

Programação Lógica

Fundamentos

Prof. Edson Alves

Faculdade UnB Gama

Sumário

1. Paradigma Lógico
2. Fatos
3. Consultas simples
4. Consultas compostas

Paradigma Lógico

- ▶ O paradigma lógico foi elaborado a partir de um teorema proposto no contexto do processamento de linguagens naturais
- ▶ Ele permite prototipamento e desenvolvimento rápidos devido sua proximidade semântica com a especificação lógica do problema ser resolvido
- ▶ A programação, sob o viés do paradigma lógico, é declarativa
- ▶ Os programas são compostos por uma série de relações lógicas e consultas, as quais questionam se uma determinada proposição é ou não verdadeira
- ▶ Caso seja verdadeira, também é possível determinar qual atribuição de valores lógicos às variáveis da sentença a torna verdadeira
- ▶ Para se tornar um paradigma prático, é necessário o apoio de subrotinas extra-lógicas que controlem os processos de entrada e saída de dados e que manipulem o fluxo de execução do programa

Prolog

- ▶ A linguagem de programação lógica Prolog foi proposta em 1972 por Alain Colmerauer e Philippe Roussel, tendo como base os trabalhos de Robert Kowalski
- ▶ Prolog é uma contração da expressão “*PRO*gramming in *LOGic*”
- ▶ Ela tem raízes na lógica de primeira ordem
- ▶ O SWI Prolog pode ser instalado em distribuições com suporte ao apt por meio do comando

```
$ sudo apt-get install swi-prolog
```

- ▶ O interpretador (*listener*) Prolog pode ser invocado com o comando

```
$ prolog
```

- ▶ Para validar a instalação, utilize o comando

```
$ prolog --version
```

Programas em Prolog

- ▶ Um programa em Prolog é composto de uma coleção de pequenas unidades modulares, denominadas **predicados**
- ▶ Os predicados são semelhantes às subrotinas de outras linguagens
- ▶ Eles podem ser testados e adicionados separadamente em um programa, de modo que é possível construir programas incrementalmente
- ▶ O ato de inserir de códigos no interpretador Prolog é denominado **consultar**
- ▶ É possível consultar diretamente um arquivo-fonte no interpretador Prolog por meio do predicado `consult()`:

```
?- consult(source)
```

Programas em Prolog

- ▶ Se o arquivo for modificado, ele deve ser relido através do predicado `reconsult()`:

```
?- reconsult(source)
```

- ▶ A extensão dos arquivos-fonte deve ser `.pl`
- ▶ Usando o comando

```
$ prolog -s source.pl
```

o conteúdo de `source.pl` é carregado no interpretador e o terminal fica pronto para consultas

- ▶ Para fazer uma consulta sem entrar no modo iterativo, use a opção `-g` para estabelecer o objetivo e a opção `-t` para encerrar o Prolog:

```
$ prolog -s source.pl -g "goal(X),print(X),nl,fail." -t halt
```

Exemplo de programa em Prolog

- ▶ A proposição “*Todo estudante da FCTE é estudante da UnB*” pode ser declarada em Prolog da seguinte forma:

```
unb(X) :- fcte(X).
```

- ▶ Outra forma de ler esta mesma proposição seria “*Para todo X, X é aluno da UnB se X estuda na FCTE*”
- ▶ Afirmações sobre estudantes da FGA pode ser feitas por meio do predicado **fcte**/1:

```
fcte(ana).  
fcte(beto).  
fcte(carlos).
```

- ▶ Observe o ponto final (‘.’) que encerra cada proposição/predicado

Exemplo de arquivo-fonte em Prolog

```
1 % Exemplo de arquivo-fonte Prolog
2 unb(X) :- fcte(X).
3
4 fcte(ana).
5 fcte(beto).
6 fcte(carlos).
```


Exemplo de programa em Prolog

- ▶ Se estes predicados forem inseridos em um arquivo denominado 'students.pl', ele pode ser consultado no interpretador Prolog através do predicado `consult/1`:

```
?- consult(students).  
true.
```

- ▶ Para saber checar se Ana é estudante da UnB, basta utilizar a consulta

```
?- unb(ana).  
true.
```

- ▶ Para saber se Diana também é estudante da UnB, a consulta deve ser

```
?- unb(diana).  
false.
```

Exemplo de programa em Prolog

- Para listar todos os estudantes conhecidos da UnB, faça a consulta

```
?- unb(X).  
X = ana .
```

- Observe que a consulta atribuiu corretamente $X = \text{ana}$, pois Ana é estudante da UnB
- A consulta retorna o primeiro valor encontrado para X que torna a sentença aberta $\text{unb}(X)$ verdadeira
- Para obter os demais valores de X que também tornam tal sentença verdadeira, utilize o operador ponto-e-vírgula (;) após cada retorno:

```
?- unb(X).  
X = ana ;  
X = beto ;  
X = carlos.
```

Exemplo de programa em Prolog

- ▶ É possível formatar a lista de todos os estudantes da UnB por meio dos predicados `write/1` e `nl/0`
- ▶ O predicado `write/1` escreve seu argumento no terminal
- ▶ O predicado `nl/0` inicia uma nova linha no terminal
- ▶ Estes predicados podem ser combinados com a consulta sobre os estudantes da UnB para formar o predicado `unb_report/0`:

```
unb_report :-  
    write('Estudantes da UnB: '), nl,  
    unb(X),  
    write(X), nl,  
    fail.
```

- ▶ Este novo predicado por ser consultado no interpretador da seguinte forma:

```
?- unb_report.
```

Arquivo-fonte completo do exemplo

```
1 % Exemplo de arquivo-fonte Prolog
2 unb(X) :- fcte(X).
3
4 fcte(ana).
5 fcte(beto).
6 fcte(carlos).
7
8 unb_report :-
9     write('Estudantes da UnB: '), nl,
10    unb(X),
11    write(X), nl,
12    fail.
```

Terminologia

- ▶ O jargão de Prolog é composto por termos de programação, termos de bancos de dados e termos lógicos
- ▶ Não há uma divisão clara, em Prolog, entre dados e procedimentos
- ▶ Um programa em Prolog é um banco de dados Prolog
- ▶ Por exemplo, no nível mais alto temos `program(database)`
- ▶ Um programa é composto por predicados (procedimentos, registros, relações)
- ▶ Cada predicado é definido um nome e um número (**aridade**)
- ▶ A aridade é o número de argumentos (atributos, campos) do predicado
- ▶ Dois predicados com nomes iguais, mas aridades distintas, são considerados distintos

Terminologia

- ▶ No exemplo anterior são três os predicados: `unb/1`, `unb_report/0` e `fga/1`
- ▶ `fga/1` lembra um registro com um campo de outras linguagens
- ▶ `unb_report/0` se assemelha a uma subrotina sem argumentos
- ▶ `unb/1` remete a uma regra ou proposição, e está em algum lugar entre dados e procedimentos
- ▶ Cada predicado do programa é definido pela existência de uma ou mais cláusulas no banco de dados
- ▶ No exemplo, `fga/1` tem 3 cláusulas, os demais predicados apenas uma cláusula
- ▶ Cada cláusula pode ser uma **regra** ou um **fato**
- ▶ As três cláusulas de `fga/1` são fatos
- ▶ As demais são regras

Fatos em Prolog

- ▶ Os fatos são os predicados mais simples do Prolog
- ▶ Eles se assemelham a registros em um banco de dados relacional
- ▶ A sintaxe para a declaração de um fato é

```
pred(arg1, arg2, ..., argN).
```

onde **pred** é o nome do fato, e **arg1**, **arg2**, ..., **argN** são os argumentos, sendo N a aridade

- ▶ O ponto final ('.') encerra todas as cláusulas de Prolog
- ▶ Se a aridade do predicado for zero, a sintaxe se reduz a

```
pred.
```

Termos

- ▶ Os argumentos podem ser quaisquer termos válidos de Prolog
- ▶ Os termos básicos do Prolog são
 - ▶ **inteiro**: número positivo, negativo ou zero, com valor absoluto máximo dependendo da implementação
 - ▶ **átomo**: uma constante de texto iniciada com letra minúscula
 - ▶ **variável**: começa com letra maiúscula ou sublinhado ('_')
 - ▶ **estrutura**: termos complexos
- ▶ Algumas implementações podem estender esta lista, com strings e ponto flutuante, por exemplo
- ▶ O uso de aspas simples permite a construção de átomos por meio de qualquer combinação válida de caracteres
- ▶ Os nomes dos predicados seguem as mesmas regras dos átomos

Fatos em programas em Prolog

- ▶ Os fatos são frequentemente utilizados para inserir informações no programa
- ▶ Por exemplo, para o predicado `paciente/3` podem ser atestados os seguintes fatos:

```
paciente('Maria Rita', 35, sus)  
paciente('Pedro Silva', 70, amil)
```

- ▶ As aspas foram usadas nos nomes porque começam em maiúsculas e porque tem espaços
- ▶ Um interpretador Prolog deve fornecer meios de inserção de fatos e regras em uma base de dados dinâmica, a qual pode ser consultada
- ▶ A base de dados é atualizada por meio de consultas (`consult/1` ou `reconsult/1`)

Fatos em programas em Prolog

- ▶ Os predicados podem ser inseridos diretamente no interpretador, mas não são gravados entre as sessões
- ▶ Isto pode ser feito por meio do predicados `asserta/1` e `assertz/1`
- ▶ O primeiro insere um novo fato como primeiro dentre os fatos declarados para o predicado
- ▶ O segundo insere o novo fato como o último dentre os já declarados
- ▶ Os nomes utilizados no fato são indiferentes para o Prolog, mas para a aplicação as relações devem ser compatíveis com a semântica dos identificadores escolhidos
- ▶ Prolog considera distintos os fatos `fato(a, b)` e `fato(b, a)`

Consultas simples

- ▶ Uma vez que a base de dados do interpretador Prolog seja alimentado com fatos, o este interpretador pode responder a consultas (*queries*) a respeito dos fatos
- ▶ As consultas em Prolog funcionam por meio do casamento de padrões (*pattern matching*)
- ▶ O padrão de uma consulta é denominado **objetivo** (*goal*)
- ▶ Se algum fato atinge o objetivo, a consulta é bem sucedida e o interpretador responde “Sim” (**true.**)
- ▶ Caso contrário, a consulta falha e o interpretador responde “Não” (**false.**)
- ▶ O casamento de padrões do Prolog é denominado **unificação**

Unificação

Unificação (versão simplificada)

Se o programa contém apenas fatos, a unificação é bem sucedida se as três condições abaixo são satisfeitas:

1. o predicado citado no objetivo e na base de dados é o mesmo,
2. ambos tem a mesma aridade,
3. todos os argumentos são os mesmos.

Exemplos de unificação

```
1 % Os fatos abaixo devem ser carregados no interpretador Prolog
2 f(1, 2).
3 f(1, 3).
4 f(2, 3).
5
6 g(1).
7 g(2).
8
9 %% Exemplos de consultas
10 % ?- f(1, 2).
11 % true.
12 % ?- f(2, 1).
13 % false.
14 % ?- f(1).
15 % false.
16 % ?- g(1, 2).
17 % false.
```

Variáveis lógicas

- ▶ Objetivos podem ser generalizados por meio de variáveis do Prolog
- ▶ Estas variáveis não se comportam como variáveis em outras linguagens, e são denominadas variáveis lógicas
- ▶ Elas substituem um ou mais argumentos no objetivo
- ▶ O nome e a aridade do predicado devem permanecer os mesmos, porém o argumento substituído pela variável casará positivamente com qualquer termo
- ▶ Após uma unificação bem sucedida, a variável terá como valor os termos os quais casaram com ela
- ▶ Este processo *ata* (*to bind*) os valores (termos) à variável
- ▶ Estes valores serão o retorno da consulta

Variáveis lógicas

- ▶ Um valor será retornado: caso mais de um valor seja casado com a variável, Prolog fornece mecanismos para a extração de todos eles
- ▶ Após uma resposta pode ser inserido o ponto-e-vírgula (;): isto faz com que Prolog procure por casamentos alternativos para as variáveis
- ▶ Qualquer outra entrada encerra a consulta
- ▶ Se não houveram mais alternativas, o retorno será “Não”
- ▶ Os nomes das variáveis devem iniciar em maiúsculas
- ▶ Todos os argumentos da consulta podem ser substituídos por variáveis

Exemplo de uso de variáveis lógicas

```
1 algoritmo(grafos, kruskall).
2 algoritmo(grafos, bellman-ford).
3
4 algoritmo(strings, kmp).
5 algoritmo(strings, z-function).
6 algoritmo(strings, lcs).
7
8 algoritmo(gulosos, kruskall).
9
10 %% Exemplos de consultas
11 % ?- algoritmo(strings, X).
12 % X = kmp ;
13 % X = z-function ;
14 % X = lcs.
15 % ?- algoritmo(Area, kruskall).
16 % Area = grafos ;
17 % Area = gulosos.
```


Backtracking

- ▶ Quando Prolog tenta satisfazer um objetivo a respeito de um predicado, ele percorre todas as cláusulas que definem o predicado
- ▶ Uma vez que há um casamento (entre argumentos ou variáveis), a cláusula em questão é marcada, indicando que ela satisfaz o objetivo
- ▶ O interpretador retorna o valor deste casamento, no caso de variáveis, ou “Sim”, no caso de argumentos
- ▶ Se o usuário solicitar mais respostas, ele retoma a busca entre as cláusulas a partir do ponto em que ele parou
- ▶ Nesta retomada a última variável que foi casada é desatada
- ▶ Este processo é denominado *backtracking*

Objetivos e fluxo de controle

- ▶ Um objetivo em Prolog tem quatro portas que representam o fluxo de controle quando este avalia o objetivo: chamada (*call*), saída (*exit*), retomada (*redo*) e falha (*fail*)
- ▶ A avaliação do objetivo inicia na chamada
- ▶ Se a chamada é bem sucedida (há um casamento de padrão), a avaliação sai (encerra, *exit*), atando as variáveis com os resultados obtidos
- ▶ Caso contrário, a avaliação falha: não há mais valores que possam satisfazer o objetivo
- ▶ Se bem sucedida e é seguida de um ';', a avaliação é retomada (*redo*) a partir do ponto que parou
- ▶ As variáveis são desatadas de seus valores e se busca por novos valores que também satisfaçam o objetivo

Visualização do fluxo em Prolog



Rastreamento

- ▶ É possível rastrear (*to trace*) o fluxo de controle do Prolog por meio do predicado `trace/0`
- ▶ Todas as consultas subsequentes serão rastreadas
- ▶ O comando `creep` avança para o próximo passo da execução, de modo semelhante ao comando *step* dos depuradores das linguagens procedurais
- ▶ No SWI-Prolog, este comando pode ser inserido através da barra de espaço
- ▶ Para desativar o modo `trace`, use o predicado `notrace/0`, seguido do predicado `nodebug/0`

Generalizações

- ▶ As variáveis lógicas permite a declaração de generalizações
- ▶ Generalizações são fatos que casam com qualquer outro valor
- ▶ Por exemplo, a afirmação “Todos dormem” pode ser declarada como

```
?- assert(sleeps(X)).
```

- ▶ Outro fato importante relativo às variáveis lógicas é que se uma mesma variável é utilizada em vários argumentos, o casamento só será bem sucedido se esta variável casar com o mesmo valor em todas as suas ocorrências

Exemplo de mesma variável lógica em múltiplos argumentos

```
1 % Mesma variável lógica em ambos argumentos
2 f(1, 1).
3 f(1, 2).
4 f(1, 3).
5 f(2, 1).
6 f(2, 2).
7 f(2, 3).
8 g(a, 1).
9 g(1, a).
10
11 % Exemplos de consultas
12 % ?- f(X, X).
13 % X = 1 ;
14 % X = 2 ;
15 % false.
16 % ?- g(X, X).
17 % false.
```

Consultas compostas

- ▶ Consultas simples podem ser combinadas em consultas compostas por meio do operador `' , '`, que corresponde ao **e** lógico
- ▶ A sintaxe para consultas compostas é

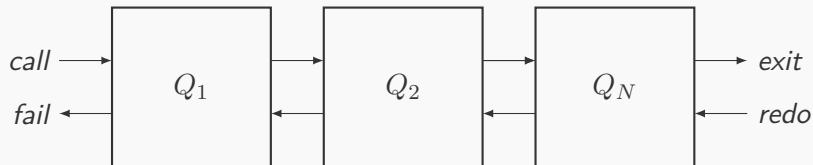
`?- query1(a1, ..., ak), query2(b1, ..., br), ..., queryN(z1, ..., zs).`

- ▶ Se uma mesma variável aparece em mais de um predicado da consulta composta, ela deve ter o mesmo valor em todos eles para que exista um casamento de padrão para a consulta composta
- ▶ O escopo de uma variável lógica é uma consulta, seja simples ou composta
- ▶ Se a mesma variável é utilizada em consultas distintas, cada consulta tem sua própria cópia da variável

Consultas compostas

- ▶ O processo de *backtracking* é utilizado para tentar casar todos os padrões, da esquerda para a direita
- ▶ Ele encerra (porta **exit**) com sucesso apenas se ele sai do predicado mais à direita com sucesso
- ▶ Neste caso, ele imprima o conjunto de variáveis cujas atribuições tornaram a consulta composta verdadeira
- ▶ Se uma consulta sai pela porta **redo**, apenas as variáveis presentes no predicado mais à direita são desatadas (as variáveis associadas aos predicados anteriores permanecem atadas)
- ▶ Se a consulta falha para um dos predicados, ela falha como um todo
- ▶ O operador ponto-e-vírgula (';') força uma reentrada no último predicado pela porta **redo**

Visualização do fluxo para consultas compostas em Prolog



Exemplo de consultas compostas

```
1 cidade('Brasília', df).
2 cidade('Gama', df).
3 cidade('Cuiabá', mt).
4 cidade('Barra dos Bugres', mt).
5 cidade('Tangará da Serra', mt).
6 cidade('Belo Horizonte', mg).
7 cidade('Governador Valadares', mg).
8 capital('Brasília').
9 capital('Cuiabá').
10 capital('Belo Horizonte').
11 regioao(centro_oeste, df).
12 regioao(centro_oeste, mt).
13 regioao(sudeste, mg).
14
15 % Exemplos de consultas:
16 % ?- cidade(X, mt), capital(X).
17 % ?- cidade(X, Y), regioao(centro_oeste, Y), capital(X).
```

Predicados pré-definidos

- ▶ Prolog oferece uma série de predicados pré-definidos (*built-in*)
- ▶ Não há cláusulas para tais predicados
- ▶ Quando um objetivo casa com um predicado pré-definido, ele chama uma rotina pré-definida
- ▶ Estas rotinas, em geral, são implementadas na mesma linguagem que implementou o interpretador Prolog
- ▶ Elas realizam tarefas que estão fora do contexto da prova de teoremas lógicos, como escrever no console
- ▶ Por esta razão, também são denominados predicados extra-lógicos
- ▶ Ele respondem tanto na porta **call** (*left*) quando na porta **redo** (*right*)
- ▶ A resposta no caso **redo** é denominada comportamento no *backtracking*

Predicados extra-lógicos

- ▶ Exemplos de predicados extra-lógicos de I/O:
 1. **write**/1: sempre casa com qualquer padrão, e tem como efeito colateral escrever seu argumento no console. Sempre falha no *backtracking*
 2. **nl**/0: sempre é bem sucedido, e inicia uma nova linha. Também falha no *backtracking*
 3. **tab**/1: avança n espaços, onde n é seu argumento. Mesmo comportamento dos anteriores
- ▶ Estes predicados não afetam o fluxo de controle, transferindo-o controle adiante (*right*) ou para trás (*backtracking*)
- ▶ Eles também não alteram as variáveis
- ▶ O predicado **fail**/0 sempre falha
- ▶ Se ele recebe o controle vindo da esquerda, ele passa o controle imediatamente para a porta *redo* do objetivo à sua esquerda
- ▶ Ele nunca recebe o controle da direita, pois nunca deixa o fluxo avançar para lá

Exemplo de consultas que utilizam predicados extra-lógicos

```
1 triangle(equilateral).
2 triangle(isosceles).
3 triangle(scalene).
4
5 quadrilateral(square).
6 quadrilateral(rectangle).
7 quadrilateral(rhombus).
8 quadrilateral(trapezoid).
9
10 equal_sides(equilateral).
11 equal_sides(square).
12 equal_sides(rhombus).
13 right_angles(square).
14 right_angles(rectangle).
15
16 % Exemplo de query que imprime todos os resultados possíveis sem interação
17 % ?- quadrilateral(X), equal_sides(X), write(X), nl, fail.
```

Referências

1. **MERRIT**, Dennis. *Adventure in Prolog*, Amzi! Inc, 191 pgs, 2017.
2. **SHALOM**, Elad. *A Review of Programming Paradigms Throughtout the History – With a Suggestion Toward a Future Approach*, Amazon, 2019.
3. SWI Prolog. [SWI Prolog](#), acesso em 10/11/2020.
4. Wikipédia. [Prolog](#), acesso em 10/11/2020.