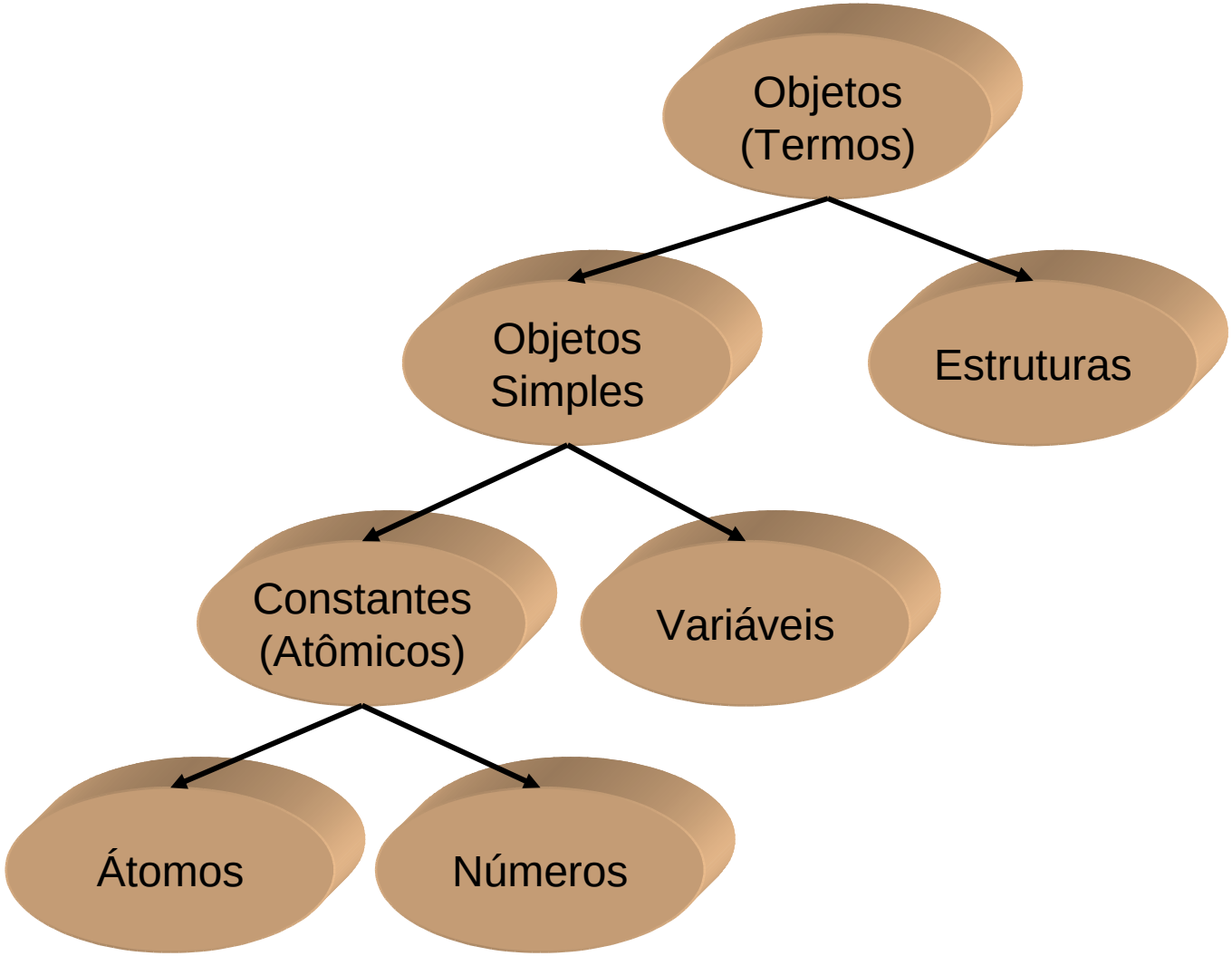
Sintaxe e Semântica de Programas Prolog

Inteligência Artificial

- Nesta aula será vista a sintaxe e semântica de conceitos básicos em Prolog e introduz objetos de dados estruturados
- Os tópicos abordados são:
  - Objetos simples (átomos, números, variáveis)
  - Objetos estruturados
  - Unificação como operação fundamental em objetos
  - Operadores
  - Significado declarativo e procedural

José Augusto Baranauskas
Departamento de Computação e Matemática – FFCLRP-USP
augusto@usp.br
http://dcm.fmrp.usp.br/~augusto

Objetos em Prolog



Átomos

- São cadeias compostas pelos seguintes caracteres:
  - letras maiúsculas: A, B, ..., Z
  - letras minúsculas: a, b, ..., z
  - dígitos: 0, 1, ..., 9
  - caracteres especiais: + - * / < > = : . & _ ~
- Podem ser construídos de três maneiras:
  - cadeias de letras, dígitos e o caractere '_', começando com uma letra minúscula: anna, nil, x25, x_25, x_25AB, x_, x__y, tem_filhos, tem_um_filho
  - cadeias de caracteres especiais: <--->, =====>, ..., .:., ::=
  - cadeias de caracteres entre apóstrofos: 'Abraão', 'América_do_Sul', 'América_Latina'

Números

- Números usados em Prolog incluem números inteiros e números reais

Operadores Aritméticos	
adição	+
subtração	-
multiplicação	*
divisão	/
divisão inteira	//
resto divisão inteira	mod
potência	**
atribuição	is

Operadores Relacionais	
X > Y	X é maior do que Y
X < Y	X é menor do que Y
X >= Y	X é maior ou igual a Y
X =< Y	X é menor ou igual a Y
X =:= Y	X é igual a Y
X = Y	X unifica com Y
X =\= Y	X é diferente de Y

Números

- O operador **=** tenta unificar apenas
  - `?- X = 1 + 2.`
  - `X = 1 + 2`
- O operador **is** força a avaliação aritmética
  - `?- X is 1 + 2.`
  - `X = 3`
- Se a variável à esquerda do operador **is** já estiver instanciada, Prolog apenas compara o valor da variável com o resultado da expressão à direita de **is**
  - `?- X = 3, X is 1 + 2.`
  - `X = 3`
  - `?- X = 5, X is 1 + 2.`
  - `no`

Variáveis

- São cadeias de letras, dígitos e caracteres ‘_’, sempre começando com letra maiúscula ou com o caractere ‘_’
  - X, Resultado, Objeto3, Lista_Alunos, ListaCompras, _x25, _32
- O escopo de uma variável é dentro de uma mesma regra ou dentro de uma pergunta
- Isto significa que se a variável X ocorre em duas regras/perguntas, então são duas variáveis distintas
- Mas a ocorrência de X dentro de uma mesma regra/pergunta significa a mesma variável

Variáveis

- Uma variável pode estar:
  - Instanciada: quando a variável já referencia (está unificada a) algum objeto
  - Livre ou não-instanciada: quando a variável não referencia (não está unificada a) um objeto, ou seja, quando o objeto a que ela referencia ainda não é conhecido
- Uma vez instanciada, somente Prolog pode torná-la não-instanciada por meio de seu mecanismo de inferência (nunca o programador)

Variável Anônima

- Quando uma variável aparece em uma única cláusula, não é necessário utilizar um nome para ela
- Utiliza-se a variável **anônima**, que é escrita com um simples caracter '_'. Por exemplo
  - temfilho(X) :- progenitor(X,Y).
- Para definir **temfilho**, não é necessário o nome do filho(a)
- Assim, é o lugar ideal para a variável anônima:
  - temfilho(X) :- progenitor(X,_).

Variável Anônima

- Cada vez que um *underscore* '_' aparece em uma cláusula, ele representa uma nova variável anônima
- Por exemplo
  - alguém_tem_filho :- progenitor(_,_).

equivale à:

  - alguém_tem_filho :- progenitor(X,Y).

que é bem diferente de:

  - alguém_tem_filho :- progenitor(X,X).
- Quando utilizada em uma pergunta, seu valor não é mostrado. Por exemplo, se queremos saber quem tem filhos mas sem mostrar os nomes dos filhos, podemos perguntar:
  - **?-** progenitor(X,_).

Estruturas

- Objetos estruturados (ou simplesmente estruturas) são objetos de dados que têm vários componentes
- Cada componente, por sua vez, pode ser uma estrutura
- Por exemplo, uma data pode ser vista como uma estrutura com três componentes: dia, mês, ano
- Mesmo possuindo vários componentes, estruturas são tratadas como simples objetos

Estruturas

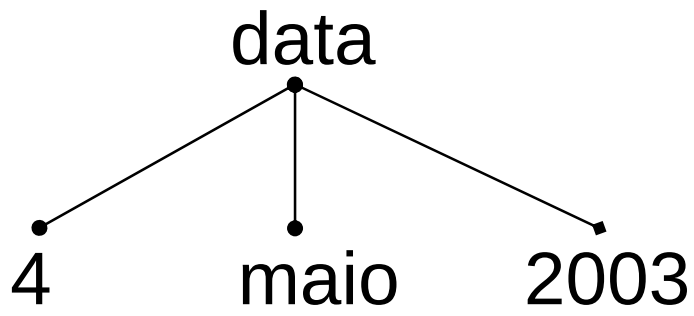
- De forma a combinar componentes em um simples objeto, deve-se escolher um **functor**
- Um functor para o exemplo da data seria **data**
- Então a data de 4 de maio de 2003 pode ser escrita como:
  - data(4,maio,2003)

Estruturas

- Qualquer dia em maio pode ser representado pela estrutura:
  - data(Dia,maio,2003)
- Note que **Dia** é uma variável que pode ser instanciada a qualquer objeto em qualquer momento durante a execução
- Sintaticamente, todos objetos de dados em Prolog são termos
- Por exemplo, são termos:
  - maio
  - data(4,maio,2003)

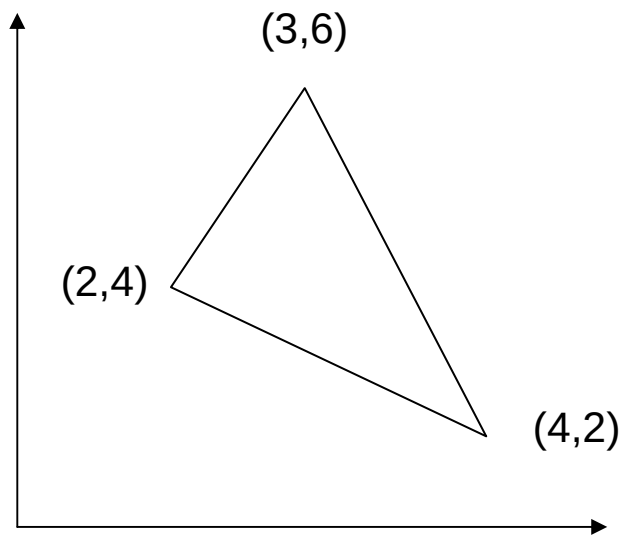
Estruturas

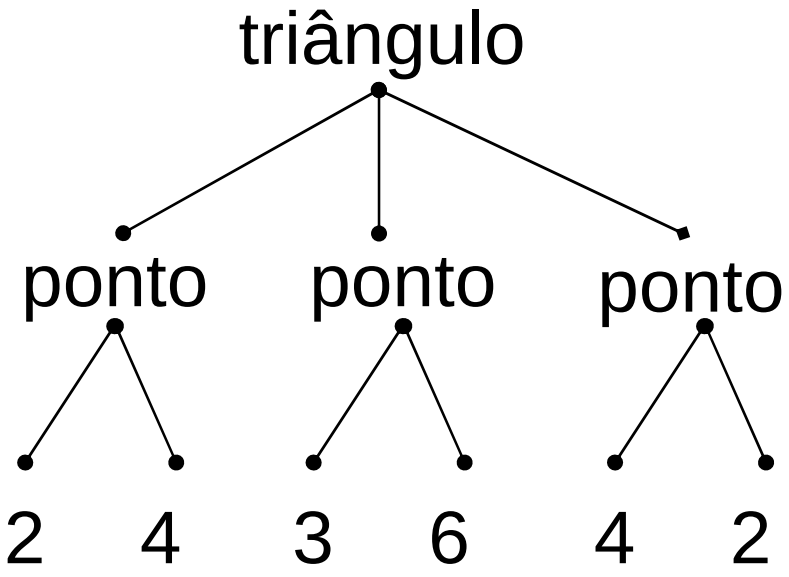
- Todos os objetos estruturados podem ser representados como árvores
- A raiz da árvore é o functor e os filhos da raiz são os componentes
- Para a estrutura data(4,maio,2003):



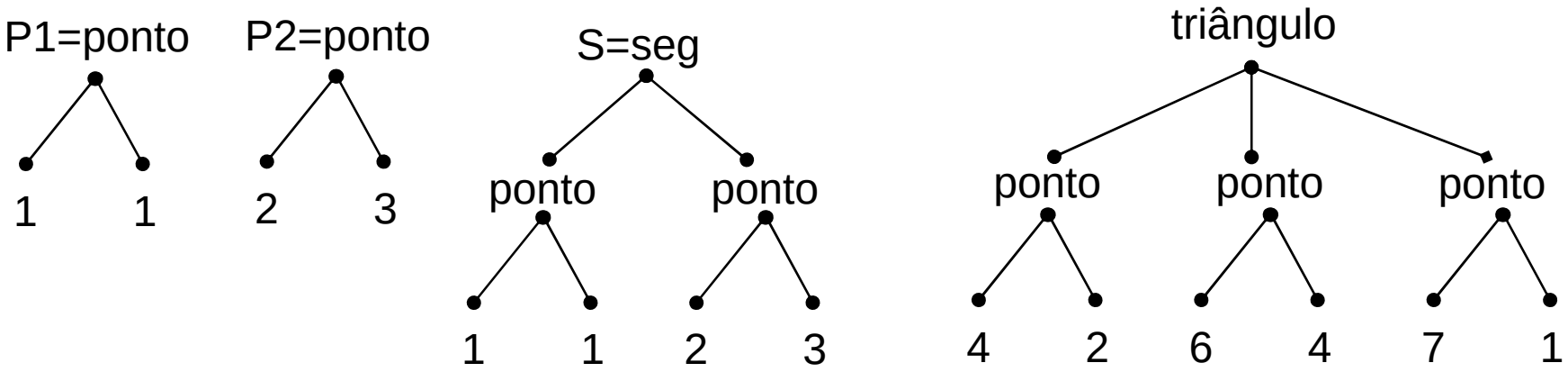
Estruturas

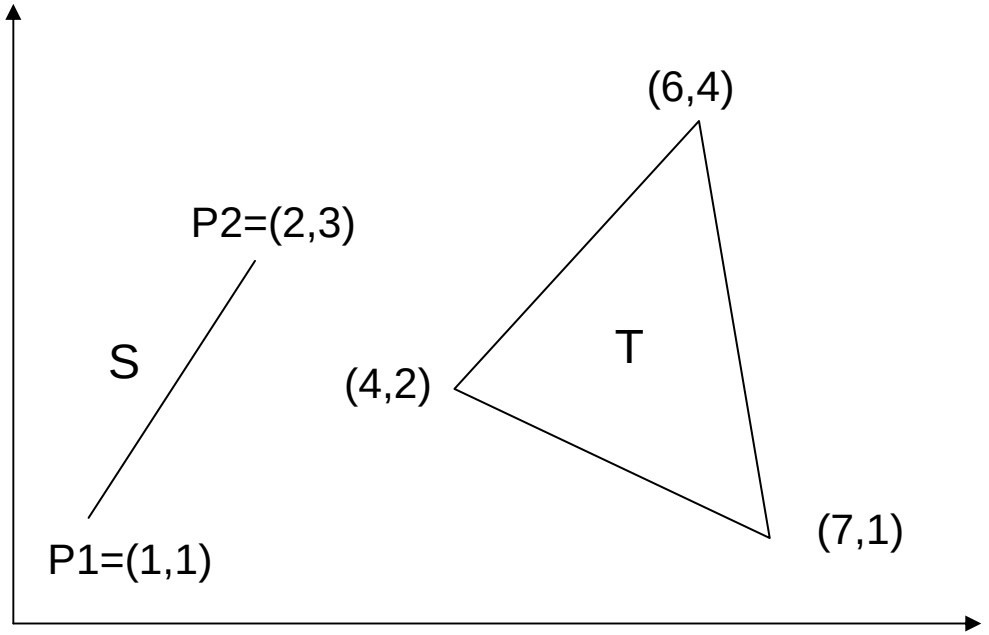
- Por exemplo, o triângulo pode ser representado como
  - triângulo(ponto(2,4),ponto(3,6),ponto(4,2))





Estruturas


P1=ponto
1
1
P2=ponto
2
3
S=seg
ponto
ponto
1
1
2
3
triângulo
ponto
ponto
ponto
4
2
6
4
7
1


(6,4)
P2=(2,3)
S
T
(4,2)
(7,1)
P1=(1,1)

Predicados para Verificação dos Tipos de Termos

Predicado	É verdadeiro se:
var(X)	X é uma variável não instanciada
nonvar(X)	X não é uma variável ou X é uma variável instanciada
atom(X)	X é um átomo
integer(X)	X é um inteiro
float(X)	X é um número real
atomic(X)	X é uma constante (átomo ou número)
compound(X)	X é uma estrutura

Predicados para Verificação dos Tipos de Termos

```
?- var(Z), Z = 2.
Z = 2
?- Z = 2, var(Z).
no
?- integer(Z), Z = 2.
no
?- Z = 2, integer(Z), nonvar(Z).
Z = 2
?- atom(3.14).
no
?- atomic(3.14).
yes
?- atom(==>).
yes
?- atom(p(1)).
no
?- compound(2+X).
yes
```

Unificação de Termos

- Dois termos unificam (*matching*) se:
  - Eles são idênticos ou
  - As variáveis em ambos os termos podem ser instanciadas a objetos de maneira que após a substituição das variáveis por esses objetos os termos se tornam idênticos
- Por exemplo, há unificação entre os termos
  - data(D,M,2003) e data(D1,maio,A)
  - instanciando D = D1, M = maio, A = 2003

Unificação de Termos

```
?- data(D,M,2003) = data(D1,maio,A),
   data(D,M,2003) = data(15,maio,A1).
D = 15
M = maio
D1 = 15
A = 2003
A1 = 2003

?- triângulo = triângulo, ponto(1,1) = X,
   A = ponto(4,Y), ponto(2,3) = ponto(2,Z).
X = ponto(1,1)
A = ponto(4,_G652)
Y = _G652
Z = 3
```

Unificação de Termos

- Por outro lado, não há unificação entre os termos
  - data(D,M,2003) e data(D1,M1,1948)
  - data(X,Y,Z) e ponto(X,Y,Z)
- A unificação é um processo que toma dois termos e verifica se eles unificam
  - Se os termos não unificam, o processo falha (e as variáveis não se tornam instanciadas)
  - Se os termos unificam, o processo tem sucesso e também instancia as variáveis em ambos os termos para os valores que os tornam idênticos

Unificação de Termos

- As regras que regem se dois termos **S** e **T** unificam são:
  - se **S** e **T** são constantes, então **S** e **T** unificam somente se são o mesmo objeto
  - se **S** for uma variável e **T** for qualquer termo, então unificam e **S** é instanciado para **T**
  - se **S** e **T** são estruturas, elas unificam somente se
    - **S** e **T** têm o mesmo functor principal e
    - todos seus componentes correspondentes unificam

Comparação de Termos

Operadores Relacionais	
X = Y	X unifica com Y que é verdadeiro quando dois termos são o mesmo. Entretanto, se um dos termos é uma variável, o operador = causa a instanciação da variável porque o operador causa unificação
X \= Y	X não unifica com Y que é o complemento de X=Y
X == Y	X é literalmente igual a Y (igualdade literal), que é verdadeiro se os termos X e Y são idênticos, ou seja, eles têm a mesma estrutura e todos os componentes correspondentes são os mesmos, incluindo o nome das variáveis
X \== Y	X não é literalmente igual a Y que é o complemento de X==Y
X @< Y	X precede Y
X @> Y	Y precede X
X @=< Y	X precede ou é igual a Y
X @>= Y	Y precede ou é igual a X

Comparação de Termos

```
?- f(a,b) == f(a,b).
yes
?- f(a,b) == f(a,X).
no
?- f(a,X) == f(a,Y).
no
?- X == X.
yes
?- X == Y.
no
?- X \== Y.
yes
?- X \= Y.
no
?- g(X,f(a,Y)) == g(X,f(a,Y)).
yes
```

Precedência de Termos

- A precedência entre termos simples é determinado para ordem alfabética ou numérica
- Variável livres @< números @< átomos @< estruturas
- Uma estrutura precede outra se o functor da primeira tem menor aridade que o da segunda
  - Se duas estruturas têm mesma aridade, a primeira precede a segunda se seu functor é menor que o da outra
  - Se duas estruturas têm mesma aridade e functores iguais, então a precedência é definida (da esquerda para a direita) pelos functores dos seus componentes

Precedência de Termos

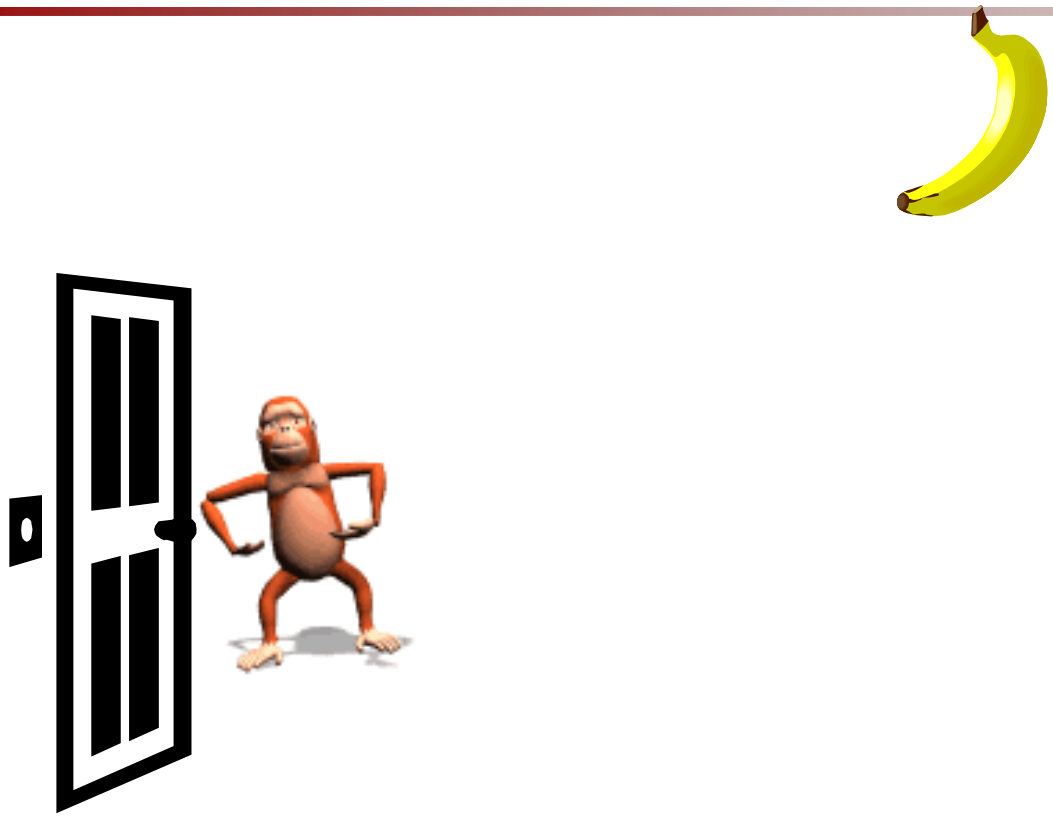
```
?- X @< 10.
yes
?- X @< isaque.
yes
?- X @< f(X,Y).
yes
?- 10 @< sara.
yes
?- 10 @< f(X,Y).
yes
?- isaque @< sara.
yes
```

```
?- g(X) @< f(X,Y).
yes
?- f(Z,b) @< f(a,A).
yes
?- 12 @< 13.
yes
?- 12.5 @< 20.
yes
?- g(X,f(a,Y)) @<
  g(X,f(b,Y)).
yes
```

Unificação de Termos

- Unificação em Prolog é diferente da unificação em Lógica
- A unificação Lógica requer a verificação de ocorrência de uma variável em um termo (*occurs check*), que, por razões de eficiência, não é implementado em Prolog
- Mas de um ponto de vista prático, a aproximação de Prolog é bem adequada
- Exemplo:
  - `?- X = f(X).`
  - `X = f(f(f(f(f(f(f(f(f(f(...)))))))))`

Exemplo: Macaco & Banana

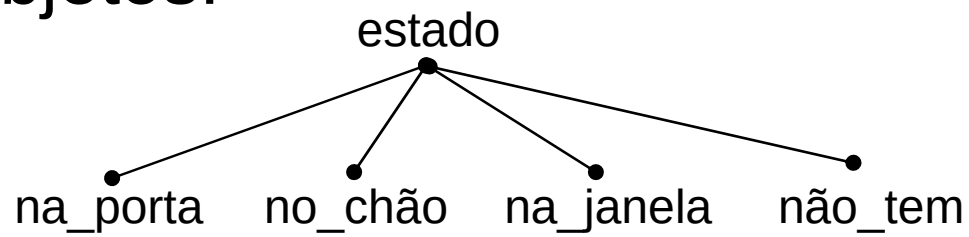


Exemplo: Macaco & Banana

- Um macaco encontra-se próximo à porta de uma sala. No meio da sala há uma banana pendurada no teto. O macaco tem fome e quer comer a banana mas ela está a uma altura fora de seu alcance. Perto da janela da sala encontra-se uma caixa que o macaco pode utilizar para alcançar a banana. O macaco pode realizar as seguintes ações:
  - caminhar no chão da sala;
  - subir na caixa (se estiver ao lado da caixa);
  - empurrar a caixa pelo chão da sala (se estiver ao lado da caixa);
  - pegar a banana (se estiver parado sobre a caixa diretamente embaixo da banana).

Exemplo: Macaco & Banana

- É conveniente combinar essas 4 peças de informação em uma estrutura, cujo functor será **estado**
- Observe que o estado inicial é determinado pela posição dos objetos:



- O estado final é qualquer estado onde o último componente da estrutura é o átomo **tem**
  - estado(_,_,_,tem)

Exemplo: Macaco & Banana

- Possíveis valores para os argumentos da estrutura **estado**
  - 1º argumento (posição horizontal do macaco): na_porta, no_centro, na_janela
  - 2º argumento (posição vertical do macaco): no_chão, acima_caixa
  - 3º argumento (posição da caixa): na_porta, no_centro, na_janela
  - 4º argumento (macaco tem ou não tem banana): tem, não_tem

Exemplo: Macaco & Banana

- Quais os movimentos permitidos que alteram o mundo de um estado para outro?
  - Pegar a banana
  - Subir na caixa
  - Empurrar a caixa
  - Caminhar no chão da sala
- Nem todos os movimentos são possíveis em cada estado do mundo
  - ‘pegar a banana’ somente é possível se o macaco está acima da caixa diretamente abaixo da banana e o macaco ainda não tem a banana
- Vamos formalizar em Prolog usando a relação move
  - `move(Estado1,Movimento,Estado2)`
    onde Estado1 é o estado antes do movimento, Movimento é o movimento executado e Estado2 é o estado após o movimento

Exemplo: Macaco & Banana

- O movimento ‘pegar a banana’ com sua pré-condição no estado antes do movimento pode ser definido por:

```
move(estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,não_tem),
     pegar_banana,
     estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,tem) ).
```

  - Este fato diz que após o movimento o macaco tem a banana e ele permanece acima da caixa no meio da sala
- Vamos expressar o fato que o macaco no chão pode caminhar de qualquer posição horizontal Pos1 para qualquer posição Pos2

```
move(estado(Pos1,no_chão,Caixa,Banana),
     caminhar(Pos1,Pos2),
     estado(Pos2,no_chão,Caixa,Banana) ).
```

- De maneira similar, os movimentos ‘empurrar’ e ‘subir’ podem ser especificados

Exemplo: Macaco & Banana

- A pergunta principal que nosso programa deve responder é: O macaco consegue, a partir de um estado inicial **Estado**, pegar a banana?
- Isto pode ser formulado usando o predicado consegue/1 que pode ser formulado baseado em duas observações:
  - Para qualquer estado no qual o macaco já tem a banana, o predicado consegue/1 certamente deve ser verdadeiro; nenhum movimento é necessário
    - `consegue(estado(_,_,_,tem)).`
  - Nos demais casos, um ou mais movimentos são necessários; o macaco pode obter a banana em qualquer estado Estado1 se há algum movimento de Estado1 para algum estado Estado2 tal que o macaco consegue pegar a banana no Estado2 (em zero ou mais movimentos)
    - ```
      consegue(Estado1) :-
          move(Estado1,Movimento,Estado2),
          consegue(Estado2).
      ```
      ```

Exemplo: Macaco & Banana

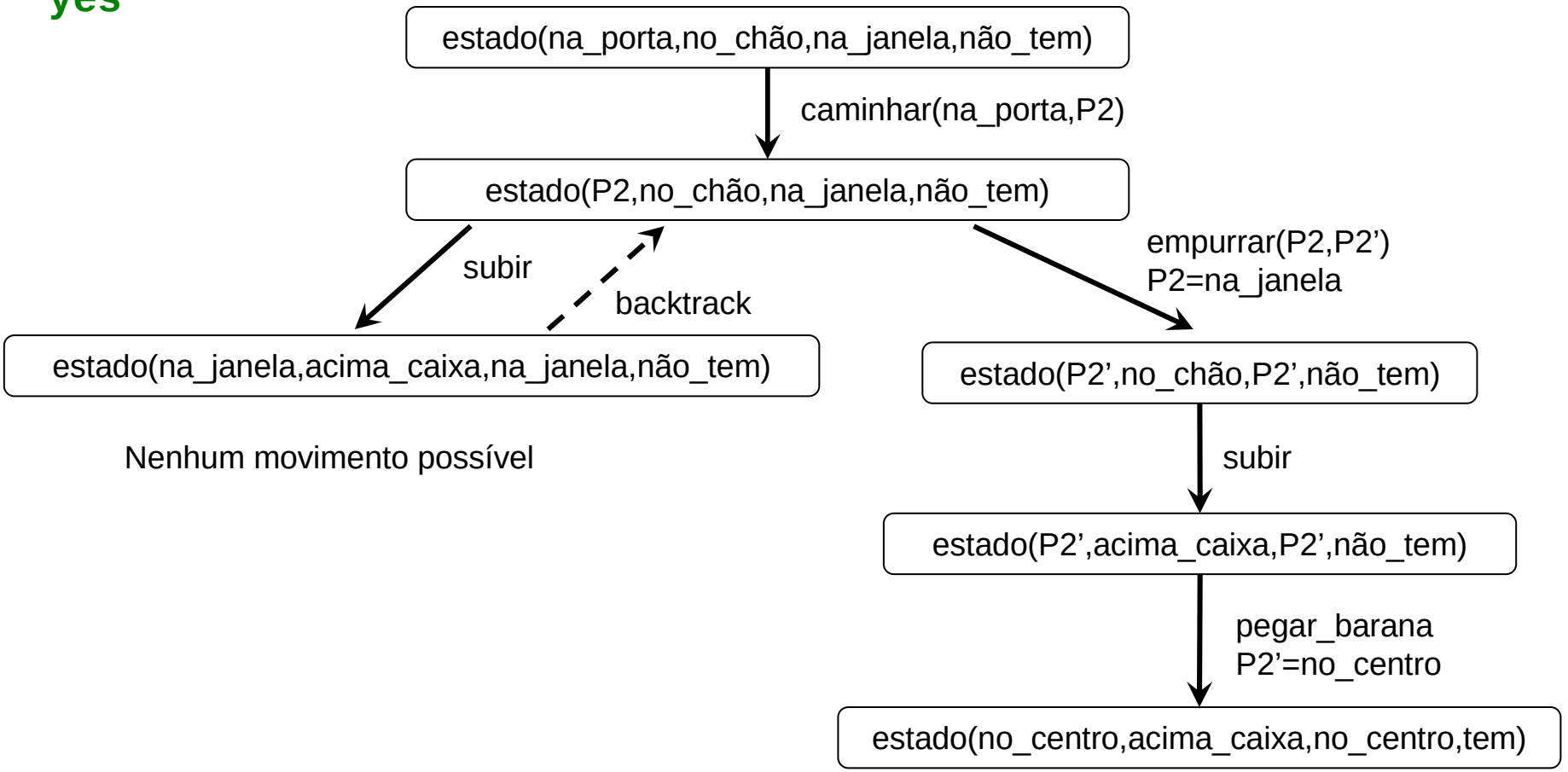
```
move(estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,não_tem),   % antes de mover
     pegar_banana,                                      % pega banana
     estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,tem) ).     % depois de mover
move(estado(P,no_chão,P,Banana),
     subir,                                  % subir na caixa
     estado(P,acima_caixa,P,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,P1,Banana),
     empurrar(P1,P2),                        % empurrar caixa de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,P2,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,Caixa,Banana),
     caminhar(P1,P2),                        % caminhar de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,Caixa,Banana) ).


consegue(estado(_,_,_,tem)).                 % macaco já tem banana

consegue(Estado1) :-                         % movimentar e tentar conseguir
  move(Estado1,Movimento,Estado2),           % a banana
  consegue(Estado2).
```

Exemplo: Macaco & Banana

```
?- consegue(estado(na_porta,no_chão,na_janela,não_tem)).
yes
```



Listas

- Lista é uma das estruturas mais simples em Prolog, muito comum em programação não numérica
- Ela é uma sequência ordenada de elementos
- Uma lista pode ter qualquer comprimento
- Por exemplo uma lista de elementos tais como **ana**, **tênis**, **pedro** pode ser escrita em Prolog como:
  - [ana, tênis, pedro]

Listas

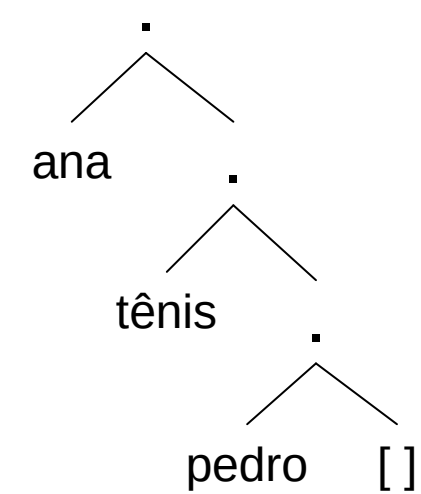
- O uso de colchetes é apenas uma melhoria da notação, pois internamente listas são representadas como árvores, assim como todos objetos estruturados em Prolog
- Para entender a representação Prolog de listas, é necessário considerar dois casos
  - A lista é vazia, escrita como **[ ]** em Prolog
  - Uma lista (não vazia) consiste:
    - no primeiro item, chamado ***cabeça*** (*head*) da lista
    - na parte restante da lista, chamada ***cauda*** (*tail*)

Listas

- No exemplo [ana, tênis, pedro]
  - **ana** é a Cabeça da lista
  - **[tênis, pedro]** é a Cauda da lista
- A cabeça de uma lista pode ser qualquer objeto (inclusive uma lista); a cauda tem que ser uma lista
- A Cabeça e a Cauda são então combinadas em uma estrutura pelo functor especial **.**
  - **.**(Cabeça, Cauda)
- Como a Cauda é uma lista, ela é vazia ou ela tem sua própria cabeça e sua cauda

Listas

- Assim, para representar listas de qualquer comprimento, nenhum princípio adicional é necessário
- O exemplo [ana, tênis, pedro] é representando como o termo:
  - .(ana, .(tênis, .(pedro, [])))
- O programador pode escolher ambas notações



Listas

```
?- Lista1 = [a,b,c],
   Lista2 = .(a,.(b,.(c,[]))).
Lista1 = [a, b, c]
Lista2 = [a, b, c]

?- Hobbies1 = .(tênis, .(música,[])),
   Hobbies2 = [esqui, comida],
   L = [ana,Hobbies1,pedro,Hobbies2].
Hobbies1 = [tênis,música]
Hobbies2 = [esqui,comida]
L = [ana, [tênis,música], pedro, [esqui,comida]]
```

Listas

- Em geral, é comum tratar a cauda como um objeto simples
- Por exemplo, L = [a,b,c] pode ser escrito como
  - Cauda = [b,c]
  - L = .(a,Cauda)
- Para expressar isso, Prolog fornece uma notação alternativa, a **barra vertical**, que separa a cabeça da cauda
  - L = [a **|** Cauda]
- A notação é geral por permitir qualquer número de elementos seja seguido por **|** e o restante da lista:
  - [a,b,c] = [a **|** [b,c]] = [a,b **|** [c]] = [a,b,c **|** [ ]]

Unificação em Listas

Lista1	Lista2	Lista1 = Lista2
[mesa]	[X|Y]	X=mesa Y=[ ]
[a,b,c,d]	[X,Y|Z]	X=a Y=b Z=[c,d]
[[ana,Y]|Z]	[[X,foi],[ao,cinema]]	X=ana Y=foi Z=[[ao,cinema]]
[ano,bissexto]	[X,Y|Z]	X=ano Y=bissexto Z=[ ]
[ano,bissexto]	[X,Y,Z]	Não unifica

Operações em Listas

- Frequentemente, é necessário realizar operações em listas, por exemplo, buscar um elemento que faz parte de uma lista
- Para isso, a recursão é o recurso mais amplamente empregado
- Para verificar se um nome está na lista, é preciso verificar se ele está na cabeça ou se ele está na cauda da lista
- Se o final da lista for atingido, o nome não está na lista

Predicado de Pertinência

- Inicialmente, é necessário definir o nome do predicado que verifica se um elemento **X** pertence ou não a uma lista **Y**, por exemplo, **pertence(X,Y)**
- A primeira condição especifica que um elemento **X** pertence à lista se ele está na cabeça dela. Isto é indicado como:
  - pertence(X,[X|Z]).
- A segunda condição especifica que um elemento **X** pertence à lista se ele pertencer à sua cauda. Isto pode ser indicado como:
  - pertence(X,[W|Z]) :-
    pertence(X,Z).

Predicado de Pertinência

- Sempre que um programa recursivo é definido, deve-se procurar pelas condições limites (ou condições de parada) e pelo caso(s) recursivo(s):
  - `pertence(Elemento,[Elemento|Cauda]).`
  - `pertence(Elemento,[Cabeca|Cauda]) :-`
    `pertence(Elemento,Cauda).`
- Após a definição do programa, é possível interrogá-lo. Por exemplo,

```
?- pertence(a,[a,b,c]).
yes
```

Predicado de Pertinência

- ```
  ?- pertence(d,[a,b,c]).
  no
  ```
- ```
  ?- pertence(X,[a,b,c]).
  X = a ;
  X = b ;
  X = c ;
  no
  ```
- Entretanto, se as perguntas forem:
  - `?- pertence(a,X).`
  - `?- pertence(X,Y).`
- deve-se observar que cada uma delas tem infinitas respostas, pois existem infinitas listas que validam essas perguntas para o programa pertence/2

Modo de Chamada de Predicados

- Para documentar como um predicado deve ser chamado, utiliza-se a notação (como comentário no programa):
  - **+** o argumento é de entrada (deve estar instanciado)
  - **–** o argumento é de saída (não deve estar instanciado)
  - **?** o argumento é de entrada e saída (pode ou não estar instanciado)
- O predicado **pertence/2** documentado com o modo de chamada é:

```
% pertence(?Elemento, +Lista)
pertence(E, [E|_]).
pertence(E, [_|Cauda]) :-
   pertence(E,Cauda).
```

Exercícios

- Definir predicado **último** que encontra o último elemento de uma lista
  - O último elemento de uma lista que tenha somente um elemento é o próprio elemento
  - O último elemento de uma lista que tenha mais de um elemento é o ultimo elemento da cauda
- Concatenar duas listas, formando uma terceira
  - Se o primeiro argumento é a lista vazia, então o segundo e terceiro argumentos devem ser o mesmo
  - Se o primeiro argumento é a lista não-vazia, então ela tem uma cabeça e uma cauda da forma [X|L1]; concatenar [X|L1] com uma segunda lista L2 resulta na lista [X|L3], onde L3 é a concatenação de L1 e L2
- Defina uma nova versão do predicado último utilizando a concatenação de listas

Último Elemento de uma Lista

- O último elemento de uma lista que tenha somente um elemento é o próprio elemento
  `ultimo(Elemento, [Elemento]).`
- O último elemento de uma lista que tenha mais de um elemento é o ultimo elemento da cauda

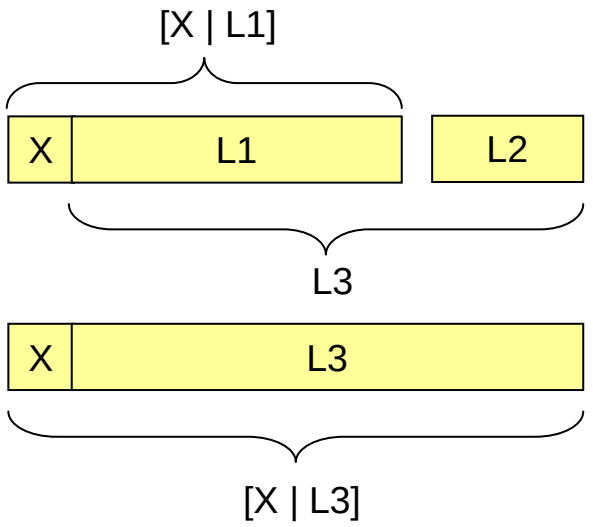
```
ultimo(Elemento, [Cabeca|Cauda]) :-
    ultimo(Elemento,Cauda).
```

- Programa completo:

```
% ultimo(?Elemento, +Lista)
ultimo(Elemento, [Elemento]).
ultimo(Elemento, [Cabeca|Cauda]) :-
    ultimo(Elemento,Cauda).
```

Concatenar Listas

- Se o primeiro argumento é a lista vazia, então o segundo e terceiro argumentos devem ser o mesmo
```
concatenar([],L,L).
```
- Se o primeiro argumento é a lista não-vazia, então ela tem uma cabeça e uma cauda da forma [X|L1]; concatenar [X|L1] com uma segunda lista L2 resulta na lista [X|L3], onde L3 é a concatenação de L1 e L2
```
concatenar([X|L1],L2,[X|L3]) :-
  concatenar(L1,L2,L3).
```
- Programa completo:
- `% concatenar(?/+L1,?/?L2,+/?L)`
- `concatenar([],L,L).`
- `concatenar([X|L1],L2,[X|L3]) :-`
  `concatenar(L1,L2,L3).`



Exemplo: Macaco & Banana

```
move(estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,não_tem),   % antes de mover
     pegar_banana,                                      % pega banana
     estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,tem) ).     % depois de mover
move(estado(P,no_chão,P,Banana),
     subir,                                 % subir na caixa
     estado(P,acima_caixa,P,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,P1,Banana),
     empurrar(P1,P2),                       % empurrar caixa de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,P2,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,Caixa,Banana),
     caminhar(P1,P2),                       % caminhar de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,Caixa,Banana) ).

consegue(estado(_,_,_,tem),[]).             % macaco já tem banana
consegue(Estado1,[Movimento|Resto]) :-      % movimentar e tentar conseguir
  move(Estado1,Movimento,Estado2),          % a banana
  consegue(Estado2,Resto).

?- consegue(estado(na_porta,no_chão,na_janela,não_tem),X).
X = [caminhar(na_porta,na_janela), empurrar(na_janela, no_centro), subir,
   pegar_banana]
```

Operadores

- Em várias situações é conveniente escrever functores como **operadores**
- Esta é uma forma sintática que facilita a leitura de estruturas
- Por exemplo, numa expressão aritmética como 2*a+b*c
  - **+** e ***** são operadores
  - **2**, **a**, **b** são argumentos
- Esta expressão aritmética na sintaxe normal de estruturas (termos) é:
  - +(*(2,a), *(b,c))
- Entretanto, é importante lembrar que os operadores não "realizam" nenhuma aritmética: o 3+4 não é a mesma coisa que 7
  - O termo 3+4 é representado como +(3,4), que é uma estrutura
  - Assim, escrever 3+4 é equivalente a escrever +(3,4)

Operadores

- De forma que Prolog entenda apropriadamente expressões tais como a+b*c, Prolog deve conhecer que * tem precedência sobre +
- Assim, a precedência de operadores decide qual é a correta interpretação de expressões
- Prolog permite a declaração de novos operadores, por exemplo, podemos definir os átomos **tem** e **suporta** como operadores e escrever no programa fatos tais como:
  - pedro tem informação.
  - chão suporta mesa.
- Estes fatos são equivalentes à:
  - tem(pedro,informação).
  - suporta(chão,mesa).

Operadores

- A definição de um operador deve aparecer por meio de uma diretiva antes da expressão contendo o operador
- No exemplo anterior, o operador **tem** pode ser definido por meio da diretiva
  - :- op(600,xfx,tem).
  - Isso informa Prolog que desejamos usar **tem** como operador, cuja precedência é 600 e seu tipo é ‘xfx’, que é um tipo de operador infixo
  - A forma ‘xfx’ sugere que o operador, denotado pela letra ‘f’ está entre dois argumentos, denotados por ‘x’
- Novamente, a definição de operadores não especifica nenhuma operação ou ação e são usados apenas para combinar objetos em estruturas

Operadores

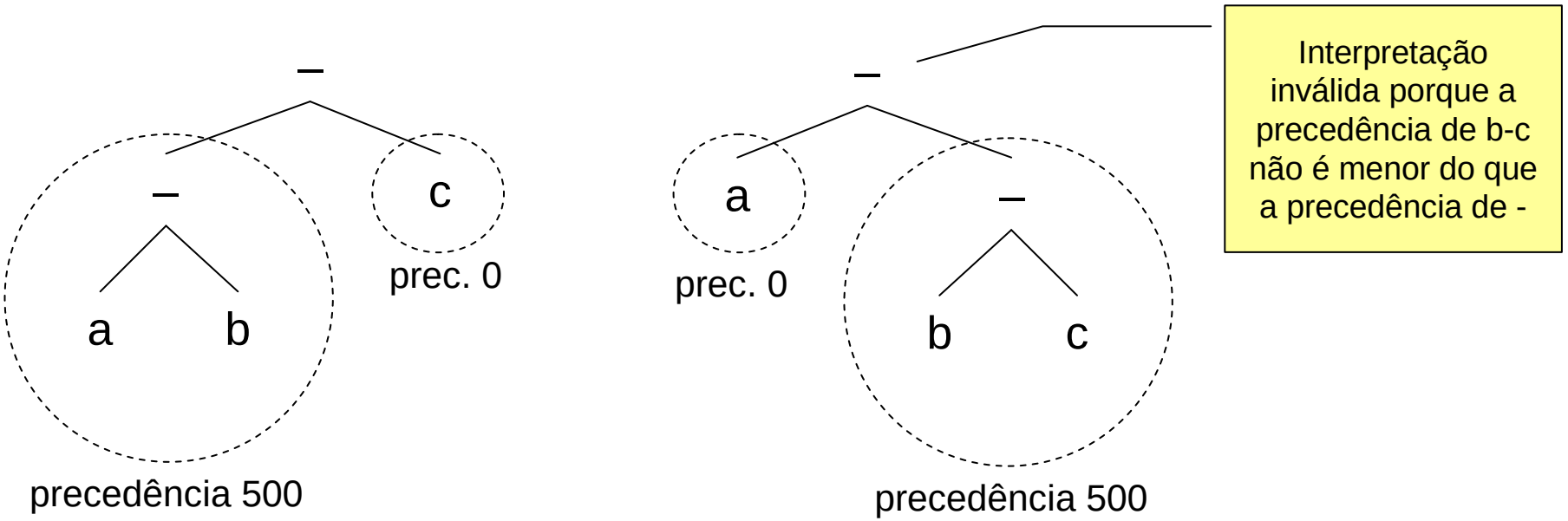
- Os nomes dos operadores devem ser átomos
- A precedência varia em algum intervalo, dependendo da implementação Prolog (1-1200)
- Há 3 grupos tipos de operadores, indicados pelos especificadores tal como xfx:
  - (1) Operadores infixos de três tipos: **`xfx, xfy, yfx`**
  - (2) Operadores pré-fixos de dois tipos: **`fx, fy`**
  - (3) Operadores pós-fixos de dois tipos: **`xf, yf`**

Operadores

- Os especificadores são escolhidos para refletir a estrutura da expressão, onde:
  - **f** representa o operador
  - **x** representa um argumento cuja precedência é estritamente menor que a do operador
  - **y** representa um argumento cuja precedência é menor ou igual à do operador
- A precedência de um argumento colocado entre parênteses ou de um objeto não estruturado é zero
- Se um argumento é uma estrutura, então sua precedência é igual à precedência de seu functor principal

Operadores

- Por exemplo a-b-c é entendido como (a-b)-c e não como a-(b-c)
  - Assumindo que – tenha precedência 500
  - O operador – tem que ser definido como yfx



Operadores

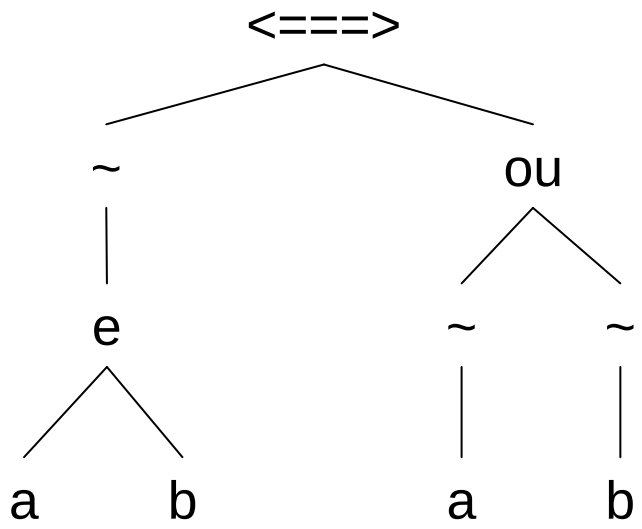
- Exemplo de alguns operadores pré-definidos
  - `:-op(1200,xfx,[-->,:-]).`
  - `:-op(1200,fx,[:-,?-]).`
  - `:-op(1100,xfy,[';',|]).`
  - `:-op(1050,xfy,->).`
  - `:-op(1000,xfy,',').`
  - `:-op(954,xfy,\).`
  - `:-op(900,fy,['\+',not]).`
  - `:-op(700,xfx,[is,<,=,=..,=@=,=:=,=<,==,=\=,`
    `>,>=,@<, @=<,@>,@>=,\=,\==]).`
  - `:-op(600,xfy,:).`
  - `:-op(500,yfx,[+,-]).`
  - `:-op(500,fx,[+,-]).`
  - `:-op(400,yfx,[*,/,//,mod]).`
  - `:-op(200,xfx,**).`
  - `:-op(200,xfy,^).`

Exemplo

- Assumindo as diretrizes
  - `:-op(800,xfx,<===>).`
  - `:-op(700,xfy,ou).`
  - `:-op(600,xfy,e).`
  - `:-op(500,fy,~).`
- Como é interpretada a expressão
  ~(a e b) <===> ~a ou ~b

Exemplo

- ~(a e b) <===> ~a ou ~b é interpretado como <===>(~(e(a, b)), ou(~(a), ~(b))
  - `:-op(800,xfx,<===>).`
  - `:-op(700,xfy,ou).`
  - `:-op(600,xfy,e).`
  - `:-op(500,fy,~).`



Predicados para (De)composição Termos

- **atom_chars(A,L)**: converte um átomo A em uma lista L composta pelos caracteres (e vice-versa)
  - `?- atom_chars(laranja,X).`
  - `X = [l,a,r,a,n,j,a]`
  - `?- atom_chars(Z,[m,a,c,a,c,o]).`
  - `Z = macaco`
- **number_chars(A,L):** Similar ao predicado atom_chars, mas para números
  - `?- number_chars(123.5,X).`
  - `X = ['1', '2', '3', '.', '5']`
  - `?- number_chars(X,['1', '2', '3']).`
  - `Z = 123`
- Algumas implementações Prolog fornecem o predicado **name(A,L)** que tem a mesma funcionalidade que atom_chars(A,L) e number_chars(A,L) combinados

Predicados para (De)composição Termos

- **Termo =.. L**: é verdadeiro se L é uma lista contendo o functor principal de Termo, seguido pelos seus argumentos
  - **=..** é lido como **univ**
- **functor(Termo,F,N)**: é verdadeiro se Termo é uma estrutura com functor F e aridade N
- **arg(N,Termo,A)**: é verdadeiro se o N-ésimo argumento do Termo é A

Predicados para (De)composição Termos

```
?- f(a,b) =.. L.
L = [f,a,b]
?- T =.. [retângulo,3,5].
T = retângulo(3,5)
?- Z =.. [p,X,f(X,Y)].
Z = p(X,f(X,Y))
?- (a+b) =.. [F,X,Y].
F = +, X = a, Y = b
?- [a,b,c,d] =.. L.
L = [.,a,[b,c,d]]
?- [a,b,c,d] =.. [X|Y].
X = ., Y = [a,[b,c,d]]
?- X =.. [a,b,c,d].
X = a(b,c,d)
?- X =.. [concatenar,[a,b],[c],[a,b,c]].
X = concatenar([a,b],[c],[a,b,c])
```

Predicados para (De)composição Termos

```
?- functor(t(f(x),x,t),F,Aridade).
F = t, Aridade = 3
?- functor(a+b,F,N).
F = +, N = 2
?- functor(f(a,b,g(Z)),F,N).
Z = _G309, F = f, N = 3
?- functor([a,b,c],F,N).
F = ., N = 2
?- functor(laranja,F,N).
F = laranja, N = 0
?- functor([a,b,c],'.',3).
no
?- functor([a,b,c],a,Z).
no
```

Predicados para (De)composição Termos

```
?- arg(1,t(f(x),y,t),Arg).
Arg = f(x)
?- arg(2,t(f(x),y,t),Arg).
Arg = y
?- arg(1,a+(b+c),Arg).
Arg = a
?- arg(2,[a,b,c],X).
X = [b,c]
?- arg(1,a+(b+c),b).
no
?- functor(D,data,3), arg(1,D,29),
   arg(2,D,janeiro), arg(3,D,2004).
D = data(29,janeiro,2004)
```

Predicados para (De)composição Termos

- Termos construídos com o predicado **=..**, podem ser usados como metas
- A vantagem é que o programa pode modificar-se a si próprio durante a execução, gerando e executando metas de formas que não foram necessariamente previstas quando o programa foi escrito
- O seguinte fragmento ilustra essa idéia
  - ```
    obter(Functor),
    calcular(ListaArgumentos),
    Meta =.. [Functor | ListaArgumentos],
    Meta.
    ```
  - obter/1 e calcular/1 são predicados definidos pelo usuário para obter os componentes da meta a ser construída; a meta é então construída por **=..** e disparada sua execução simplesmente por meio de seu nome, Meta
    ```

Predicados para (De)composição Termos

- Algumas implementações Prolog exigem que todas as metas sejam átomos ou estruturas com um átomo como functor principal
- Assim, uma variável, mesmo que instanciada, não é sintaticamente aceita como uma meta
- O problema é solucionado por meio do predicado **call/1**, assim o fragmento anterior torna-se:
  - ```
    obter(Functor),
    calcular(ListaArgumentos),
    Meta =.. [Functor | ListaArgumentos],
    call(Meta).
    ```
    ```

Semântica de Programas Prolog

- Considere a cláusula onde P, Q e R são termos:
  - P :- Q, R.
- Significado Declarativo:
  - P é verdadeiro se Q e R são verdadeiros
  - P segue (consequência) de Q e R
  - De (a partir de) Q e R segue P
- Significado Procedural:
  - Para resolver o problema P, resolva primeiro sub-problema Q e então o sub-problema R
  - Para satisfazer P, primeiro satisfaça Q e então R
- A diferença entre os significados declarativo e procedural é que o último não apenas define as relações lógicas entre a cabeça da cláusula e as condições no corpo, mas também a ***ordem*** na qual as condições são executadas

Semântica de Programas Prolog

- O significado declarativo determina quando uma dada condição é verdadeira e, se for, para quais valores das variáveis ela é verdadeira
- O significado procedural determina como Prolog responde perguntas

Significado Declarativo

- Em geral, uma meta em Prolog é uma lista de condições separadas por vírgulas que é verdadeira se todas as condições na lista são verdadeiras para uma determinada instanciação de variáveis
- A vírgula denota conjunção (**e**): todas as condições devem ser verdadeiras:
  - X, Y neste exemplo X **e** Y devem ser ambos verdadeiros para X,Y ser verdadeiro
- O ponto-e-vírgula denota disjunção (**ou**): qualquer uma das condições em uma disjunção tem que ser verdadeira
  - X;Y neste exemplo basta que X (ou Y) seja verdadeiro para X;Y ser verdadeiro
- O operador **\+** denota a negação (**não**): é verdadeiro se o que está sendo negado não puder ser provado por Prolog
  - **\+X** é verdadeiro se **X** falha
  - Na sintaxe de Edinburgh o operador **\+** é denotado por **not**
- O predicado **true/0** sempre é verdadeiro
- O predicado **fail/0** sempre falha

Significado Declarativo

- A cláusula
  - P :- Q ; R.
- é lida como: P é verdade se Q é verdade ou R é verdade. É equivalente às duas cláusulas:
  - P :- Q.
  - P :- R.
- A conjunção (**,**) tem precedência sobre a disjunção (**;**), assim a cláusula:
  - P :- Q, R; S, T, U.
- é interpretada como:
  - P :- (Q, R) ; (S, T, U).
- e tem o mesmo significado que:
  - P :- Q, R.
  - P :- S, T, U.

Significado Procedural

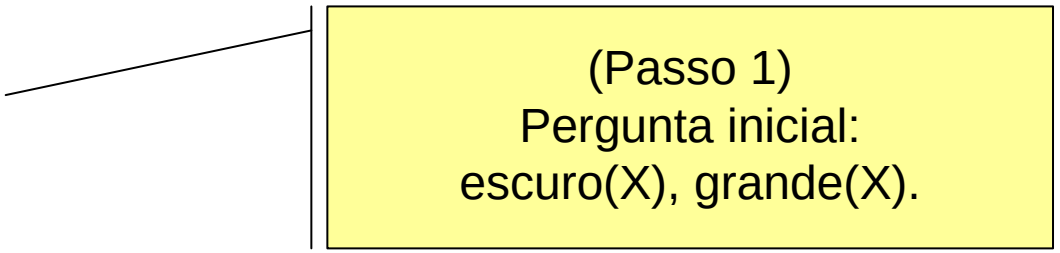
```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```



Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 2)

Procure de cima para baixo por uma cláusula cuja cabeça unifique com a primeira condição da pergunta escuro(X)

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 2)

Procure de cima para baixo por uma cláusula cuja cabeça unifique com a primeira condição da pergunta escuro(X).

Cláusula 7 encontrada

escuro(Z) :- preto(Z).

Troque a primeira condição pelo corpo instanciado da cláusula 7, obtendo a nova lista de condições:

preto(X), grande(X).

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 3)
Nova meta: preto(X), grande(X).

Procure por uma cláusula que unifique com preto(X)
Cláusula 5 encontrada
preto(gato)
Esta cláusula não tem corpo, assim a lista de condições depois de instanciada torna-se:
grande(gato).
uma vez que já se provou preto(gato)
X instancia com gato

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 4)
Nova meta: grande(gato).

Procure por uma cláusula que unifique com grande(gato).
Nenhuma cláusula é encontrada.
Volte (backtrack) para o Passo 3, desfazendo a instanciação X=gato
Novamente a meta é preto(X), grande(X).

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 4)
meta: preto(X), grande(X).

Continue procurando após a Cláusula 5. Nenhuma cláusula é encontrada. Volte (backtrack) ao Passo 2 e continue procurando após a cláusula 7. Cláusula 8 encontrada:
escuro(Z) :- marrom(Z).
Troque a primeira condição pelo corpo instanciado da cláusula 8, obtendo a nova lista de condições:
marrom(X), grande(X).

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 5)
meta: marrom(X), grande(X).

Procure por uma cláusula que unifique com marrom(X)
Cláusula 4 encontrada
marrom(urso)
Esta cláusula não tem corpo, assim a lista de condições depois de instanciada torna-se:
grande(urso).
uma vez que já se provou marrom(urso)
X instancia com urso

Significado Procedural

```
grande(urso).          % Cláusula 1
grande(elefante).      % Cláusula 2
pequeno(gato).         % Cláusula 3
marrom(urso).          % Cláusula 4
preto(gato).           % Cláusula 5
cinza(elefante).       % Cláusula 6
escuro(Z) :-           % Cláusula 7
  preto(Z).
escuro(Z) :-           % Cláusula 8
  marrom(Z).

?- escuro(X), grande(X).
```

(Passo 6)
meta: grande(urso).

Procure por uma cláusula que unifique com grande(urso)
Cláusula 1 encontrada
grande(urso)
Esta cláusula não tem corpo, assim a lista de condições torna-se vazia.
Isto indica um término com sucesso e a instanciação correspondente é
X = urso

Ordem das Cláusulas

- No exemplo do “Macaco & Banana”, as cláusulas sobre a relação **move** foram ordenadas como: pegar a banana, subir na caixa, empurrar a caixa e caminhar
- Estas cláusulas dizem que pegar é possível, subir é possível, etc
- De acordo com o significado procedural de Prolog, a ordem das cláusulas indica que o macaco prefere pegar a subir, subir a empurrar, etc.
- Esta ordem, na realidade, ajuda o macaco a resolver o problema
- Todavia, o que aconteceria se a ordem fosse diferente? Por exemplo, vamos assumir que a cláusula sobre ‘caminhar’ apareça em primeiro lugar

Macaco & Banana (Original)

```
move(estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,não_tem),   % antes de mover
     pegar_banana,                                      % pega banana
     estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,tem) ).     % depois de mover
move(estado(P,no_chão,P,Banana),
     subir,                                  % subir na caixa
     estado(P,acima_caixa,P,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,P1,Banana),
     empurrar(P1,P2),                        % empurrar caixa de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,P2,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,Caixa,Banana),
     caminhar(P1,P2),                        % caminhar de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,Caixa,Banana) ).


consegue(estado(_,_,_,tem)).                 % macaco já tem banana

consegue(Estado1) :-                         % movimentar e tentar conseguir
  move(Estado1,Movimento,Estado2),           % a banana
  consegue(Estado2).
```

Macaco & Banana (Ordem Alterada)

```
move(estado(P1,no_chão,Caixa,Banana),
     caminhar(P1,P2),                          % caminhar de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,Caixa,Banana) ).
move(estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,não_tem),   % antes de mover
     pegar_banana,                                      % pega banana
     estado(no_centro,acima_caixa,no_centro,tem) ).     % depois de mover
move(estado(P,no_chão,P,Banana),
     subir,                                    % subir na caixa
     estado(P,acima_caixa,P,Banana) ).
move(estado(P1,no_chão,P1,Banana),
     empurrar(P1,P2),                          % empurrar caixa de P1 para P2
     estado(P2,no_chão,P2,Banana) ).


consegue(estado(_,_,_,tem)).                   % 1a cláusula de consegue/1

consegue(Estado1) :-                           % 2a cláusula de consegue/1
  move(Estado1,Movimento,Estado2),
  consegue(Estado2).
```

Ordem das Cláusulas

- Vamos analisar a execução da versão com ordem alterada da pergunta
  ?- consegue(estado(na_porta,no_chão,na_janela,não_tem)).
- Que produz a seguinte execução (variáveis renomeadas apropriadamente):
  (1) consegue(estado(na_porta,no_chão,na_janela,não_tem))
    - A segunda cláusula de consegue/1 é aplicada

  (2) move(estado(na_porta,no_chão,na_janela,não_tem),M',S2'), consegue(S2')
    - Por meio do movimento **caminhar(na_porta,P2')** temos:

  (3) consegue(estado(P2',no_chão,na_janela,não_tem))
    - A segunda cláusula de consegue/1 é aplicada novamente

  (4) move(estado(P2',no_chão,na_janela,não_tem),M'',S2''), consegue(S2'')
    - Agora ocorre a diferença: a primeira cláusula cuja cabeça unifica com a primeira meta acima é **caminhar** (e não **subir** como antes). A instanciação é S2'' = estado(P2'',no_chão,na_janela,não_tem), portanto a lista de metas se torna

  (5) consegue(estado(P2'',no_chão,na_janela,não_tem))
    - Novamente, a segunda cláusula de consegue/1 é aplicada

  (6) move(estado(P2'',no_chão,na_janela,não_tem),M''',S2'''), consegue(S2''')
    - Novamente, **caminhar** é tentado primeiro, produzindo

  (7) consegue(estado(P2''',no_chão,na_janela,não_tem))
- As metas (3), (5) e (7) são as mesmas, exceto por uma variável; e o sucesso de uma meta não depende do nome particular das variáveis envolvidas
- Assim, a partir da meta (3) a execução não mostra progresso algum

Ordem das Cláusulas

- Nota-se que a segunda cláusula de consegue/1 e cláusula caminhar de move/1 são usadas repetidamente
- O macaco caminha sem nunca tentar usar a caixa
- Como não há progresso, isso procede infinitamente: Prolog não percebe que não há sentido em continuar utilizando esta linha de raciocínio
- Este exemplo mostra Prolog tentando resolver um problema de modo que a solução nunca é encontrada, embora exista uma solução
- O programa está declarativamente correto, mas proceduralmente incorreto no sentido que ele não é capaz de produzir uma resposta à pergunta

Pontos Importantes

- Objetos simples em Prolog são átomos, números e variáveis
- Objetos estruturados, ou estruturas, são utilizados para representar objetos que possuem vários componentes
- Estruturas são construídas por meio de functores; cada functor é definido por seu nome e aridade
- O escopo léxico de uma variável é uma cláusula; assim o mesmo nome de variável em duas cláusulas significam duas variáveis diferentes

Pontos Importantes

- Estruturas podem ser vistas como árvores; Prolog pode ser vista como uma linguagem para processamento de árvores
- A operação de unificação toma dois termos e tenta torná-los idênticos por meio da instanciação das variáveis em ambos os termos
- A ordem das cláusulas pode afetar a eficiência do programa; uma ordem indevida pode até mesmo causar chamadas recursivas infinitas

Slides baseados em:

Bratko, I.;
Prolog Programming for Artificial Intelligence,
3rd Edition, Pearson Education, 2001.

Clocksin, W.F.; Mellish, C.S.;
Programming in Prolog,
5th Edition, Springer-Verlag, 2003.

Programas Prolog para o
Processamento de Listas e Aplicações,
Monard, M.C & Nicoletti, M.C., ICMC-USP, 1993

Material elaborado por
José Augusto Baranauskas
2004; Revisão 2007