INE5416
Paradigmas de Programação

Ricardo Azambuja Silveira
INE-CTC-UFSC
E-Mail: silveira@inf.ufsc.br
URL: www.inf.ufsc.br/~silveira

CTC • UFSC
Informática e Estatística

Programação em Lógica

PROLOG

- Introdução e Histórico
  - PROgramming in LOGic é fruto de pesquisas na área de Prova Automática de Teoremas.
  - Foi criada por Robert Kowalski (na parte teórica), Maarten van Emden (na demostração experimental) e Alain Colmerauer (na implementação) por volta de 1970 na Universidade de Marselha, França.
  - O primeiro compilador eficiente foi desenvolvido na Universidade de Edimburgo, Escócia.
  - O ambiente de execução da linguagem PROLOG é, na realidade, um provador automático de teoremas
  - É uma linguagem declarativa, onde se diz “o que fazer” para atingir um objetivo, o que leva a um nível mais elevado de abstração na solução dos problemas.

PROLOG

- Introdução e Histórico
  - Segundo Bratko, “pensar a respeito do problema e aprender a programar em PROLOG constitui-se em um desafio intelectual excitante”.
  - Cada linha de PROLOG corresponde a uma afirmação.
  - A variável compreendida na afirmação deve ser entendida como UNIVERSALMENTE quantificada. Assim, a declaração pai_de(X,Y) corresponde a ∀X∀Y pai_de(X,Y).

PROLOG

- Características
  - Normalmente, variáveis e constantes são diferenciadas pela primeira letra:
    - Símbolos iniciados por minúscula são constantes; e
    - Símbolos iniciados por letra maiúscula são variáveis.
  - O escopo léxico de nomes de variáveis é apenas uma cláusula.
  - Isto quer dizer que, por exemplo, se o nome de variável X25 ocorre em duas cláusulas diferentes, então ela está representando duas variáveis diferentes.
  - Por outro lado, toda ocorrência de X25 dentro da mesma cláusula quer significar a mesma variável.
  - Esta situação é diferente para as constantes: o mesmo nome sempre significa o mesmo objeto ao longo de todo o programa.

PROLOG

- Introdução e Histórico
  - Em PROLOG, as cláusulas são escritas na forma de regras, com a (única) conclusão no início.
  - B1(X1,...,Xk) :- A1(X1,...,Xk),...,Am(X1,...,Xk).
  - B1(X1,...,Xk).
  - B1 :- A1,..,Am.
  - B1.
  - O único literal de uma cláusula (que aparece antes do símbolo :-) é chamado cabeça da cláusula.
  - Os literais que aparecem depois do símbolo :-) são chamados corpo da cláusula.

PROLOG

- Exemplo Introdutório
  - progenitor(maria,josé). % Maria é progenitor de José.
  - progenitor(joão, josé).
  - progenitor(joão, ana).
  - progenitor(josé, júlia).
  - progenitor(josé, íris).
  - progenitor(íris, jorge).
  - masculino(joão). % João é do sexo masculino.
  - masculino(josé).
  - masculino(jorge).
  - feminino(maria). % Maria é do sexo feminino.
  - feminino(ana).
  - feminino(júlia).
  - feminino(íris).

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- O efeito das entradas anteriores é o armazenamento destas fórmulas atômicas representando fatos em uma base de conhecimentos PROLOG.
- Se o programa for submetido a um sistema Prolog, este será capaz de responder algumas questões sobre a relação ali representada. Por exemplo: "José é o progenitor de Íris?".
  - ?-progenitor(josé, íris).
- Uma outra questão poderia ser: "Ana é um dos progenitores de Jorge?”
  - ?-progenitor(ana, jorge).

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- Perguntas mais interessantes podem também ser formuladas, por exemplo: "Quem é progenitor de Íris?”
  - ?-progenitor(X, íris).
- Da mesma forma a questão "Quem são os filhos de José?" pode ser formulada com a introdução de uma variável na posição do argumento correspondente ao filhos de José
  - ?-progenitor(josé, X).
- Uma questão mais geral para o programa seria: "Quem é progenitor de quem?
  - ?-progenitor(X, Y).

PROLOG

- Exemplo Introdutório
- Pode-se formular questões ainda mais complicadas ao programa, como "Quem são os avós de Jorge?". Como nosso programa não possui diretamente a relação avô, esta consulta precisa ser dividida em duas etapas. A saber:

  (1) Quem é progenitor de Jorge? (Por exemplo, Y) e

  (2) Quem é progenitor de Y? (Por exemplo, X)
- Esta consulta em Prolog é escrita como uma seqüência de duas consultas simples, cuja leitura pode ser: "Encontre X e Y tais que X é progenitor de Y e Y é progenitor de Jorge".
  - ?-progenitor(X, Y), progenitor(Y, jorge).
    - X=josé Y=íris

PROLOG

- Pontos Básicos
- Uma relação qualquer,como progenitor, pode ser facilmente definida em Prolog estabelecendo-se as tuplas de objetos que satisfazem a relação;
- O usuário pode facilmente consultar o sistema Prolog sobre as relações definidas em seu programa;
- Um programa Prolog é constituído de cláusulas, cada uma das quais é encerrada por um ponto (.);
- Os argumentos das relações podem ser objetos concretos (como júlia e íris) ou objetos genéricos (como X e Y). Objetos concretos em um programa são denominados átomos, enquanto que os objetos genéricos são denominados variáveis;

PROLOG

- Pontos Básicos
- Consultas ao sistema são constituídas por um ou mais objetivos, cuja seqüência denota a sua conjunção;
- Uma resposta a uma consulta pode ser positiva ou negativa, dependendo se o objetivo correspondente foi alcançado ou não. No primeiro caso dizemos que a consulta foi bem-sucedida e, no segundo, que a consulta falhou;
- Se várias respostas satisfizerem a uma consulta, então o sistema Prolog irá fornecer tantas quantas forem desejadas pelo usuário.

PROLOG

- Exemplo Introdutório
  - A capacidade do PROLOG não se limita à busca por fatos que representam objetos e suas relações em uma base de conhecimentos;
  - É possível também armazenar regras.
  - As regras definem as condições que devem ser satisfeitas para que uma certa declaração seja considerada verdadeira.

```
? -mae(X,Y) :- progenitor(X,Y), feminino(X).
? -pai(X,Y) :- progenitor(X,Y), masculino(X).
? -avo(X,Z) :- progenitor(X,Y), progenitor(Y,Z).
```

  - Com estas definições podemos obter os seguintes resultados:

```
? -mae(X,josé).
X =  maria;

? -pai(X,íris).
X = josé;
```

PROLOG

- Pontos Básicos
- Programas Prolog podem ser ampliados pela simples adição de novas cláusulas;
- As cláusulas Prolog podem ser de três tipos distintos:
  - Fatos,
  - Regras
  - Consultas;
- Os fatos declaram coisas que são incondicionalmente verdadeiras;
- As regras declaram coisas que podem ser ou não verdadeiras, dependendo da satisfação das condições dadas;
- Por meio de consultas podemos interrogar o programa acerca de que coisas são verdadeiras;

PROLOG

- Pontos Básicos
- As cláusulas Prolog são constituídas por uma cabeça e um corpo. O corpo é uma lista de objetivos separados por vírgulas que devem ser interpretadas como conjunções;
- Fatos são cláusulas que só possuem cabeça, enquanto que as consultas só possuem corpo e as regras possuem cabeça e corpo;
- Ao longo de uma computação, uma variável pode ser substituída por outro objeto. Dizemos então que a variável está instanciada;
- As variáveis são assumidas como universalmente quantificadas nas regras e nos fatos e existencialmente quantificadas nas consultas

PROLOG

- Exemplo Introdutório
  - Além disso, as definições de regras podem ser recursivas, isto é, uma cláusula de definição de um predicado pode conter este predicado em seu corpo:

```
? -antepassado(X,Z) :- progenitor(X,Z).
? -antepassado(X,Z) :- progenitor(X,Y),
                       antepassado(Y,Z).
```

  - Com estas definições podemos obter os seguintes resultados:

```
? -antepassado(X,jorge).
X =  íris;
X = maria;
X = joão;
X = josé;
```

PROLOG

- Exemplo Introdutório
  - Usa-se o “_” (underscore) para indicar a irrelevância de um objeto

? -aniversario(maria,data(25,janeiro,1979)).
? -aniversario(joao,data(5,janeiro,1956)).
? -signo(Pessoa,aquario) :- aniversario(Pessoa,data(Dia,janeiro,_)), Dia >=20.

  - Com estas definições podemos obter os seguintes resultados:

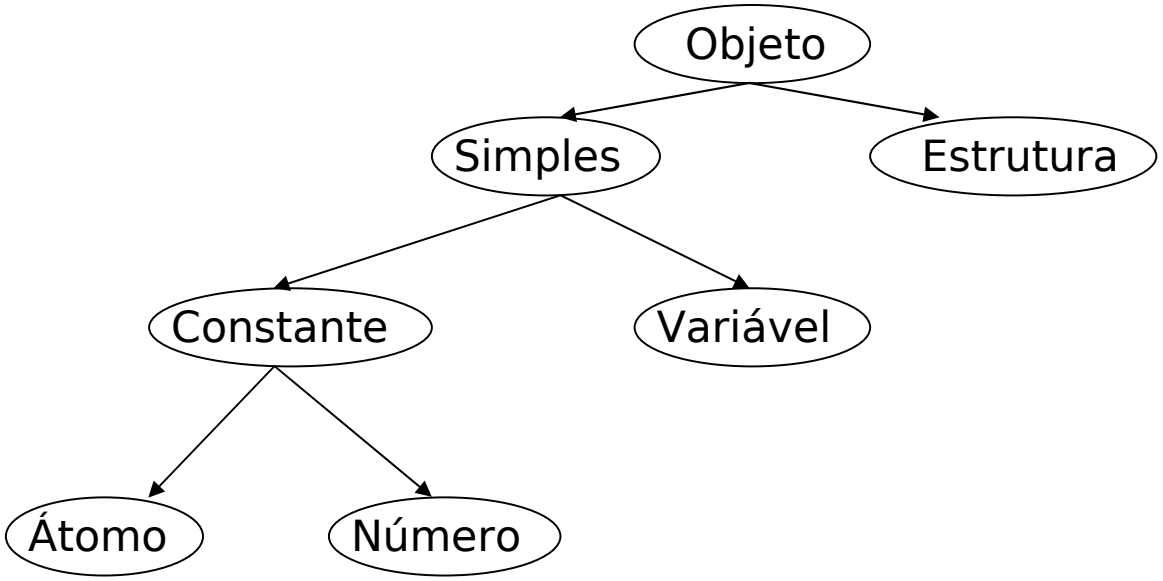
? -signo(Pessoa,aquario).
Pessoa = maria;
no

  - Usa-se a “,” como operador de conjunção e usa-se o “;” como operador de disjunção (cláusulas começando com o mesmo predicado também indicam a disjunção)

? -avo(X,Z) :- progenitor(X,Y), progenitor(Y,Z).
? -amiga(X) :- (X = maria ; X = joana).

PROLOG

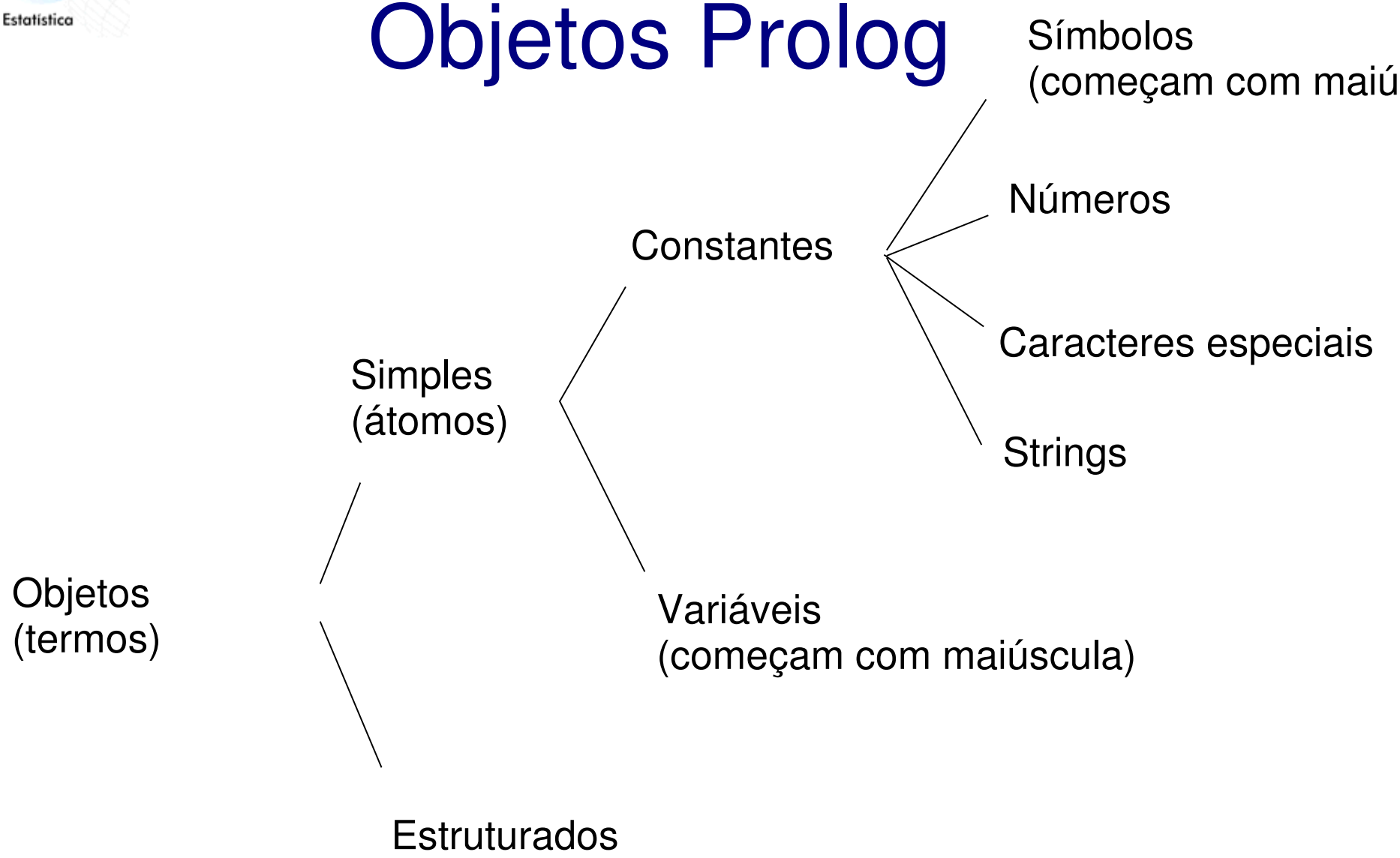
- Sintaxe
  - O sistema reconhece o tipo de um objeto no programa por meio de sua forma sintática.
  - Isto é possível porque o PROLOG especifica formas diferentes para cada tipo de obejto.



PROLOG

- Sintaxe
  - Átomos e Números
    - No exemplo introdutório viu-se informalmente alguns exemplos de átomos e variáveis. O alabeto básico adotado consiste dos seguintes símbolos:
    - Pontuação: ( ) . ‘ “
    - Conectivos: , (conjunção)
      ; (disjunção)
      :- (implicação)
    - Letras: a, b, c, ..., z, A, B, C, ..., Z
    - Dígitos: 0, 1, 2, ..., 9
    - Especiais: + - * / < > = ...

Objetos Prolog



Objetos Prolog

- Símbolos e variáveis:
  - pais → constante
  - Pais → variável
- Termos estruturados:
  - <simbolo funcional>(<arg1>, <arg2>, ..., <argN>)
  - Onde arg1, arg2, etc, podem ser atomos ou termos estruturados
  - Exemplos:
    - pai(joao,jose)
    - pai(X,jose)
    - avo(jorge,filho(joao))

Fatos

- Conjunto de símbolos predicativos que estabelecem uma base de conhecimento relativo a um conjunto de relações entre objetos

```
pai(joao,jose).
pai(joao,maria).
mae(joana,jose).
automovel(carlos,corcel(vermelho,1980).
```

Consulta

- É a maneira de recuperar informações da base de conhecimento

  ?- pai(joao,jose).

  Yes.

  Ou:

  ?- pai(X,Jose).

  Joao.

Regras

- É o mecanismo utilizado para inferir novos fatos a partir da base de conhecimento.

Pred(arg/Var, arg/Var):-pred(arg/Var,arg/Var).

- Exemplo:
- irmao(X,Y):-pai(Z,X),pai(Z,Y).
- irmao(X,Y):-mae(Z,X),mae(Z,Y).

PROLOG

- Sintaxe
  - Variáveis
    - Variáveis PROLOG são cadeias de letras, dígitos e do caracter sublinhado (_), devendo iniciar com este ou com uma letra maiúscula.
  - Estruturas
    - Estruturas são objetos que possuem vários componentes.
    - Os próprios componentes, por sua vez, podem também ser estruturas.
    - Para combinar os elementos em uma estrutura é necessário um functor. Um functor é um símbolo funcional (nome de função) que permite agrupar diversos objetos em um único objeto estruturado.
    - data(13, outubro, 1993) - dois inteiros e um átomo.
    - data(Dia, marco, 1996) - um dia qualquer de marco.

PROLOG

- Sintaxe
  - Sintaticamente todos os objetos em PROLOG são denominados termos.
  - O conjunto de termos PROLOG é o menor conjunto que satisfaz às seguintes condições:
    - Toda constante é um termo;
    - Toda variável é um termo;
    - Se t1, t2, ..., tn são termos e f é um átomo, então f(t1,t2,...,tn) também é um termo, onde o átomo f desempenha o papel de um símbolo funcional n-ário. Diz ainda que a expressão f(t1,t2,...tn) é um termo funcional PROLOG.

Consultas em Prolog

- Uma consulta em Prolog é sempre uma seqüência composta por um ou mais objetivos. Para obter a resposta, o sistema Prolog tenta satisfazer todos os objetivos que compõem a consulta, interpretando-os como uma conjunção. Satisfazer um objetivo significa demonstrar que esse objetivo é verdadeiro, assumindo que as relações que o implicam são verdadeiras no contexto do programa. Se a questão também contém variáveis, o sistema Prolog deverá encontrar ainda os objetos particulares que, atribuídos às variáveis, satisfazem a todos os sub-objetivos propostos na consulta. A particular instanciação das variáveis com os objetos que tornam o objetivo verdadeiro é então apresentada ao usuário. Se não for possível encontrar, no contexto do programa, nenhuma instanciação comum de suas variáveis que permita derivar algum dos sub-objetivos propostos então a resposta será "não".

PROLOG

- Unificação
  - É a operação mais importante entre dois termos PROLOG.
  - Dados dois termos, diz-se que eles se unificam se:
    - Eles são idênticos, ou
    - As variáveis de ambos os termos podem ser instanciadas com objetos de maneira que, após a substituição das variáveis por estes objetos, os termos se tornam idênticos.
  - Exemplo
    - os termos data(D,M,1994) e data(X,marco,A) unificam. Uma instanciação que torna os dois termos idênticos é:

      D é instanciada com X;

      M é instanciada com marco;

      A é instanciada com 1994.
    - Por outro lado, os termos data(D,M,1994) e data(X,Y,94) não unificam, assim como não unificam data(X,Y,Z) e ponto(X,Y,Z).

PROLOG

- Unificação
  - Se os termos não unificam dizemos, dizemos que o processo FALHA.
  - Se eles unificam, então o processo é bem-sucedido.
  - As regras gerais que determinam se dois termos S e T unificam são:
    - Se S e T são constantes, então S e T unificam somente se ambos representam o mesmo objeto;
    - Se S é uma VARIÁVEL E t É QUALQUER COISA, ENTÃO s E t UNIFICAM COM s INSTANCIADA EM t. Inversamente, se T é uma variável, então T é instanciada em S.
    - Se S e T são estruturas, unificam somente se:
      - S e T tem o mesmo functor principal, e
      - todos os seus componentes correspondentes também unificam. A instanciação resultante é determinada pela unificação dos componentes.

PROLOG

- Consultas em Prolog
  - antepassado(X, Z) :- % X é antepassado de Z se
    progenitor(X, Z).% X é progenitor de Z. [pr1]
  - antepassado(X, Z) % X é antepassado de Z se
    progenitor(X, Y), % X é progenitor de Y e
    antepassado(Y, Z).% Y é antepassado de Z. [pr2]

PROLOG

- Consultas em Prolog
- Um exemplo mais complexo:

  ?-antepassado(joão, íris).
- Sabe-se que progenitor(josé, íris) é um fato. Usando esse fato e a regra [pr1], podemos concluir antepassado(josé, íris). Este é um fato derivado. Não pode ser encontrado explícito no programa, mas pode ser derivado a partir dos fatos e regras ali presentes. Ou seja:
- "de progenitor(josé, íris) segue, pela regra [pr1] que antepassado(josé, íris)".
- Além disso sabemos que progenitor(joão, josé) é fato. Usando este fato e o fato derivado, antepassado(josé, íris), podemos concluir, pela regra [pr2], que o objetivo proposto, antepassado(joão, íris) é verdadeiro.

PROLOG

- Consultas em Prolog
  - Mostrou-se assim o que pode ser uma seqüência de passos de inferência usada para satisfazer um objetivo. Tal seqüência denomina-se seqüência de prova. A extração de uma seqüência de prova do contexto formado por um programa e uma consulta é obtida pelo sistema na ordem inversa da empregada anteriormente.

PROLOG

- Consultas em Prolog
  - Ao invés de iniciar a inferência a partir dos fatos, o Prolog começa com os objetivos e , usando as regras, substitui os objetivos correntes por novos objetivos até que estes se tornem fatos.
  - Assim,para saber se joão é antepassado de íris, o sistema tenta encontrar uma cláusula no programa a partir da qual o objetivo seja conseqüência imediata. Obviamente, as únicas cláusulas relevantes para essa finalidade são [pr1] e [pr2], que são sobre a relação antepassado, porque são as únicas cujas cabeças podem ser unificadas com o objetivo formulado.
  - Tais cláusulas representam dois caminhos alternativos que o sistema pode seguir. Inicialmente o Prolog irá tentar a que aparece em primeiro lugar no programa:

PROLOG

- Consultas em Prolog
  - antepassado(X, Z) :- progenitor(X, Z).
  - Uma vez que o objetivo é antepassado(joão, íris), as variáveis na regra devem ser instanciadas por X=joão e Y=íris. O objetivo inicial, antepassado(joão, íris) é então substituído por um novo objetivo:

    progenitor(joão, íris)
  - Não há, entretanto, nenhuma cláusula no programa cuja cabeça possa ser unificada com progenitor(joão, íris), logo este objetivo falha. Então o Prolog retorna ao objetivo original (backtracking) para tentar um caminho alternativo que permita derivar o objetivo antepassado(joão, íris). A regra [pr2] é então tentada:
  - antepassado(X, Z) :-

    progenitor(X, Y),

    antepassado(Y, Z).

PROLOG

- Consultas em Prolog
- Como anteriormente, as variáveis X e Z são instanciadas para joão e íris, respectivamente. A variável Y, entretanto, não está instanciada ainda. O objetivo original, antepassado(joão, íris) é então substituído por dois novos objetivos derivados por meio da regra [pr2]:
- progenitor(joão, Y), antepassado(Y, íris).
- Encontrando-se agora face a dois objetivos, o sistema tenta satisfazê-los na ordem em que estão formulados. O primeiro deles é fácil: progenitor(joão, Y) pode ser unificado com dois fatos do programa: progenitor(joão, josé) e progenitor(joão, ana). Mais uma vez, o caminho a ser tentado deve corresponder à ordem em que os fatos estão escritos no programa. A variável Y é então instanciada com josé nos dois objetivos acima, ficando o primeiro deles imediatamente satisfeito.

PROLOG

- Consultas em Prolog
  - O objetivo remanescente é então:
  - antepassado(josé, íris).
  - Para satisfazer tal objetivo, a regra [pr1] é mais uma vez empregada.
  - Essa segunda aplicação de [pr1], entretanto, nada tem a ver com a sua utilização anterior, isto é, o sistema Prolog usa um novo conjunto de variáveis na regra cada vez que esta é aplicada.

PROLOG

- Consultas em Prolog
  - A cabeça da regra deve então ser unificada como o nosso objetivo corrente, que é antepassado(josé, íris). A instanciação de X'e Y' fica: X'=josé e Y'=íris e o objetivo corrente é substituído por:
  - progenitor(josé, íris)
  - Esse objetivo é imediatamente satisfeito, porque aparece no programa como um fato. O sistema encontrou então um caminho que lhe permite provar, no contexto oferecido pelo programa dado, o objetivo originalmente formulado, e portanto responde "sim".

PROLOG

- Semântica
  - PROLOG tem três semânticas: a DECLARATIVA, a PROCEDURAL e a OPERACIONAL.
  - A semântica DECLARATIVA é aquela em que se escreve e lê o programa PROLOG e que é uma representação do que se conhece da definição do problema a resolver.
  - A semântica declarativa pode ser interpretada de três modos distintos:
    - Para resolver um problema dá-se uma nova cláusula, a pergunta, e o PROLOG tenta verificar se esta cláusula é compatível com o mundo definido;
    - Considera-se que os literais na cabeça e cauda de cada cláusula são objetivos a serem atingidos. Uma pergunta tem resposta afirmativa se o objetivo que ela define é satisfeito usando as regras do programa;
    - Olha as cláusulas como regras de uma gramática, onde cada regra de PROLOG corresponde a uma regra da gramática.

PROLOG

- Semântica
  - Exemplo
    - Seja P :- Q, R

    onde P, Q e R possuem a sintaxe de termos PROLOG. Duas alternativas para a leitura declarativa destas cláusulas são:
      - P é verdadeira se Q e R são verdadeiras, e
      - De Q e R, segue P.
  - A semântica declarativa determina se um dado objetivo é verdadeiro e, se for, para que valores de variáveis isto se verifica.
  - Assim, dado um programa e um objetivo G, o significado declarativo nos diz que:
    - Um objetivo G é verdadeiro (isto é, é satisfatível ou segue logicamente do programa) se e somente se há uma cláusula C no programa e uma instância I de C tal que:
      - A cabeça de I é idêntica a G, e
      - Todos os objetivos no corpo de I são verdadeiros.

PROLOG

- Semântica
  - A semântica PROCEDURAL define não apenas o relacionamento lógico existente entre a cabeça e o corpo da cláusula, como também exige a existência de uma ordem na qual os objetivos serão processados.
  - Exemplo
    - Seja P :- Q, R

    onde P, Q e R possuem a sintaxe de termos PROLOG. Duas alternativas para a leitura procedural destas cláusulas são:
      - Para solucionar o problema P
        primeiro solucione o subproblema Q
        e depois solucione o subproblema R.
      - Para satisfazer P, primeiro satisfaça Q e depois R.

PROLOG

Semântica

- A semântica OPERACIONAL define como PROLOG responde a uma pergunta.
- Seria ótimo se não fosse necessário conhecer esta semântica, pois neste caso, PROLOG seria realmente uma implementação do paradigma de programação em lógica. Entretanto, este não é o caso.
- PROLOG pesquisa se a pergunta é verdadeira ou falsa construindo a árvore de possibilidades para trás e faz a busca em profundidade. Se a árvore a percorrer é muito grande, o tempo pode se tornar proibitivo e é conveniente restringir o espaço de busca o mais possível, o que só é possível sabendo como o PROLOG vai visitar os nós da árvore.
- O modo como PROLOG vai visitar os nós da árvore varia se as declarações são apresentadas em ordem diferente. Consequentemente, PROLOG não é realmente uma linguagem declarativa.

PROLOG

- Semântica

PROLOG

- Semântica
  - Suas entradas e saídas são:
    - entrada: um programa e uma lista de objetivos;
    - saída: um indicador de sucesso/falha e instanciações de variáveis.
  - O significado dos resultados de saída do *executor* é o seguinte:
    - O indicador de *sucesso/falha* tem o valor "sim" se os objetivos forem todos satisfeitos e "não" em caso contrário;
    - As *instanciações* são produzidas somente no caso de conclusão bem-sucedida e correspondem aos valores das variáveis que satisfazem os objetivos.

PROLOG

- Semântica (Resumo)
  - A interpretação declarativa de programas escritos em Prolog puro não depende da ordem das cláusulas nem da ordem dos objetivos dentro das cláusulas;
  - A interpretação procedimental depende da ordem dos objetivos e cláusulas. Assim a ordem pode afetar a eficiência de um programa. Uma ordenação inadequada pode mesmo conduzir a chamadas recursivas infinitas;
  - A semântica operacional representa um procedimento para satisfazer a lista de objetivos no contexto de um dado programa. A saída desse procedimento é o valor-verdade da lista de objetivos com a respectiva instanciação de sua variáveis. O procedimento permite o retorno automático (backtracking) para o exame de novas alternativas;

Semântica do prolog

- Semântica declarativa
  - P:-Q,R
    - P é verdadeiro se Q é verdadeiro e R é verdadeiro
    - Ou: de Q e R, segue P
- Semântica procedimental
    - Para solucionar P, primeiro selecione Q, depois R

Exemplo

```
nasceu_em(joao,porto_alegre).
nasceu_em(jean,paris).
fica_em(porto_alegre,brasil).
fica_em(paris,franca).
patria_de(X,Y):-nasceu_em(X,Z),fica_em(Z,Y).
?-patria_de(joao,brasil).
yes.
?-patria_de(A,B).
A=joao  B=brasil;
A=jean  B=franca;
no.
```

PROLOG

- Backtracking
  - Na execução dos programas Prolog, a evolução da busca por soluções assume a forma de uma árvore - denominada "árvore de pesquisa" ou "search tree" - que é percorrida sistematicamente de cima para baixo (top-down) e da esquerda para direita, segundo o método denominado "depth-first search" ou "pesquisa primeiro em profundidade".

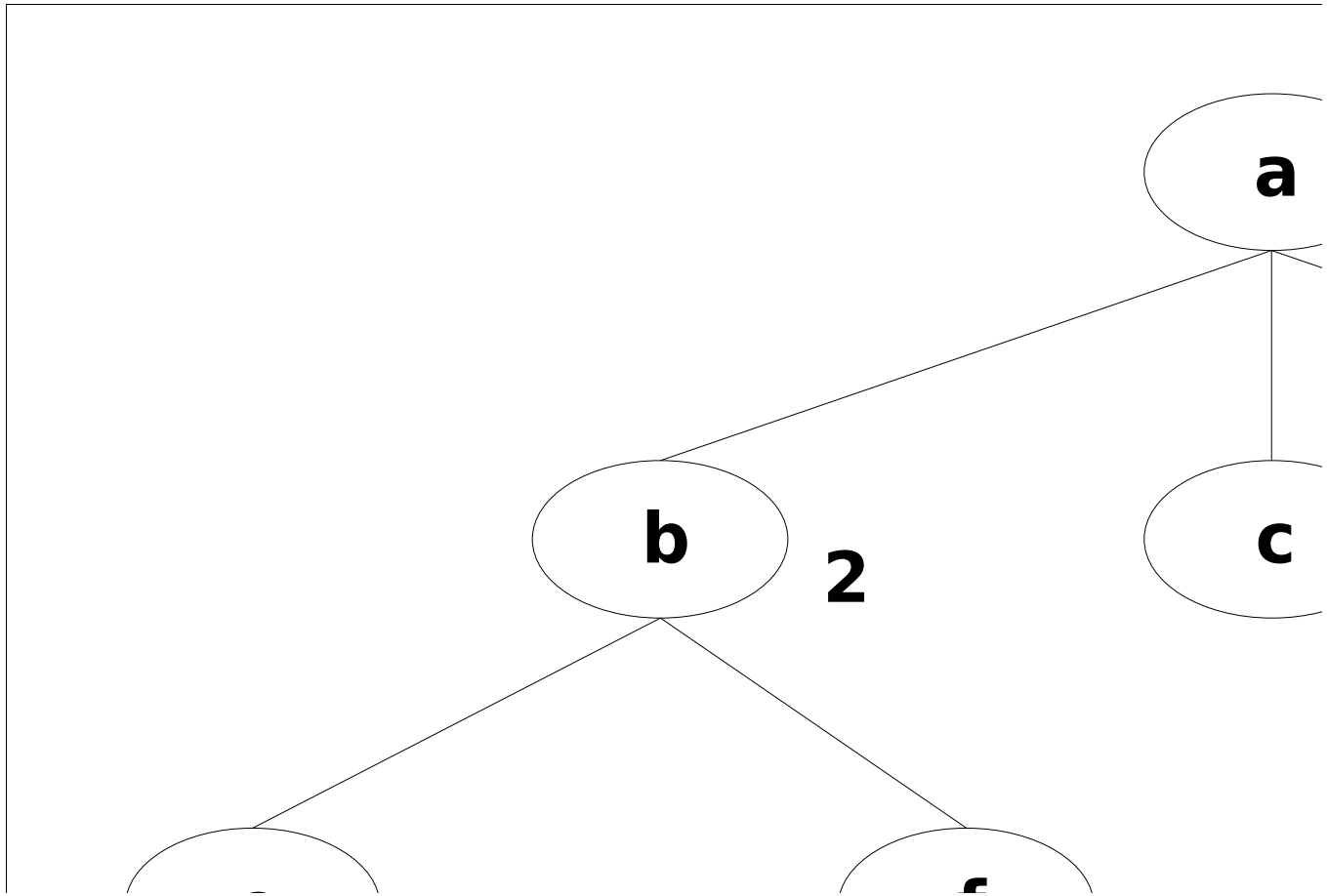
Exemplo

- Sejam a,b,c,etc... termos PROLOG

```
a :- b.
a :- c.
a :- d.
b :- e.
b :- f.
f :- g.
f :- h.
f :- i.
  d.
```

PROLOG

- Backtracking
  - Ordem de visita aos nodos da árvore



a, b, e, (b), f, g, (f), h, (f), i, (f), (b), (a), c, (a), d

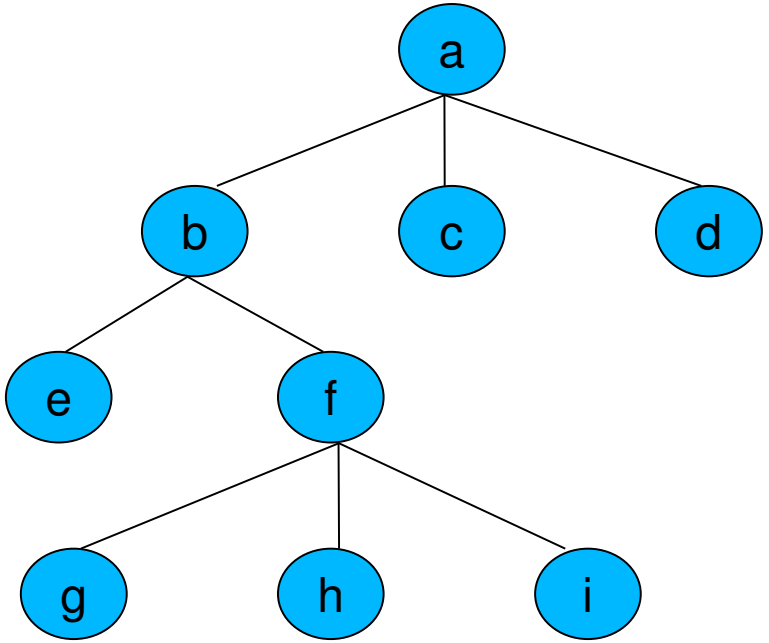
onde o caminho em backtracking é representado entre parênteses

Controle de backtracking

- Ordem de execução das cláusulas:
  - De cima para baixo, da esquerda para a direita.
- Bakctracking:
  - Tentativa de resolver uma cláusula novamente por outra alternativa, em caso de falha.
  - Ordem de execução:
    - Da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Backtracking

- a:-b.
- a:-c.
- a:-d.
- b:-e.
- b:-f.
- f:-g
- f:-h.
- f:-i.
- D.



Exemplo de aplicação

- Se X < 3, Y = 0
- Se 3 <=X < 6, Y = 2
- Se X > =6, Y = 4
- Implementação trivial:
- f(X,0):- X<3.
- f(X,2):-3=<X,X<6.
- f(X,4):-6=<X.
- Testar com a consulta
  ?-f(1,Y),2<Y.

PROLOG

- Backtracking
  - Como foi visto, os objetivos em um programa Prolog podem ser bem-sucedidos ou falhar.
  - Para um objetivo ser bem-sucedido ele deve ser unificado com a cabeça de uma cláusula do programa e todos os objetivos no corpo desta cláusula devem também ser bem-sucedidos. Se tais condições não ocorrerem, então o objetivo falha.
  - Quando um objetivo falha, em um nodo terminal da árvore de pesquisa, o sistema Prolog aciona o mecanismo de backtracking, retornando pelo mesmo caminho percorrido, na tentativa de encontrar soluções alternativas.
  - Ao voltar pelo caminho já percorrido, todo o trabalho executado é desfeito.

PROLOG

- Backtracking

  Exemplo 2

  - gosta(joão, jazz).
  - gosta(joão, renata).
  - gosta(joão, lasanha).
  - gosta(renata, joão).
  - gosta(renata, lasanha).

  – queremos saber do que ambos, joão e renata, gostam. Isto pode ser formulado pelos objetivos:
    - gosta(joão, X), gosta(renata, X).

    1. Encontra que joão gosta de jazz
    2. Instancia X com "jazz”
    3. Tenta satisfazer o segundo objetivo, determinando se "renata gosta de jazz”
    4. Falha, porque não consegue determinar se renata gosta de jazz
    5. Realiza um backtracking na repetição da tentativa de satisfazer gosta(joão, X), esquecendo o valor "jazz”

PROLOG

- Backtracking

  Exemplo 2

  6. Encontra que joão gosta de renata
  7. Instancia X com "renata”
  8. Tenta satisfazer o segundo objetivo determinando se "renata gosta de renata”
  9. Falha porque não consegue demonstrar que renata gosta de renata
  10. Realiza um backtracking, mais uma vez tentando satisfazer gosta(joão, X), esquecendo o valor "renata”
  11. Encontra que joão gosta de lasanha
  12. Instancia X com "lasanha”
  13. Encontra que "renata gosta de lasanha”
  14. É bem-sucedido, com X instanciado com "lasanha”

- Impurezas de PROLOG
  - O backtracking automático é uma ferramenta muito poderosa e a sua exploração é de grande utilidade para o programador. Às vezes, entretanto, ele pode se transformar em fonte de ineficiência. A seguir se introduzirá um mecanismo para "podar" a árvore de pesquisa, evitando o backtracking quando este for indesejável.
  - Para aumentar a eficiência no percurso da árvore de busca da solução do problema usam-se essencialmente dois operadores: CORTE (“CUT” representado por !) e FALHA (“FAIL”).
  - Seu uso deve ser considerado pelas seguintes razões:
    - O programa irá executar mais rapidamente, porque não irá desperdiçar tempo tentando satisfazer objetivos que não irão contribuir para a solução desejada.
    - (ii) Também a memória será economizada, uma vez que determinados pontos de backtracking não necessitam ser armazenados para exame posterior.

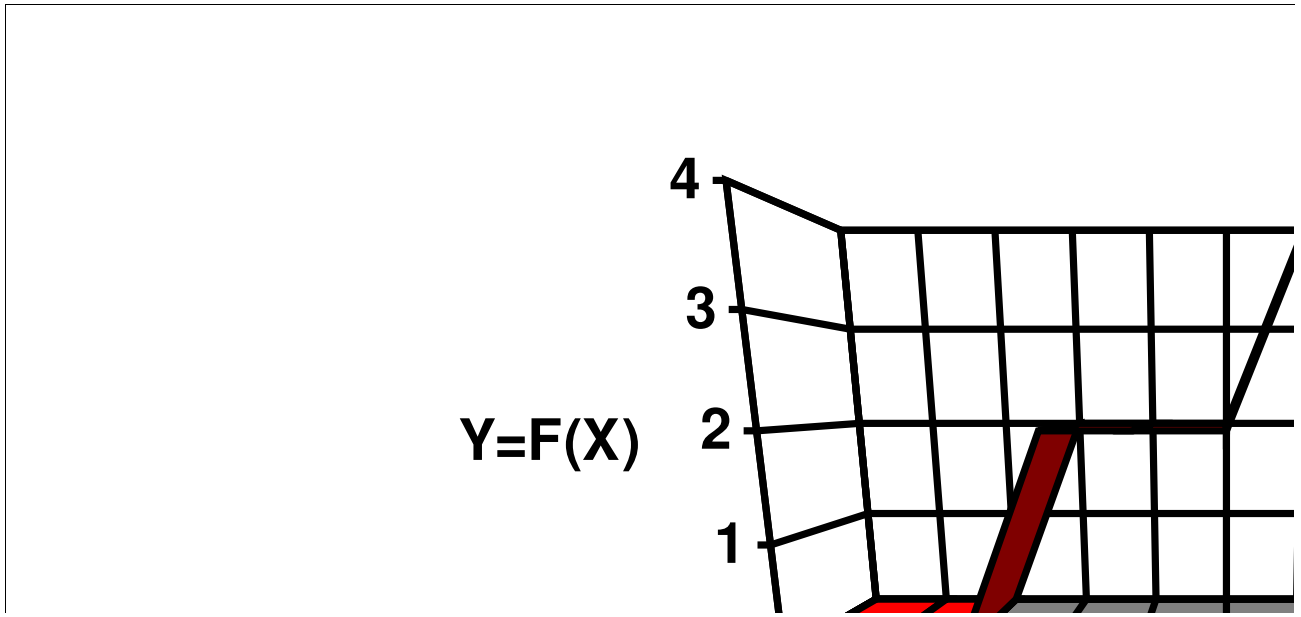
PROLOG

- CUT
  - Algumas das principais aplicações do cut são as seguintes:
    - Unificação de padrões, de forma que quando um padrão é encontrado os outros padrões possíveis são descartados
    - Na implementação da negação como regra de falha
    - Para eliminar da árvore de pesquisa soluções alternativas quando uma só é suficiente
    - Para encerrar a pesquisa quando a continuação iria conduzir a uma pesquisa infinita, etc

PROLOG

- CUT

Exemplo



(1) Se X < 3, então Y = 0
(2) Se 3 >= X e X < 6, então Y = 2
(3) Se 6 >= X, então Y = 4
que podem ser escritas em Prolog como uma relação binária f(X, Y), como se segue:

```
f(X, 0) :- X < 3.
f(X, 2) :- 3 =< X, X < 6.
f(X, 4) :- 6 =< X.
```

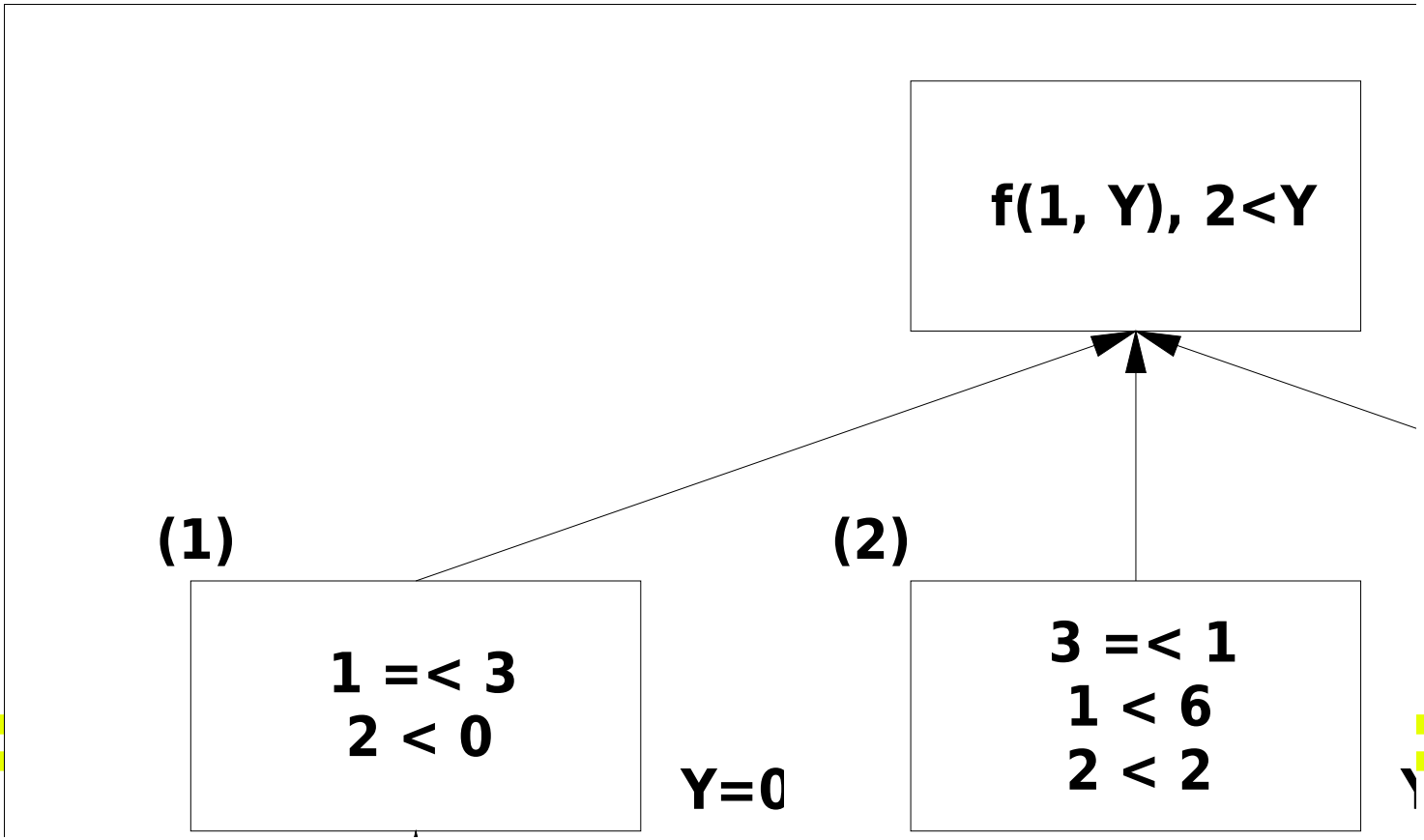
PROLOG

- CUT

  Exemplo

  – Vamos analisar o que ocorre quando a seguinte questão é formulada:

    - ?-f(1, Y), 2 < Y



PROLOG

- CUT

  Exemplo

  - O programa do exemplo, reescrito com cuts assume o seguinte aspecto:

```
f(X, 0)  :- X < 3, !.
f(X, 2)  3 =< X, X < 6, !.
f(X, 4)  6 =< X.
```

- Aqui o símbolo "!" evita o backtracking nos pontos em que aparece no programa.

PROLOG

- FALHA (FAIL)
  - Negação por Falha
  - “Maria gosta de todos os animais, menos de cobras". Como podemos dizer isto em Prolog? É fácil expressar uma parte dessa declaração: Maria gosta de X se X é um animal, isto é:
    - gosta(maria, X) :- animal(X).

    mas é necessário ainda excluir as cobras. Isto pode ser conseguido empregando-se uma formulação diferente:
    - Se X é uma cobra,

      então não é verdade que maria gosta de X

      senão se X é um animal, então maria gosta de X.

PROLOG

- FALHA (FAIL)
  - Podemos dizer que alguma coisa não é verdadeira em Prolog por meio de um predicado pré-definido especial, "fail", que sempre falha, forçando o objetivo pai a falhar. A formulação acima pode ser dada em Prolog com o uso do fail da seguinte maneira:
    - gosta(maria, X) :- cobra(X), !, fail.
    - gosta(maria, X) :-animal(X).
  - Aqui a primeira regra se encarrega das cobras. Se X é uma cobra, então o cut evita o backtracking (assim excluindo a segunda regra) e o fail irá ocasionar a falha da cláusula. As duas regras podem ser escritas de modo mais compacto como uma única cláusula, por meio do uso do conetivo ";":
    - gosta(maria, X) :- cobra(X), !, fail; animal(X).

Unificação

- É o mecanismo de ligação entre variáveis e objetos dentro de uma cláusula, de acordo com o seguinte:
  - Simbolos funcionais iguais
  - Mesmo numero de argumentos
  - Argumentos constantes iguais
  - Exemplos:
    - pai(joao,jose):-pai(X,jose) →X/joao
    - automovel(carlos,corsel(1992,vermelho):-automovel(X,corsel(1992,Y) →X/carlos Y/vermelho

Exercicio

- Verifique se são unificáveis os seguintes pares de termos. Nos casos em que a unificação for possível, indique as substituições necessárias.
  - i) funcionário(123, josé):- funcionário(123,X)
  - ii) livro(lusíadas,autor(camões)) :-livro(camões,autor(lusíadas))
  - iii) tem(josé, livro(lusíadas, autor(camões))) :- tem(X,livro(Y,autor(Z)))
  - iv) pertence(veículo(auto,vw,1978),antônio) :- pertencec(X,Y)
  - v) f(f(X,Y), f(Y,X)) :- f(f(2,3),Z)
  - vi) f(f(X,X), f(Y,X)) :- f(f(2,3),Z)

Exercicio

- Verifique se são unificáveis os seguintes pares de termos. Nos casos em que a unificação for possível, indique as substituições necessárias.
  - vii) s(s(s(s(0)))) :- s(s(X))
  - viii) f(g(X), h(f(g(x)))) :- f(g(4), h(Y))
  - ix) f(g(X),h(f(X))):-º f(g(4), g(Y))
  - x) disc(info5001, prog_em_lógica) :- disc(info5001, prog_em_lógica, ano(2002))
  - xi) result(3) :- result(soma(1,2))
  - xii) tem(josé, avião) :- possui(josé, avião)

Operadores

- Aritméticos

  + -

  * /

  mod is

- Lógicos

  > <

  >= <=

  =:= =\=

- Exemplo:

```
fatorial(0,1).
fatorial(X,Y):-
    X1 is X-1,
    fatorial(X1,Y1),
    Y is X*Y1.
```

Listas

- Representação de listas

  lista([a,b,c,d,e,f]).

  lista([X|Y]).

  X=a Y=[bcde].

  Lista vazia: []

- Exemplos
  - Verificar se um elemento é membro de uma lista:
    - Member(X, [X|_]).
  - member(X, [_|T]) :- member(X, T).

Operações com listas

```
member(H, [H|_]).
member(H, [_|T]) :-
member(H, T).

member_check( H, [H|_]) :- !.
member_check(H, [_|T]) :-
member_check(H, T).

append([],L,L).
append([H|T], L, [H|R]) :-
append(T, L, R).
```

Operações com listas

```
intersection([], _, []) :-!.

intersection([H|L1], L2, [H|L3]) :-
member(H, L2),
intersection(L1,L2,L3), !.
intersection([_|L1],L2,L3) :-
intersection(L1,L2,L3).

subset( [], _ ).
subset( [A|X], Y ) :-
member( A, Y ),
subset( X, Y ).
```

Estruturas de dados

- As estruturas de dados ocorrem na forma:

  pred(arg, estrut(atrib1,...,atrib n)).

  ou

  pred(estrut(atrib1,...,atrib n), arg)

- As estruturas servem para aninhar dados de forma organizada, estruturada.Elas permitem a distinção de atributos para um argumento. Por exemplos:

  ficha(num,func(nome,end,cargo)).

  ficha(num,func(dados_pes(nome,end),cargo(funcao,salario(
  basico,descontos,vantagens)))).

Prolog procedural

- Cut e fail
- Built in predicates
- Metalogic predicates

Usando o operador CUT (!)

- f(X,0):- X<3,!.
- f(X,2):-3=<X,X<6,!.
- f(X,4):-6=<X.
- Ou ainda:
- f(X,0):- X<3,!.
- f(X,2):-X<6,!.
- f(X,4).
- (if, them else)

Outros exemplos de cut

- Computando o maior entre dois números:

```
max(X,Y,X):- X>=Y.
max(X,Y,Y):- X<Y.
?- max(X,Y,Max).
```

- Usando cut:

```
max(X,Y,X):- X>=Y,!.
max(X,Y,Y).
```

Outros exemplos de cut

- Pertencimento a uma lista

```
member(H, [H|_]).
member(H, [_|T]) :-
member(H, T).

member_check( H, [H|_]) :- !.
member_check(H, [_|T]) :-
member_check(H, T).
```

- Inserindo sem repetição:

```
add(X,L,L):- member(X,L),!.
add(X,L,[X|L]).
```

Combinação cut - fail

- fail é um predicado interno do Prolog que força um retrocesso na avaliação das regras,como se indicasse uma falha.
- Exemplo: mary gosta de animais mas não de cobras.
- Em prolog:

```
likes(mary, X) :-snake(X),!,fail.
likes(mary, X) :-animal(X).
```

Combinação cut - fail

- Exemplo: definição de diferença entre dois termos
- Em prolog:

```
different(X,X) :- !,fail.
different(X,Y).
```

- Ou:

```
different(X,Y):- X=Y,!,fail;
true.
```

- true é um predicado interno do prolog que é o oposto do fail.

Predicado not

```
not(P):-
    P,!,fail;
    true.
```

Algumas implementações implementam o operador not como um predicado interno.

```
likes(mary, X):-
    animal(X),
    not snake(x).

different(X,Y):- not (X=Y).
```

predicados de entrada e saída em PROLOG

- see(Filename) muda o input stream corrente
- tell(Filename) muda o output stream corrente
- o dispositivo de entrada e saída padrão é o teclado e o monitor, referido como user os predicados seen e told fecham os arquivos correntes de entrada e saída respectivamente. predicados para leitura e escrita de caractere no arquivo corrente são
- put(C),
- get(C) e
- get0(C) onde C é um inteiro que representa o códico ASC do caractere
- predicados para leitura e escrita de termos PROLOG em arquivos são
- % read(X) e write(X) onde X teve ter a sintaxe valida para termos os predicados
- tab(N) e nl são para controle de saída: tabulação de N espaços e inserção de nova linha, respectivamente.

```
cube:-     write('Next item, please: '),
   read(X),
   process(X).
process(stop):-
   !.
process(N):-
   C is N*N*N,
   write('Cube of '),
   write(N),
   write(' is '),
   write(C),
   nl,
   cube.
```

Predicados metalógicos

functor(Term,T,Arg)

exemplos:

functor(filho(X,Y),filho,2)

functor(T, pai,2) -> T=pai(X,Y)

arg(N,Term,Arg)

exemplos:

arg(1,pai(joao,jose),joao)

arg(2,pai(joao,jose),X) -> X = jose

var(X)

atom(X)

integer(X)

real(X) ou float()

Manipulacao de termos

- A soma dos numeros X,Y é Z

```
soma1(X,Y,Z):-integer(X),integer(Y), Z is X +Y.
soma(X,Y,Z):- novar(X),novar(Y), Z is X+Y.
soma(X,Y,Z):- novar(X),novar(Z), Y is Z-Y.
soma(X,Y,Z):- novar(Y),novar(Z), X is Z-Y.
```

o novo termo é o resultado da troca de todas as ocorrencias de Velho,no termo original, por Novo

```
substitui(Velho, Novo, Velho, Novo).
substitui(Velho, Novo, Termo, Termo1):-
atom(Termo),
Termo\=Termo1.
substitui(Velho, Novo,Termo, Termo1):-
compound(Termo),
functor(Termo,T,N),
functor(Termo1,T,N),
substitui(N,Velho, Novo, Termo, Termo1).
substitui(N,Velho,Novo,Termo,Termo1):-
N>0,
arg(N,Termo,Arg),
substitui(Velho,Novo, Arg, Arg1),
arg(N,Termo1,Arg1),
N1 is N-1,
substitui(N1,Velho,Arg1,Termo,Termo1),
N1 is N+1,
substitui(N1,Velho,Novo,Termo,Termo1).
substitui(0,Velho,Novo,Termo,Termo1).
```

Predicados metalógicos

compound(X)
 exemplo
 compound(pai(X,Y))
 a(X,f(b))
length(List,N)
 exemplo:
 length([1,2,3,4]),N) -> N=4

ground = unificado