (box-at box2 room2)  
        (box-at box3 room2)  
        (box-at box4 room2)  
  )  
)
```

# PDDL – Problem File

```
(define (problem robot1)
(:domain robot)
(:objects
  room1 room2 - room
  box1 box2 box3 box4 - box
  left right - arm
)

(:init
  (robot-at room1)
  (box-at box1 room1)
  (box-at box2 room1)
  (box-at box3 room1)
  (box-at box4 room1)
  (free left)
  (free right)
)

(:goal
  (and
    (box-at box1 room2)
    (box-at box2 room2)
    (box-at box3 room2)
    (box-at box4 room2)
  )
)
)
```

# Utilizando o Planejador

- **Executar planejador:**
  - `hsp.exe robot-problem.pddl robot-domain.pddl`
- **Parâmetros:**
  - Direção da busca: `-d backward` ou `forward`
  - Algoritmo: `-a bfs` ou `gbfs`

# Busca em Espaço de Estados

- A **busca em espaço de estados é ineficiente** devido a ela não considerar o problema das ações irrelevantes. Todas as opções de ações são testadas em cada estado.
- Isso faz com que a complexidade do problema cresça muito rapidamente.
- **Solução?**
  - Busca no espaço de planos parciais (**planejamento de ordem parcial**).

# Planejamento de Ordem Parcial

- **Subdivisão do problema.**
- **Ordem de elaboração do plano flexível.**
- **Compromisso mínimo.**
  - Adiar decisões durante a procura.
- O planejador de ordem parcial pode inserir duas ações em um plano sem especificar qual delas deve ser executada primeiro.



# Exemplo dos Sapatos

Inicio()

Objetivo(SapatoDireitoCalçado^SapatoEsquerdoCalçado)

Ação(SapatoDireito,

PRECOND: MeiaDireitaCalçada,

EFFECT: SapatoDireitoCalçado)

Ação(MeiaDireita,

EFFECT: MeiaDireitaCalçada)

Ação(SapatoEsquerdo,

PRECOND: MeiaEsquerdaCalçada,

EFFECT: SapatoEsquerdoCalçado)

Ação(MeiaEsquerda,

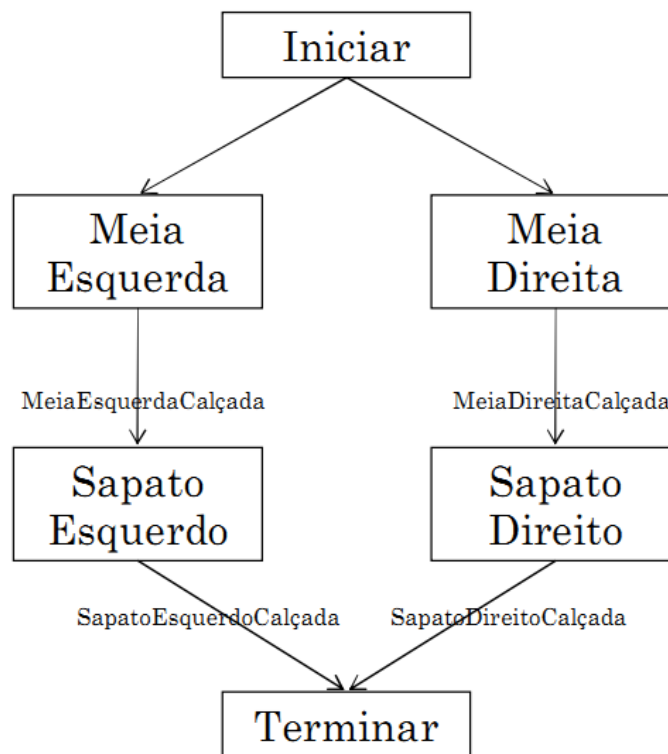
EFFECT: MeiaEsquerdaCalçada)

# Exemplo dos Sapatos

- Um planejador de ordem parcial deve ser capaz de chegar a **duas sequências de ações**:
  - MeiaDireita seguido por SapatoDireito;
  - MeiaEsqueda seguido por SapatoEsquerdo.
- As duas sequências podem ser **combinadas** para produzir o plano final.

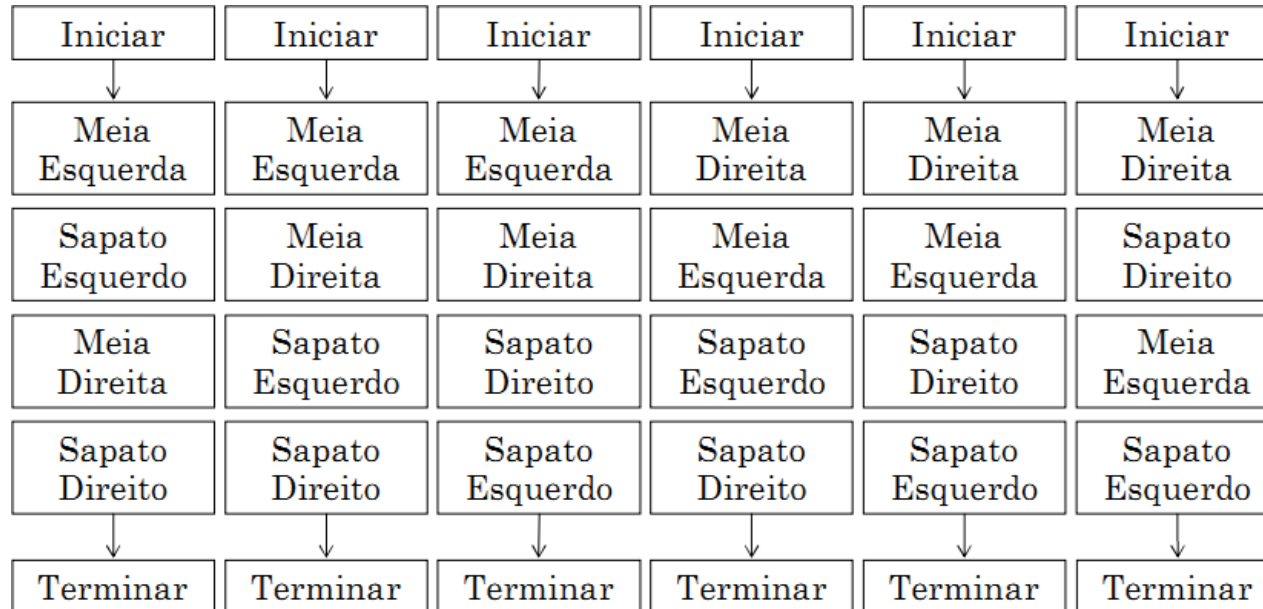
# Exemplo dos Sapatos

- Plano de Ordem Parcial



# Exemplo dos Sapatos

- Plano de Ordem Total



# Planejamento de Ordem Parcial

- O planejamento de ordem parcial pode ser implementado como uma **busca no espaço de ordem parcial de planos**.
- **Ideia:**
  - Busca-se um plano desejado em vez de uma situação desejada (meta-busca).
  - Parte-se de um plano inicial (parcial) e aplica-se as ações até chegar a um plano final (completo)
- **Plano Final:**
  - **Completo:** todas as pré-condições de todas as ações são alcançada por meio de alguma outra ação.
  - **Consistente:** não há contradições.

# Planejamento de Ordem Parcial

- Na estratégia de **compromisso mínimo** a ordem e instanciações totais são decididas quando necessário.
- **Exemplo:**
  - Para objetivo **Ter(Leite)**, a ação **Comprar(Produto, Loja)**, instancia-se somente item: **Comprar(Leite, Loja)**
  - Para o problema de colocar meias e sapatos: colocar cada meia antes do sapato, sem dizer por onde começar (esquerda ou direita)

# Planejamento de Ordem Parcial

- **Algoritmo de planejamento de ordem parcial:**
  - Identifica-se um passo com a pré-condição (sub-goal) não satisfeita.
  - Introduce-se um passo cujo efeito satisfaz a pré-condição.
  - Instancia-se variáveis e atualiza-se as ligações causais.
  - Verifica-se se há conflitos e corrige-se o plano se for o caso.

# Exemplo

- Plano Inicial:



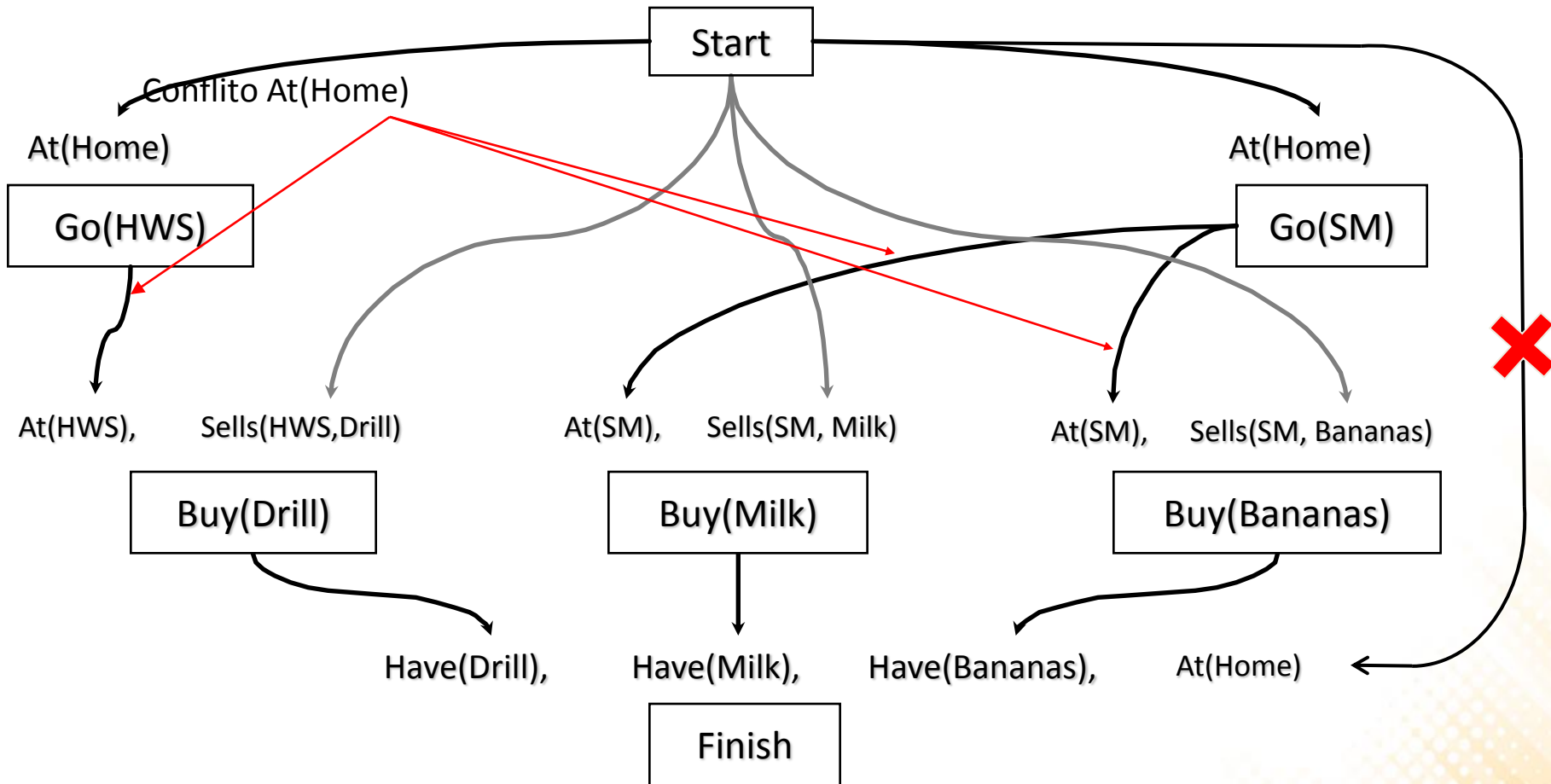
- Ações:

Op(ACTION: **Go**(there),  
PRECOND: At(here),  
EFFECT: At(there)  $\wedge$   $\neg$  At(here))

Op(ACTION: **Buy**(x),  
PRECOND: At(store)  $\wedge$  Sells(store, x),  
EFFECT: Have(x))



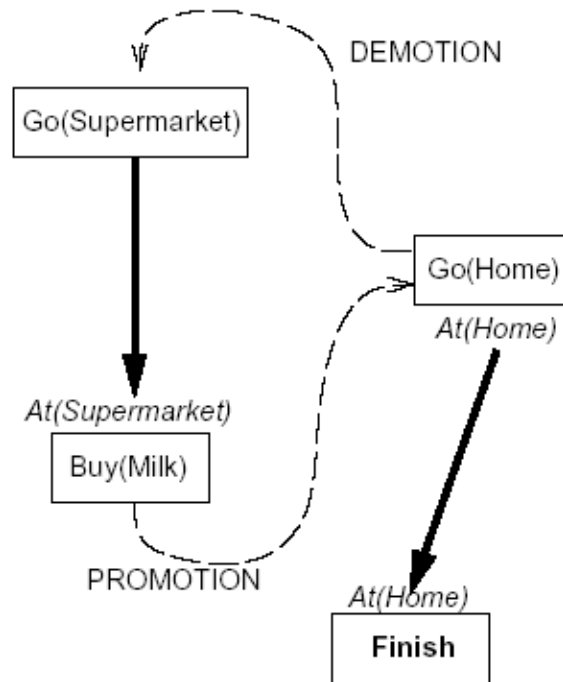
# Exemplo



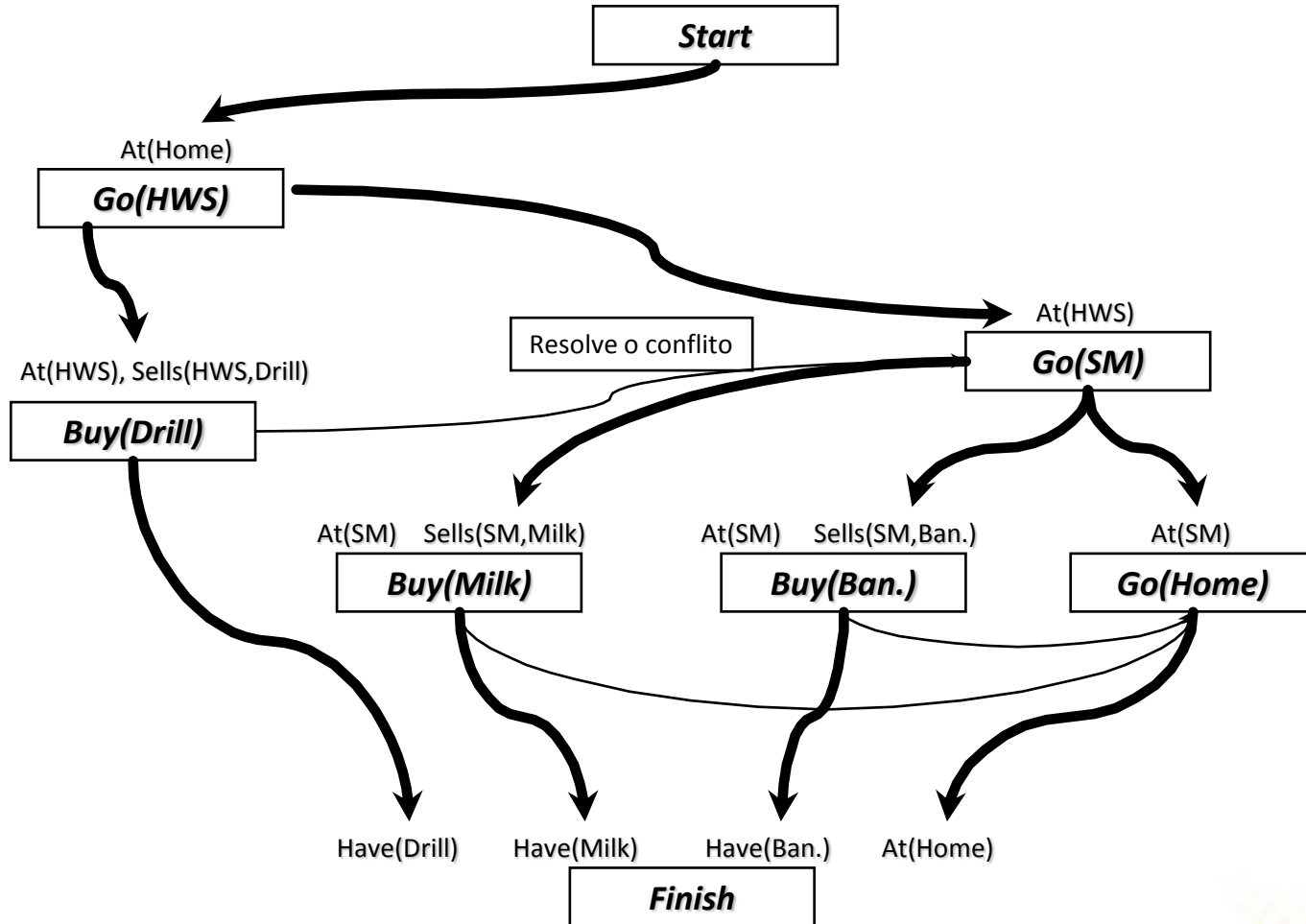
# Conflito em Planejamento de Ordem Parcial

- Um **conflito** ocorre quando os efeitos de uma ação põem em risco as pré-condições de outra ação.
  - No caso anterior, os operadores Go(HWS) e Go(SM) apagam At(Home).

- Demotion e Promotion:

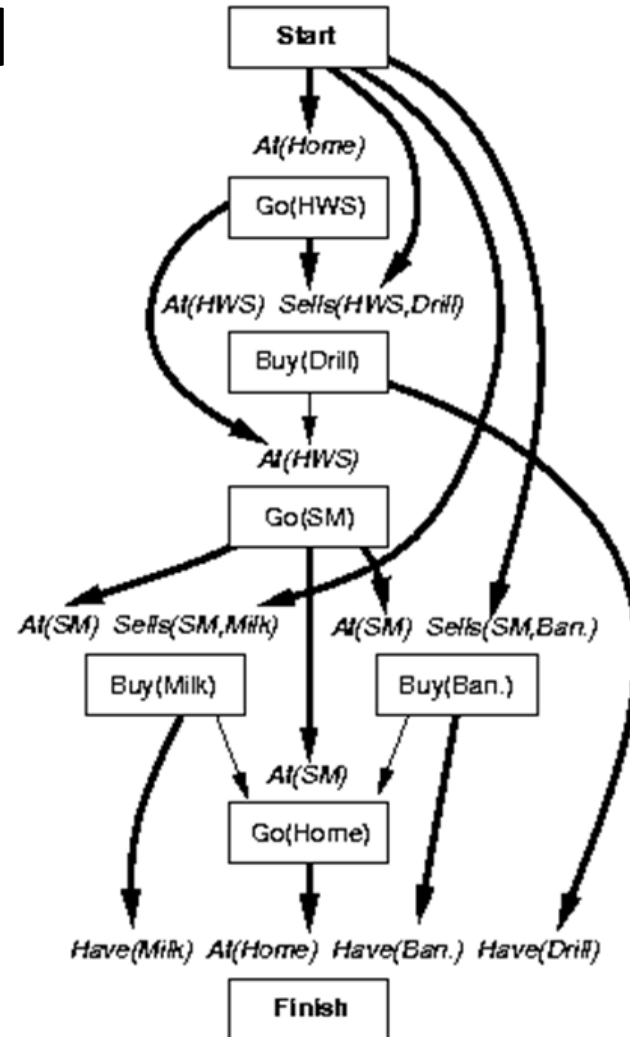


# Exemplo



# Exemplo

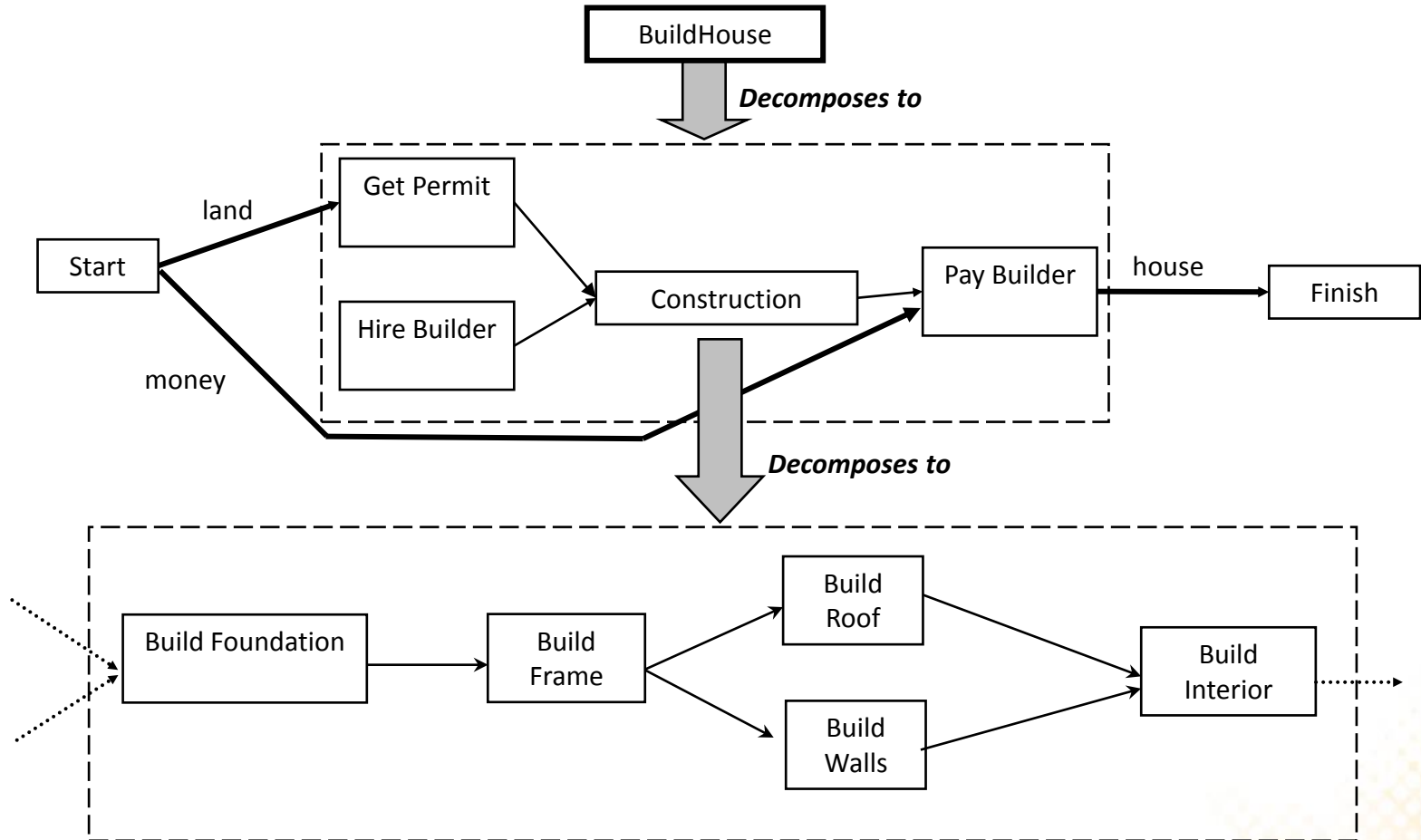
- Plano de Ordem Parcial



# Planejamento Hierárquico

- **Hierarchical Task Network (HTN) Planning**
  - Planejamento que busca refinar um plano com a **decomposição hierárquica** de operadores abstratos.
- Em planejamento HTN, o plano inicial que descreve o problema, é visto como uma **descrição de alto nível** do que deve ser feito.
- Faz uma **busca no espaço de redes de tarefas** através das diferentes decomposições de ações compostas.
  - Ações compostas representam sub-metas de alto nível.
  - Ações primitivas representam ações.

# Exemplo



# Planejamento Hierárquico

- **Plan library:**
  - Contém várias decomposições de ações abstratas em menos abstratas ou mesmo planos inteiros pré-concebidos.
  - Cada ação abstrata tem pré-condições e efeitos que são comuns a todas as instanciações dela.
- As decomposições podem ser expressadas da seguinte maneira **Decompose(a, d)** - uma ação **a** um pode ser decomposta em plano **d**.

# Planejamento Hierárquico

- **Planejamento hierárquico híbrido**

- Na prática, se mistura operadores de decomposição **HTN** com outros operadores do **planejamento de ordem parcial**.

Decompose(Construction,

Plan(STEPS:{ $S_1$ : Build(Foundation),  $S_2$ : Build(Frame),

$S_3$ : Build(Roof),  $S_4$ : Build(Walls),

$S_5$ : Build(Interior)})

Orderings:{ $S_1 < S_2 < S_3 < S_5$ ,  $S_2 < S_4 < S_5$ },

Bindings:{},

Links:{ $S_1 \xrightarrow{\text{Foundation}} S_2$ ,  $S_2 \xrightarrow{\text{Frame}} S_3$ ,  $S_2 \xrightarrow{\text{Frame}} S_4$ ,

$S_3 \xrightarrow{\text{Roof}} S_5$ ,  $S_4 \xrightarrow{\text{Walls}} S_5$ }}))



# Planejamento Hierárquico

- **Algoritmo:**

- Constrói-se um plano de ordem parcial inicial no **maior nível de abstração**.
- Recursivamente **decompõem-se ações abstratas** até o plano de ordem parcial final conter apenas operadores primitivos (que podem ser executados pelo agente).
- **Resolve-se ameaças** e verifica-se a **consistência global** do plano de ordem parcial final.

# Planejamento Clássico

- Em **planejamento clássico**, o ambiente do problema precisa possuir as seguintes características:
  - Observável.
  - Estático.
  - Determinístico.
- Supõe-se que as descrições das ações são sempre **corretas e completas**. Nestas circunstâncias, um agente poderia planejar e depois **executar o plano de olhos fechados**.

# Planejamento em Ambientes Incertos

- Em **ambientes incertos**, um agente deve:
  - Usar seus sensores para descobrir o que está **acontecendo no ambiente** enquanto o plano está sendo executado.
  - Modificar ou substituir o plano se **algo inesperado acontecer**.
  - Os agentes precisam lidar com informações **incompletas e incorretas**.

# Planejamento em Ambientes Não-Determinísticos

- Existem **4 métodos de planejamento** mais comuns usados para lidar com o ambientes não-determinísticos:
  - **(1) Planejamento sem sensores:** Constrói-se planos sequenciais normais (sem percepção), mas considera-se todas as circunstâncias independentemente do estado inicial.
  - **(2) Planejamento condicional:** Constrói-se um plano fixo com diferentes ramificações para diferentes contingentes. Percebe-se o ambiente para saber que ramo seguir.

# Planejamento em Ambientes Não-Determinísticos

- Métodos de planejamento para ambientes não-determinísticos:
  - **(3) Monitoramento da execução com replanejamento:** Usa qualquer uma das técnicas precedentes para construir o plano, mas monitora a execução para ver se o plano pode ter sucesso no atual estado ou precisa ser revisto. Replaneja no caso de algo estar errado.
  - **(4) Planejamento contínuo:** Planeja-se continuamente as ações, sendo capaz de tratar eventos inesperados, mesmo durante a construção do plano.

# Planejamento Condicional

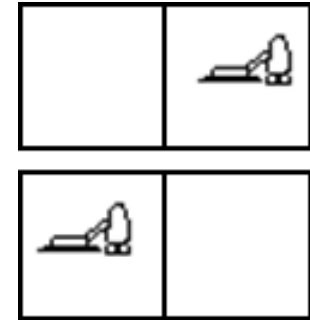
- Aplicação em ambientes **completamente observáveis**:
  - O agente sabe seu estado atual, mas se o ambiente for não determinístico, ele não saberá o efeito de suas ações.
- Exemplo Aspirador de Pó:
  - **às vezes** suja o destino quando se move para lá.
  - **às vezes** suja se sugar em um local limpo.

# Planejamento Condicional - Aspirador de Pó

- **Estados:**

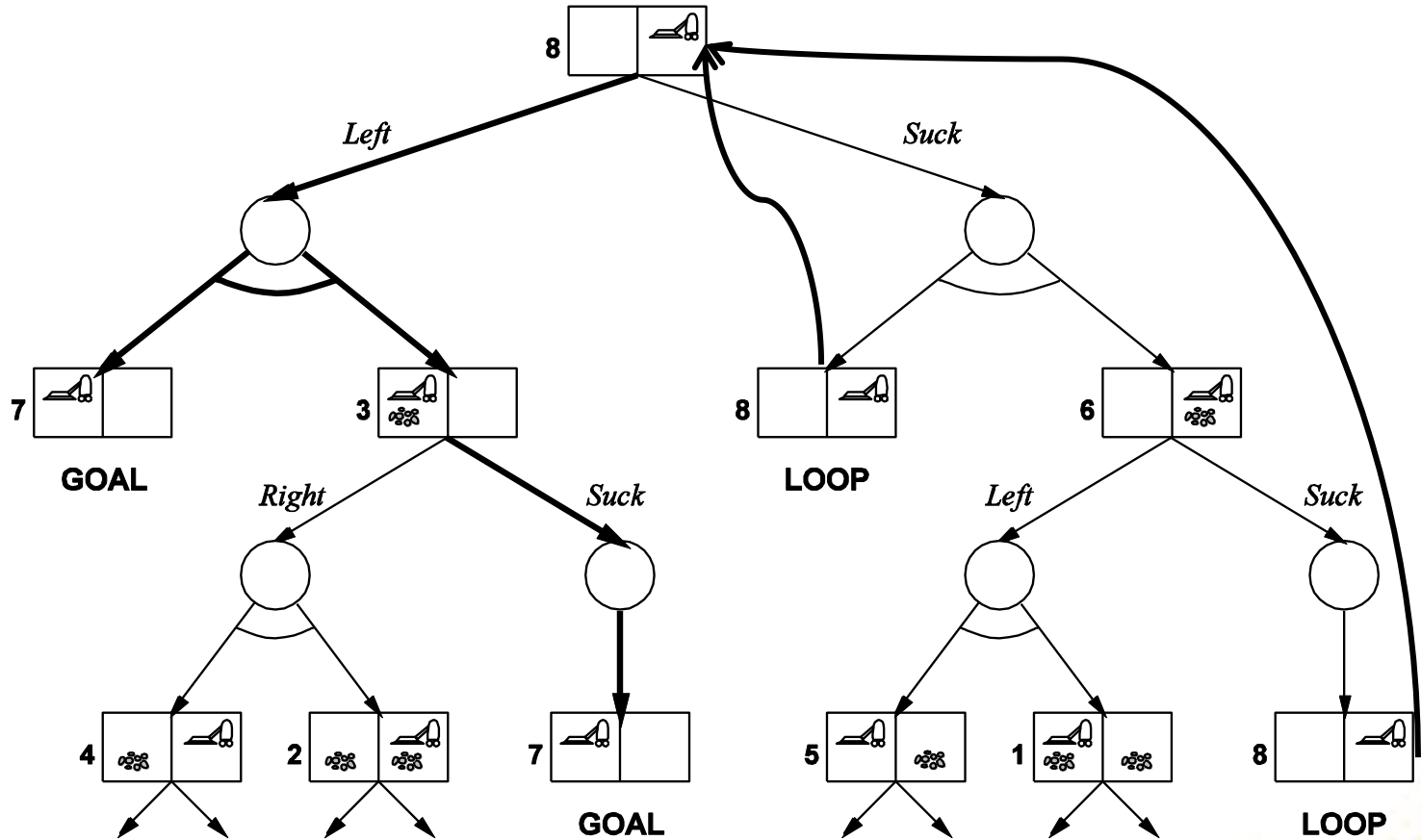
- **Inicial:**  $\text{AtRight} \wedge \text{CleanLeft} \wedge \text{CleanRight}$

- **Final:**  $\text{AtLeft} \wedge \text{CleanLeft} \wedge \text{CleanRight}$



- A representação do espaço de busca é feita em uma **árvore and-or**.
- A solução é uma sub-árvore onde **todos os nós folha** levam em algum ponto a solução do problema.

# Árvore And-Or

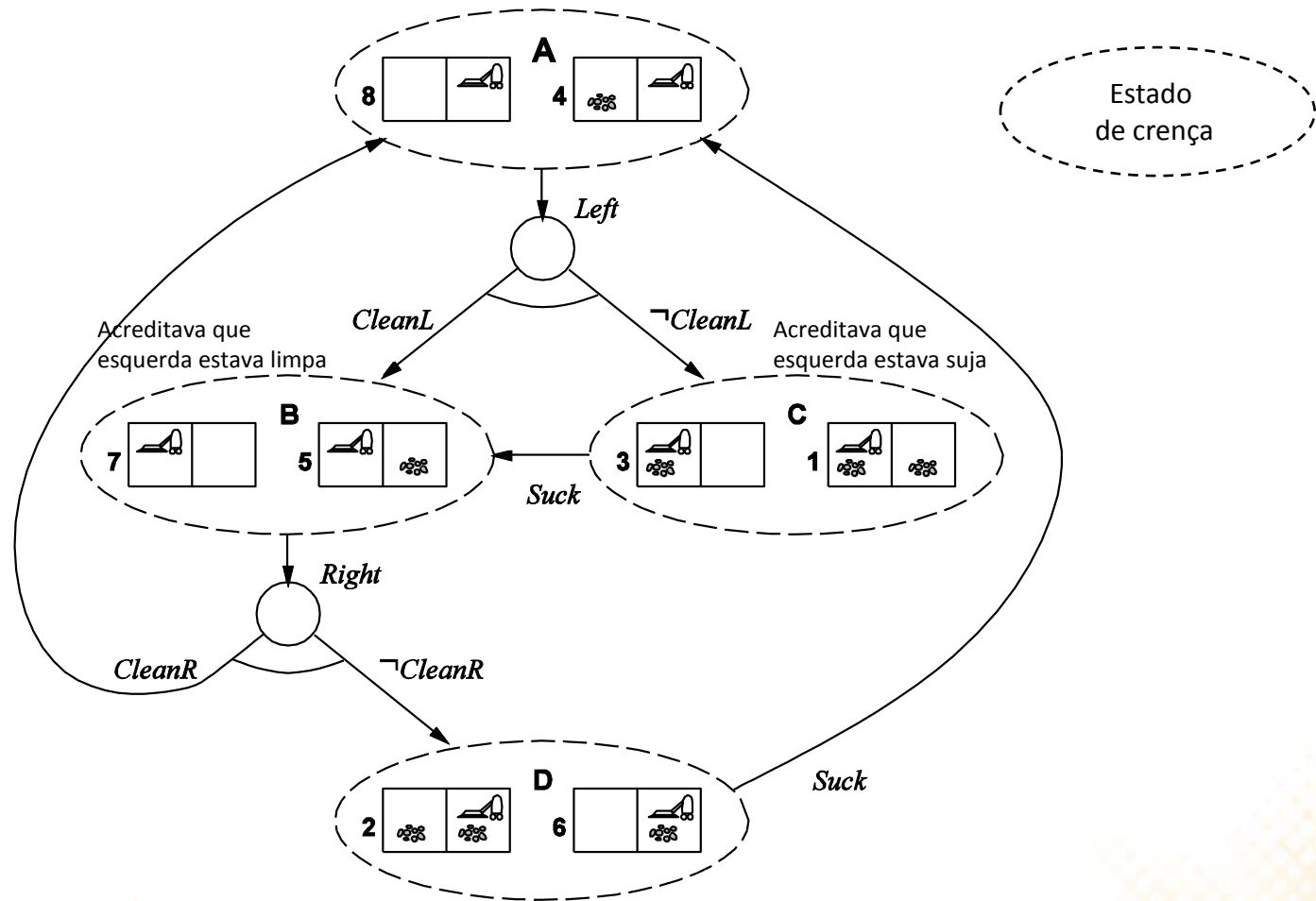




# Planejamento Condicional

- Ambientes **parcialmente observáveis e não determinísticos**:
  - **Os testes condicionais nem sempre funcionam...**
    - Exemplo: aspirador só sabe se tem sujeira na sala em que ele está.
  - **Belief state (estado de crença)**:
    - Ao invés de estado único, deve-se lidar explicitamente com a ignorância para sempre estar consciente do que se sabe (ou do que não se sabe).
    - Representado como um conjunto de estados possíveis.
- **Solução**:
  - Grafos And-Or em estados de crença.

# Grafo And-Or em Estados de Crença



# Monitoramento da Execução com Replanejamento

- Monitoramento da execução checa as percepções para ver se tudo está **indo de acordo com o plano**.
- **Existem dois tipos de monitoramento:**
  - **Monitoramento da ação:** para ver se a próxima ação é aplicável.
    - Exemplo: a porta está fechada.
  - **Monitoramento do plano:** ver se o plano ainda é viável
    - Exemplo: não tem mais dinheiro suficiente.
- **Replanejamento:** Se algo inesperado acontece, pede-se ao planejador um **novo plano** ou tentar reparar o plano antigo.

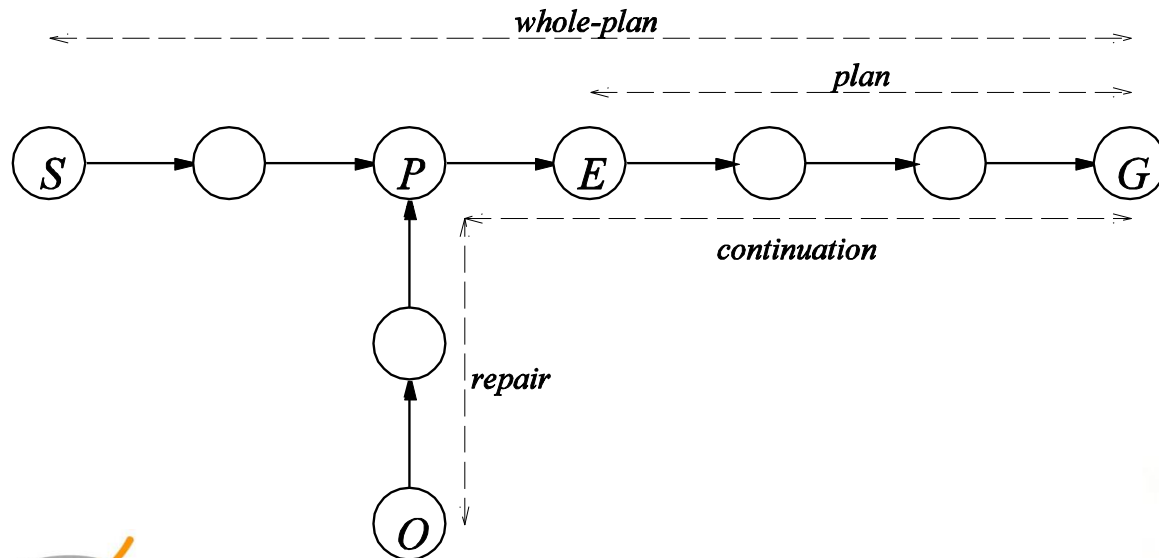
# Monitoramento da Execução com Replanejamento

- A estratégia monitoramento e replanejamento pode ser aplicada em **todos os tipos problemas**.
  - Ambiente total ou parcialmente acessível.
  - Espaço de estados ou de planos.
  - Planos condicionais ou não.

# Monitoramento da Execução com Replanejamento

- **Monitoramento da ação (exemplo):**

- **Whole plan** = plano inteiro (inicial), S= start, G = goal.
- **Plan** = plano que resta.
- O agente deveria chegar em E mas foi para O.
- Então tenta encontrar um plano que leve de O a qualquer ponto de **WholePlan**.



# Monitoramento da Execução com Replanejamento

- **Monitorando plano:**
  - Verifica, a cada passo, as pré-condições para o sucesso do **plano inteiro**.
  - Problemático em ambientes parcialmente acessíveis.
  - Pode-se perder mais tempo verificando todas as condições do futuro plano do que agindo.
  - **Deve ser sempre mantido o monitoramento das ações.**

# Planejamento Contínuo

- **Diferenças:**
  - Cria planos incrementalmente (dentro de limites de tempo)
  - Pode começar a executar um plano mesmo que ele ainda esteja incompleto.
  - Continua planejando durante a execução do plano.
  - Pode mudar de objetivo durante a execução do plano.
  
- **É capaz de intercalar continuamente entre:**
  - Execução de passos (de percepção e efetivação).
  - Monitoramento.
  - Replanejamento.

# Planejamento Contínuo

- **Exemplo dos blocos:**

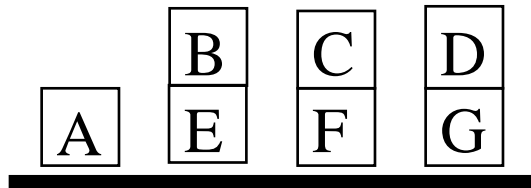
- Plano de ordem parcial condicional.
- Mundo observável (mas funcionaria igual em um mundo não observável)

Action(Mover (x, y),

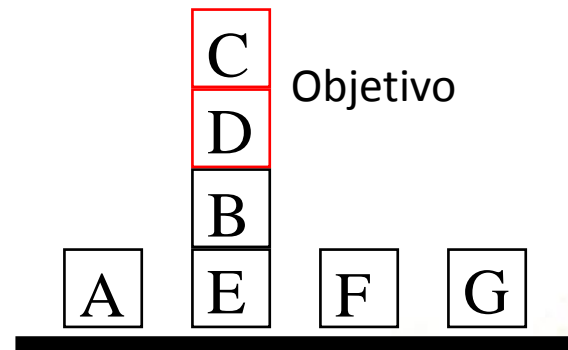
PRECOND:  $\text{Limpo}(x) \wedge \text{Limpo}(y) \wedge \text{EmCima}(x,z)$

EFFECT:  $\text{EmCima}(x,y) \wedge \text{Limpo}(z) \wedge \neg \text{EmCima}(x,z) \wedge \neg \text{Limpo}(y)$ ).

Estado Inicial



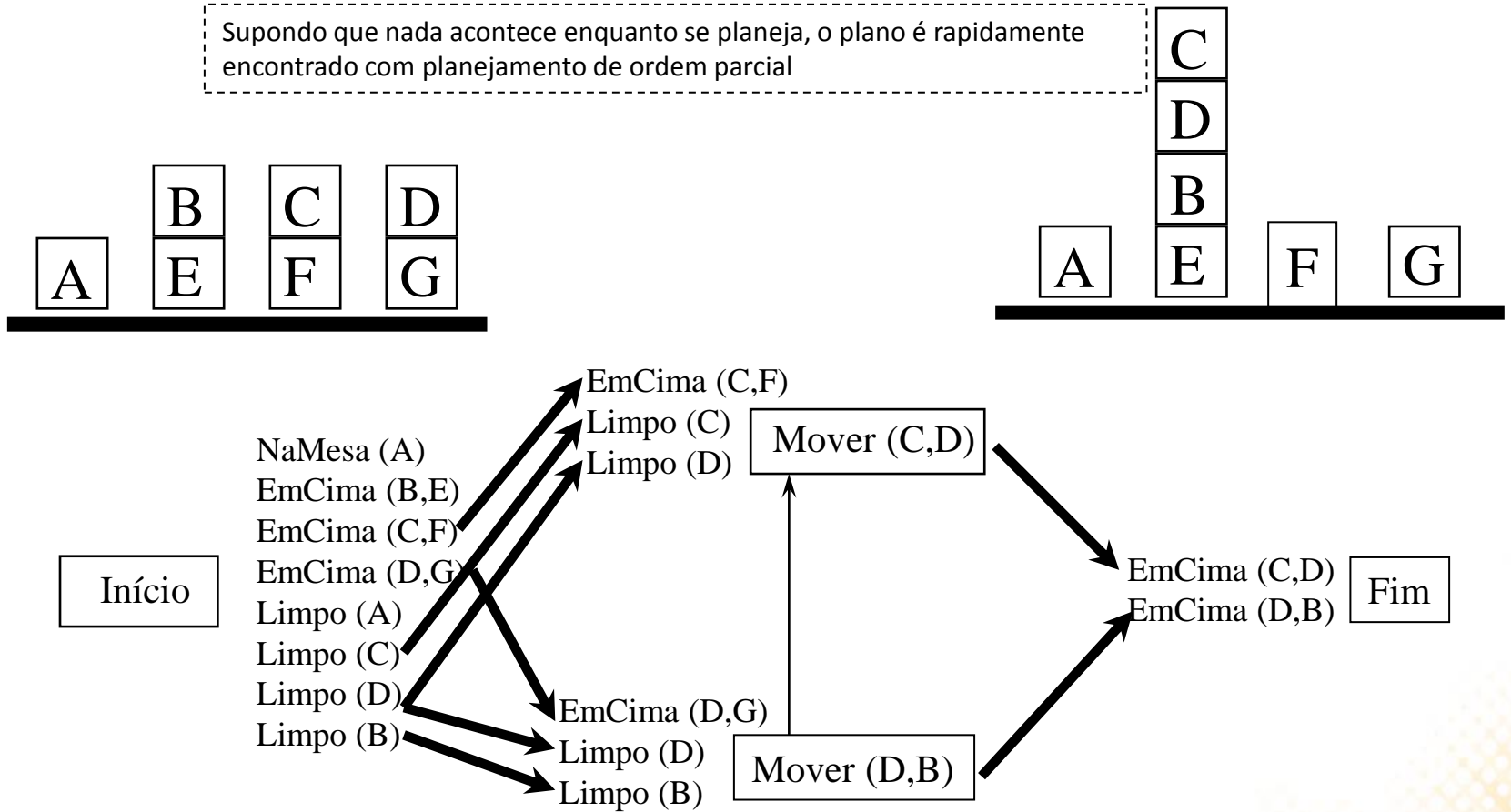
Objetivo





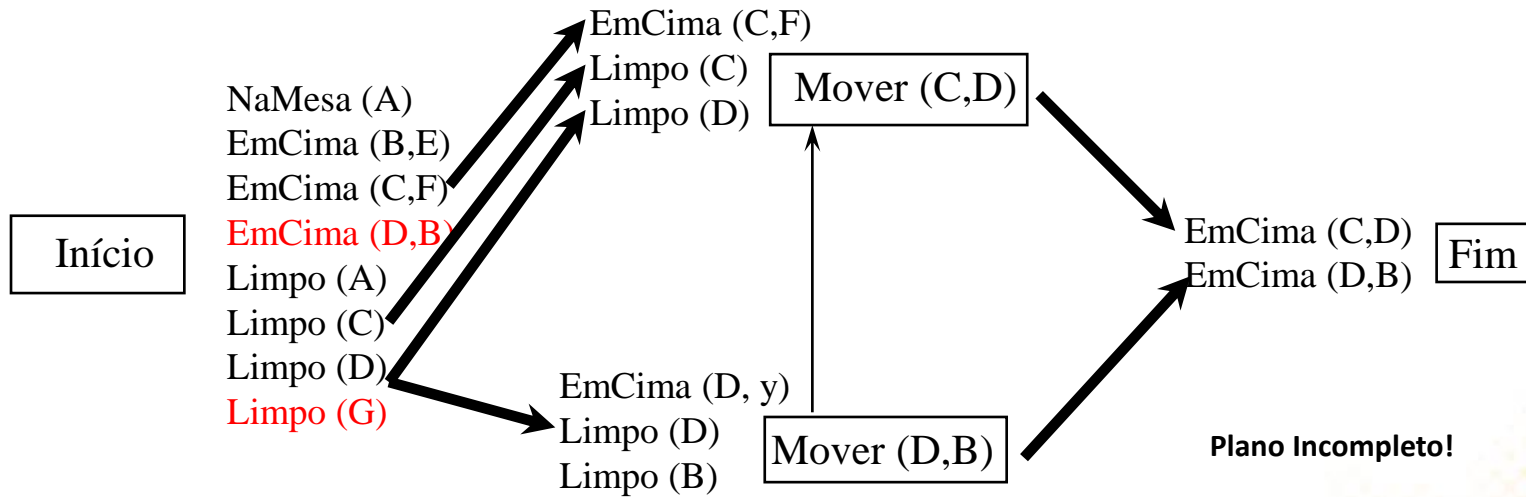
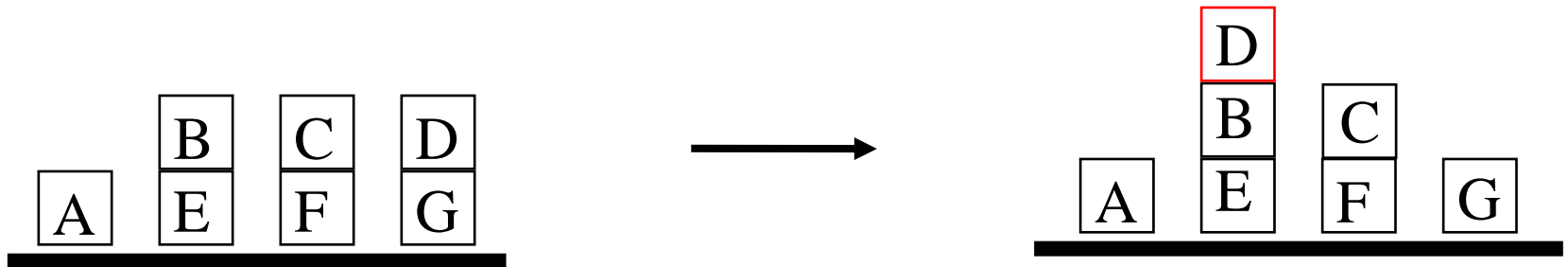
# Planejamento Contínuo

Supondo que nada acontece enquanto se planeja, o plano é rapidamente encontrado com planejamento de ordem parcial



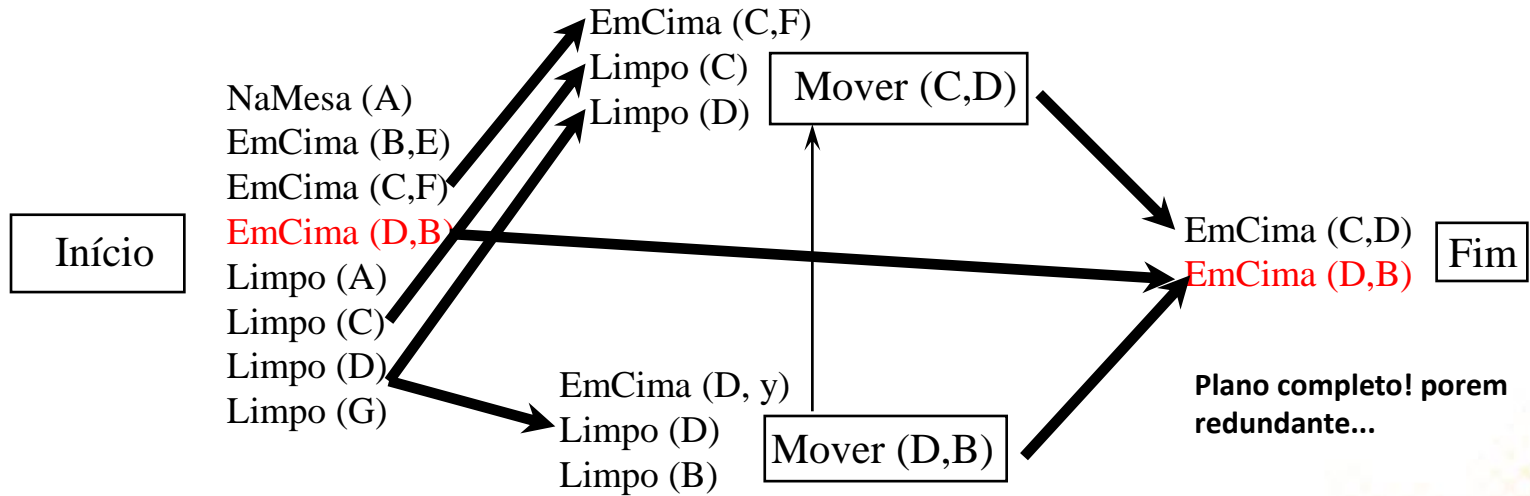
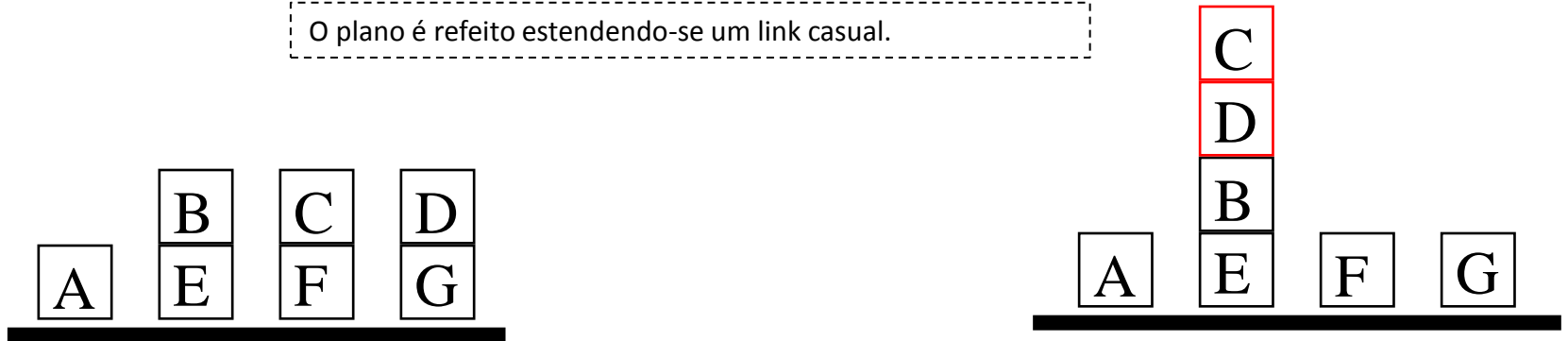
# Planejamento Contínuo

Antes da execução das ações, algo faz com que o ambiente mude.



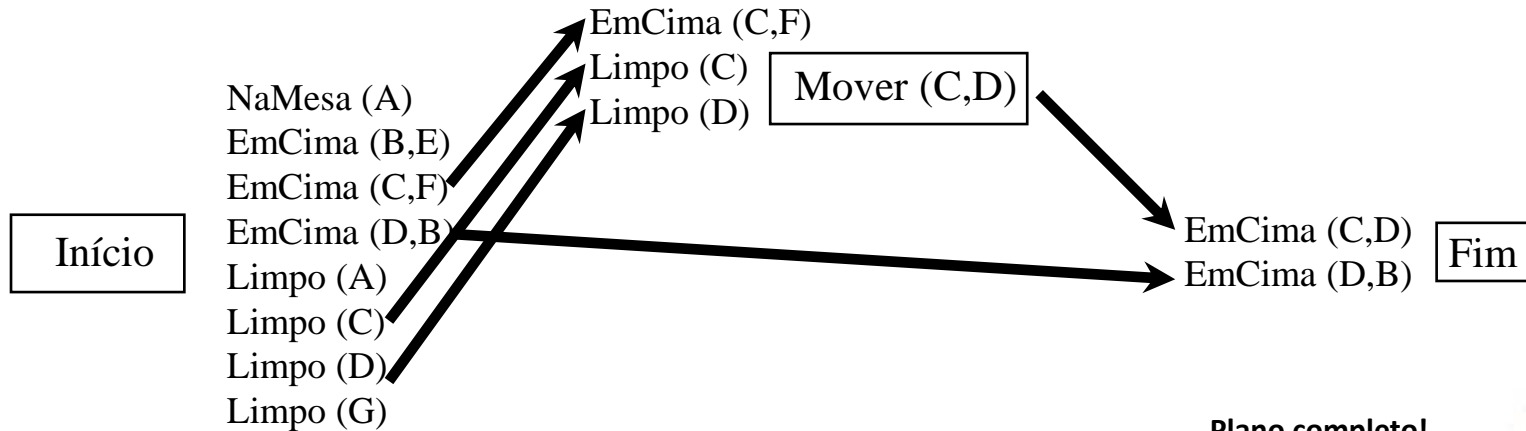
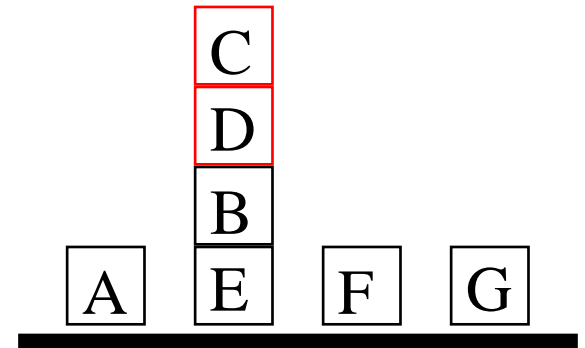
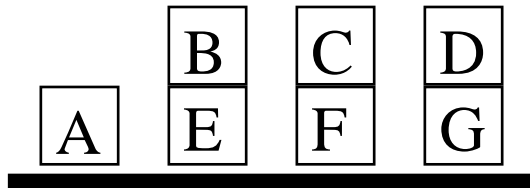
# Planejamento Contínuo

O plano é refeito estendendo-se um link casual.



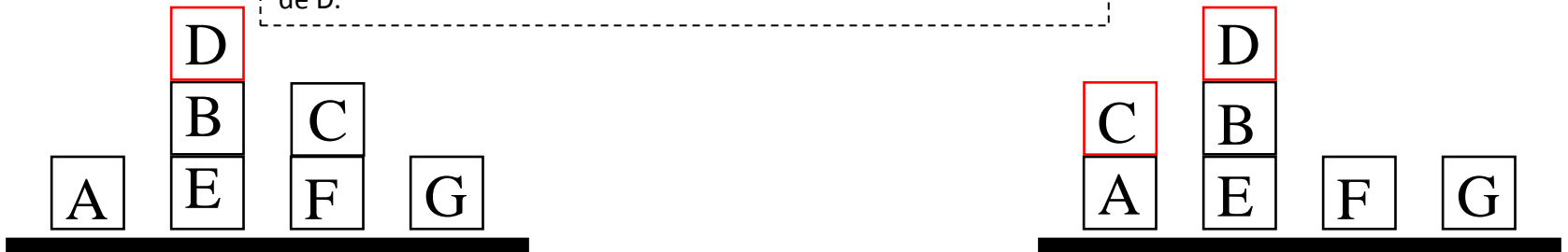
# Planejamento Contínuo

Elimina-se os passos redundantes.



# Planejamento Contínuo

O agente é desastrado... Acaba colocando C em cima de A ao invés de D.



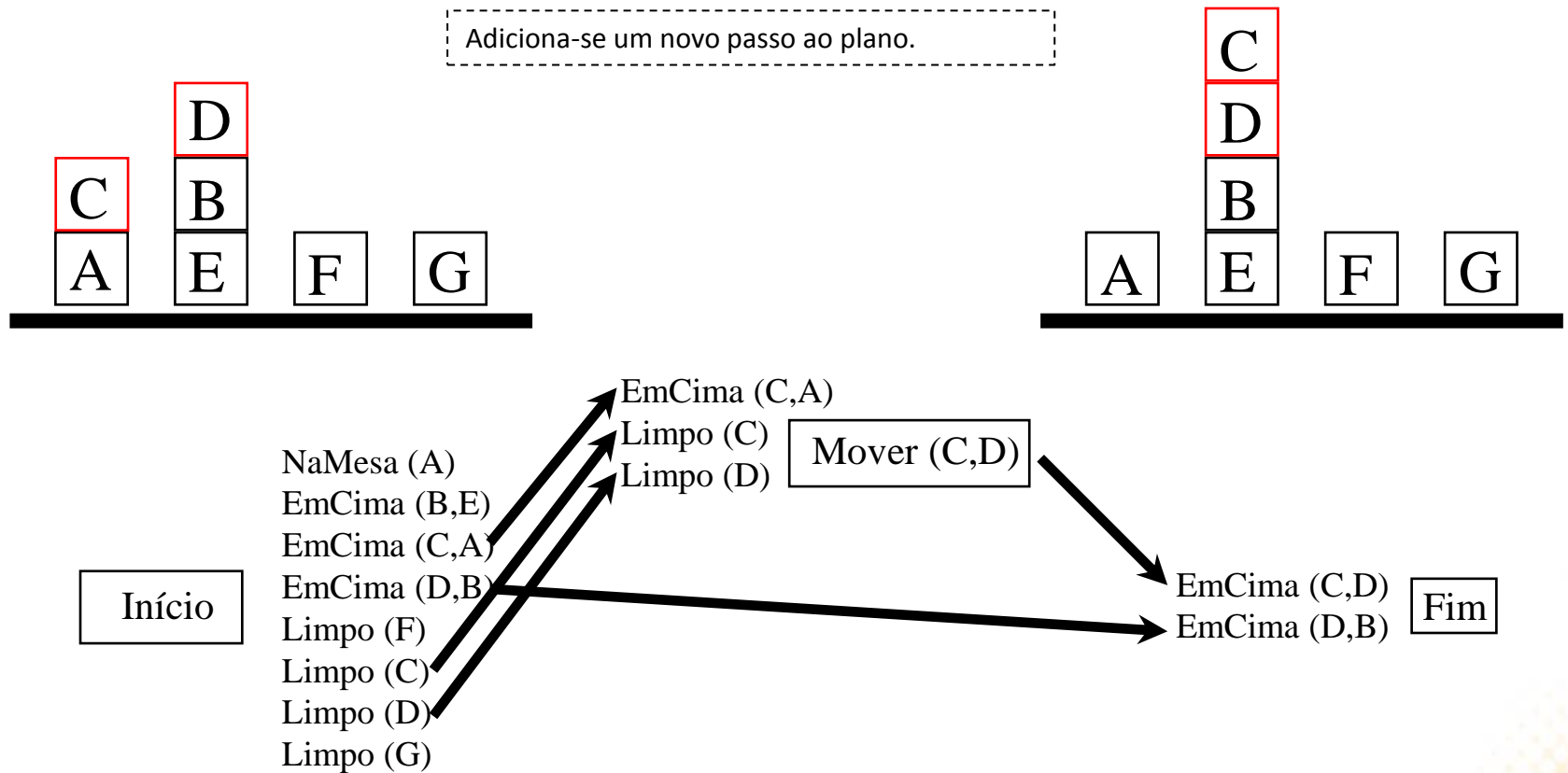
Início

NaMesa (A)  
EmCima (B,E)  
EmCima (C,F)  
EmCima (D,B)  
**Limpo (F)**  
Limpo (C)  
Limpo (D)  
Limpo (G)

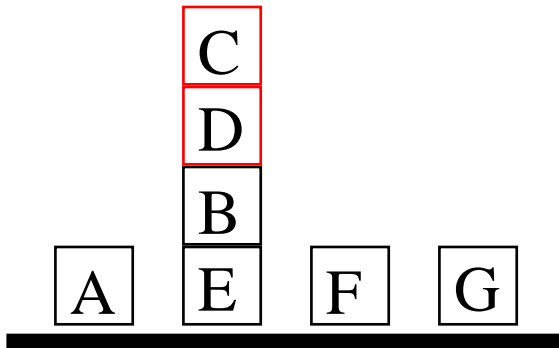
EmCima (C,D)  
EmCima (D,B) Fim



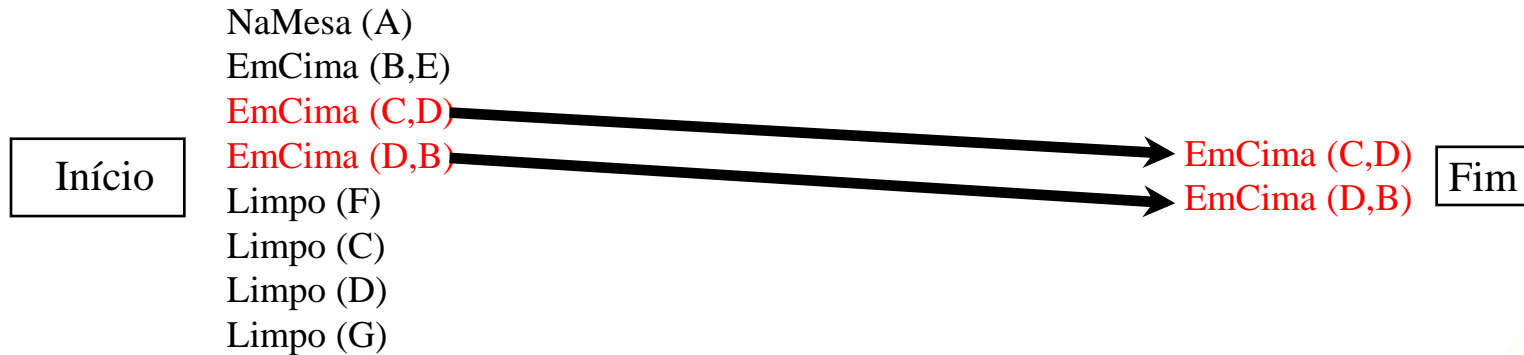
# Planejamento Contínuo



# Planejamento Contínuo



Finalmente o agente consegue realizar o movimento com sucesso e chegar no estado final. Agora ele pode buscar um novo objetivo.



# Aplicações de Planejamento

- Qualquer problema que necessite de **passos/ações** para chegar a um determinado **objetivo**.
- Exemplos:
  - Robôs que realizam tarefas.
  - Personagens de jogos direcionados a objetivos.
  - Geração de histórias para storytelling interativo.



# Leitura Complementar

- Russell, S. and Norvig, P. **Artificial Intelligence: a Modern Approach**, 2nd Edition, Prentice-Hall, 2003.
- **Capítulo 11: Planning**
- **Capítulo 12: Planning and Acting in the Real World**

