# Paradigmas de Linguagens de Programação

## Descrevendo a Sintaxe e a Semântica

Cristiano Lehrer, M.Sc.





ybadoo

# Introdução

- Descrição, compreensível, de uma linguagem de programação é difícil e essencial.
- Capacidade de determinar como as expressões, instruções e unidades são formadas e suas intenções de efeito quando executadas.
- Pode ser dividida em:
  - Sintaxe → forma.
  - Semântica → significado.
- Sintaxe e semântica são bastante relacionados.
- Descrever sintaxe é mais fácil do que a semântica.

# Sintaxe (1/2)

- Linguagem:
  - Conjunto de cadeias de caracteres de algum alfabeto.
- As cadeias são chamadas sentenças ou instruções.
- Regras sintáticas de uma linguagem especificam quais cadeias do alfabeto pertencem à linguagem.
- Lexema:
  - Identificadores, constantes, operadores e palavras especiais.
- Token:
  - Categoria de lexemas:
    - Identificador, operação de adição, ....

# Sintaxe (2/2)

```
index = 2 * count + 17;
```

| Lexemas | Tokens |
|---|---|
| `index` | identificador |
| `=` | operador de atribuição |
| `2` | constante numérica inteira |
| `*` | operador de multiplicação |
| `count` | identificador |
| `+` | operador de adição |
| `17` | constante numérica inteira |
| `;` | ponto e vírgula |

# Reconhecedores

- Suponha:
  - Linguagem L sobre um alfabeto $\Sigma$.
- Para definir L usando o método de reconhecimento é preciso construir um mecanismo R de tal forma que quando uma cadeia for fornecida para este mecanismo, este diga se esta cadeia pertence ou não a L.
- É como um filtro que separa as sentenças corretas das erradas.
- Reconhecimento não é usado para enumerar todas as sentenças de uma linguagem.
- A análise sintática de um compilador é um reconhecedor, determinando apenas se um programa está na linguagem.

# Geradores

- Dispositivo usado para gerar sentenças de uma linguagem.
- É como um botão que, quando pressionado, produz uma sentença da linguagem.
- Não é claro que sentença será produzida:
  - Parece ser pouca utilizada como descritor de linguagem.
- Para um programador, um reconhecedor (análise sintática) não é tão útil:
  - Só pode ser usado na tentativa e erro.
- Geração é preferido a reconhecimento porque é mais fácil de ler e entender.

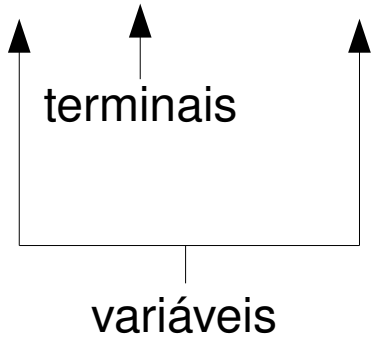
# Forma de Backus-Naur (1/6)

- Popularmente conhecida como BNF.
- É um método formal para descrição da sintaxe.
- Origem:
  - ALGOL 58 e ALGOL 60.
- É uma notação natural de descrever a sintaxe.
- Uma metalinguagem é uma linguagem usada para descrever outra linguagem.
- BNF é uma metalinguagem para linguagens de programação.

# Forma de Backus-Naur (2/6)

- BNF utiliza abstrações para representar estruturas sintáticas.
- As abstrações são geralmente chamadas de símbolos não-terminais (variáveis).
- Os lexemas e tokens são chamados símbolos terminais.
- As definições são chamadas de regras.

< assign > → < var > = < expression >



# Forma de Backus-Naur (3/6)

- Uma gramática é uma coleção de regras.
- Símbolos não-terminais podem ter mais de um definição:

< if_stmt > → **if** < logic_expr > **then** < stmt >

| **if** < logic_expr > **then** < stmt > **else** < stmt >

- Listas de tamanhos variáveis:

< ident_list > → < identifier >

| < identifier > **,** < ident_list >

# Forma de Backus-Naur (4/6)

- BNF é um dispositivo de geração de linguagens.
- Sentenças são geradas através da aplicação de regras.
- Inicia com um conjunto não-terminal especial:
  - start symbol.
- Esta geração de sentença é chamada de derivação.
- O start symbol representa um programa completo.

# Forma de Backus-Naur (5/6)

| | | |
|---|---|---|
| < program > | → | **begin** < stmt_list > **end** |
| < stmt_list > | → | < stmt > |
| | \| | < stmt >**;** < stmt_list > |
| < stmt > | → | < var > **=** < expression > |
| < var > | → | **A** \| **B** \| **C** |
| < expression > | → | < var > **+** < var > |
| | \| | < var > **-** < var > |
| | \| | < var > |

# Forma de Backus-Naur (6/6)

- Uma derivação de um programa nesta linguagem:

< program >
begin < stmt_list > end
begin < stmt >; < stmt_list > end
begin < var > = < expression >; < stmt_list > end
begin A = < expression >; < stmt_list > end
begin A = < var > + < var >; < stmt_list > end
begin A = B + < var >; < stmt_list > end
begin A = B + C; < stmt_list > end
begin A = B + C; < stmt > end
begin A = B + C; < var > = < expression > end
begin A = B + C; B = < expression > end
begin A = B + C; B = < var > end
begin A = B + C; B = C end

# Derivação (1/2)

- Um outro exemplo de gramática:

< assign > → < id > **=** < expr >

< id > → **A** | **B** | **C**

< expr > → < id > **+** < expr >

| < id > ***** < expr >

| **(** < expr > **)**

| < id >

# Derivação (2/2)

- Derivação à Extrema Esquerda (DEE):

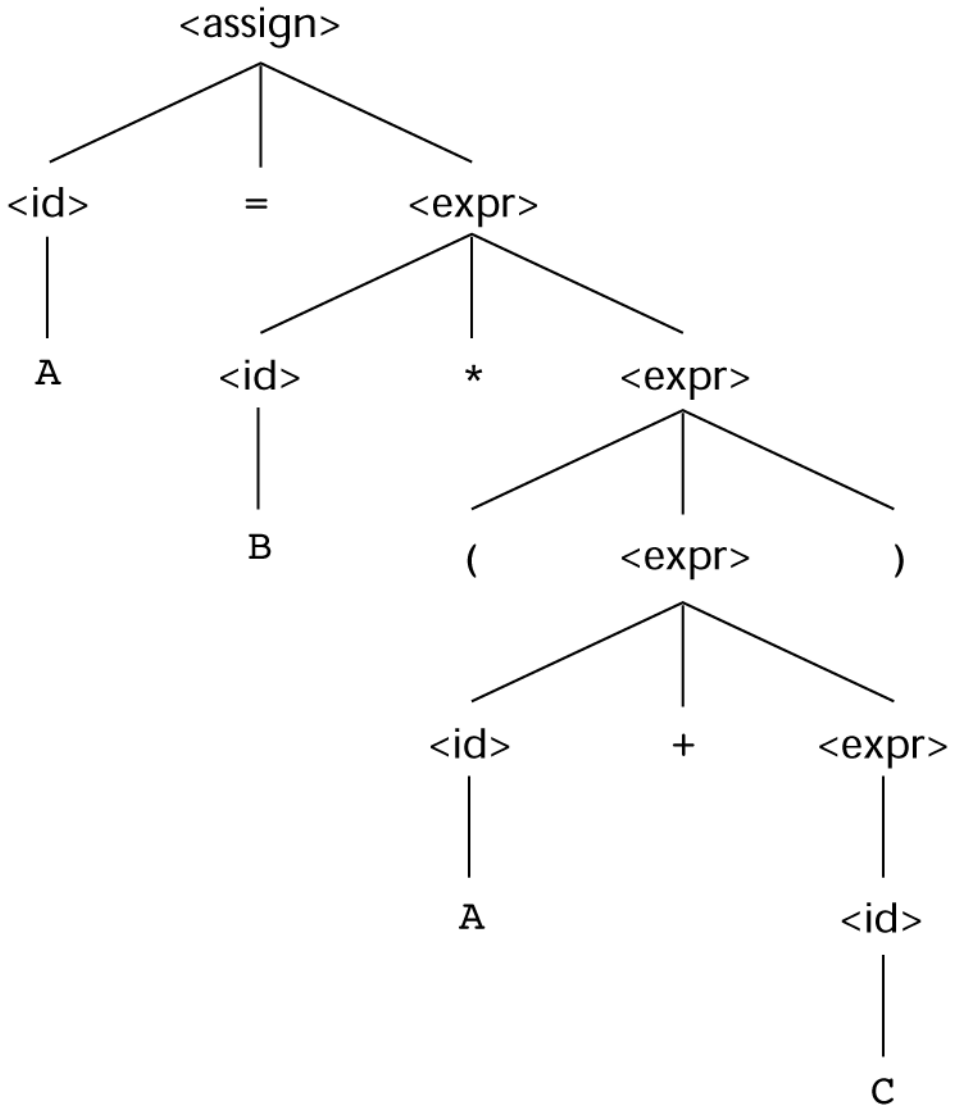
< assign >
< id > = < expr >
A = < expr >
A = < id > * < expr >
A = B * < expr >
A = B * ( < expr > )
A = B * ( < id > + < expr > )
A = B * ( A + < expr > )
A = B * ( A + < id > )
A = B * ( A + C )

- Derivação à Extrema Direita (DED):

< assign >
< id > = < expr >
< id > = < id > * < expr >
< id > = < id > * ( < expr > )
< id > = < id > * ( < id > + < expr > )
< id > = < id > * ( < id > + < id > )
< id > = < id > * ( < id > + C )
< id > = < id > * ( A + C )
< id > = B * ( A + C )
A = B * ( A + C )

# Árvore de Derivação

- Gramáticas descrevem uma estrutura hierárquica das sentenças.
- Essa estrutura hierárquica é chamada de *parse tree*.



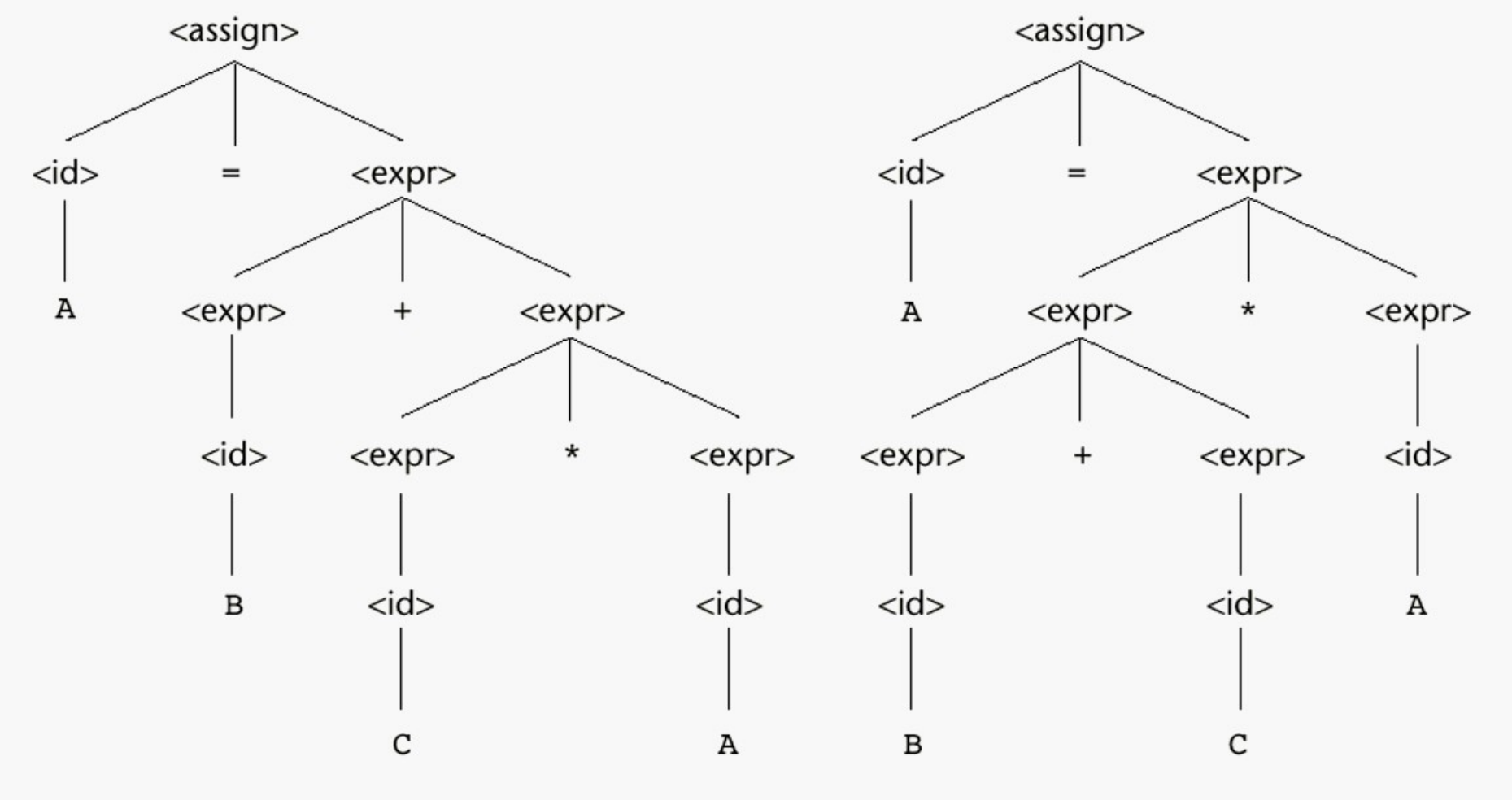
# Ambiguidade (1/2)

- Uma gramática que gera uma sentença para o qual existem duas ou mais árvores de derivação.

< assign > → < id > **=** < expr >
< id > → **A** | **B** | **C**
< expr > → < expr > **+** < expr >
| < expr > ***** < expr >
| **(** < expr > **)**
| < id >

# Ambiguidade (2/2)

A := B + C * A



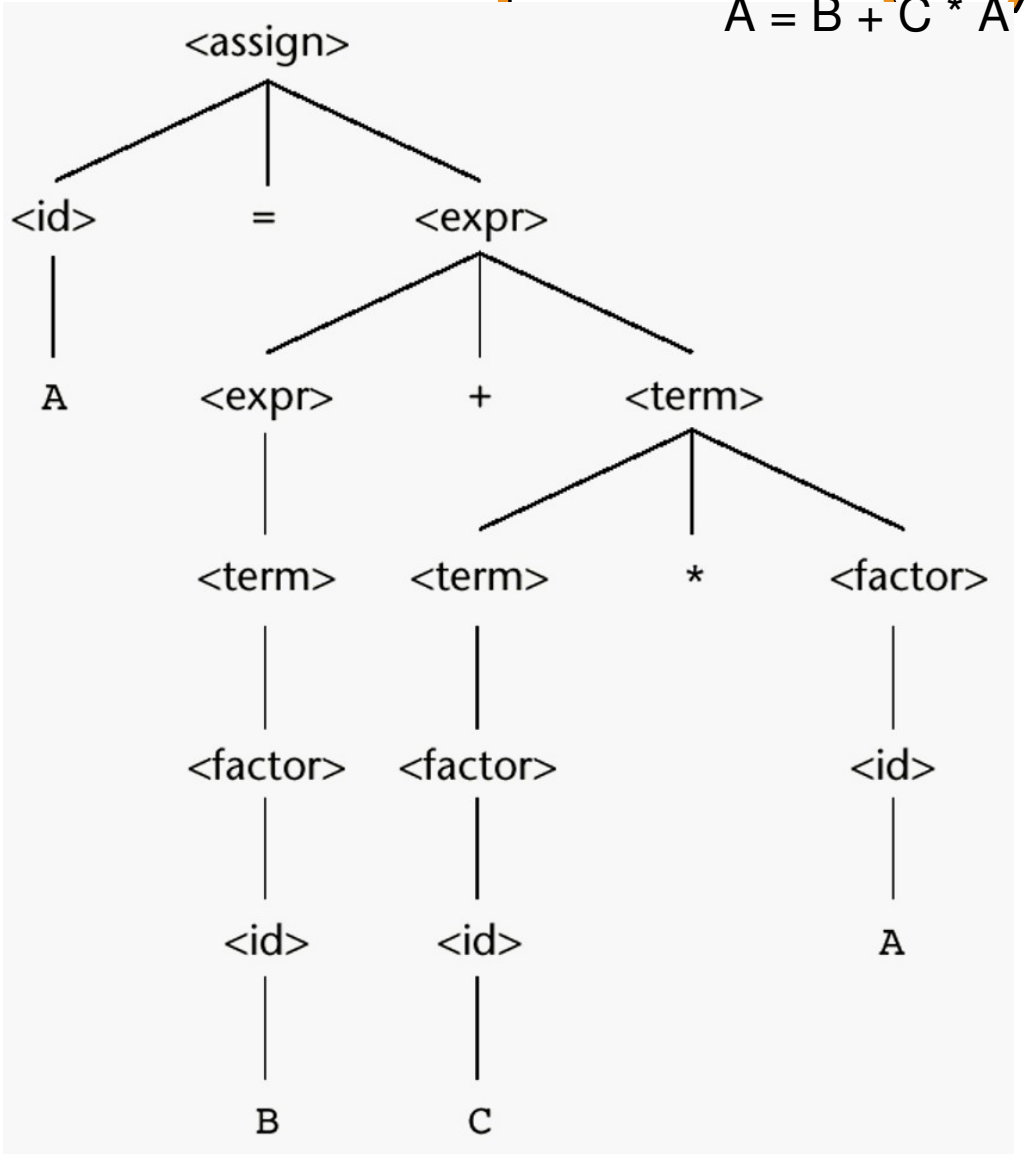
# Precedência de Operadores (1/3)

- Uma árvore de derivação pode ser usada para indicar precedência de operadores.

| | | |
|---|---|---|
| < assign > | → | < id > **=** < expr > |
| < id > | → | **A** \| **B** \| **C** |
| < expr > | → | < expr > **+** < term > |
| | \| | < term > |
| < term > | → | < term > ***** < factor > |
| | \| | < factor > |
| < factor > | → | **(** < expr > **)** |
| | \| | < id > |

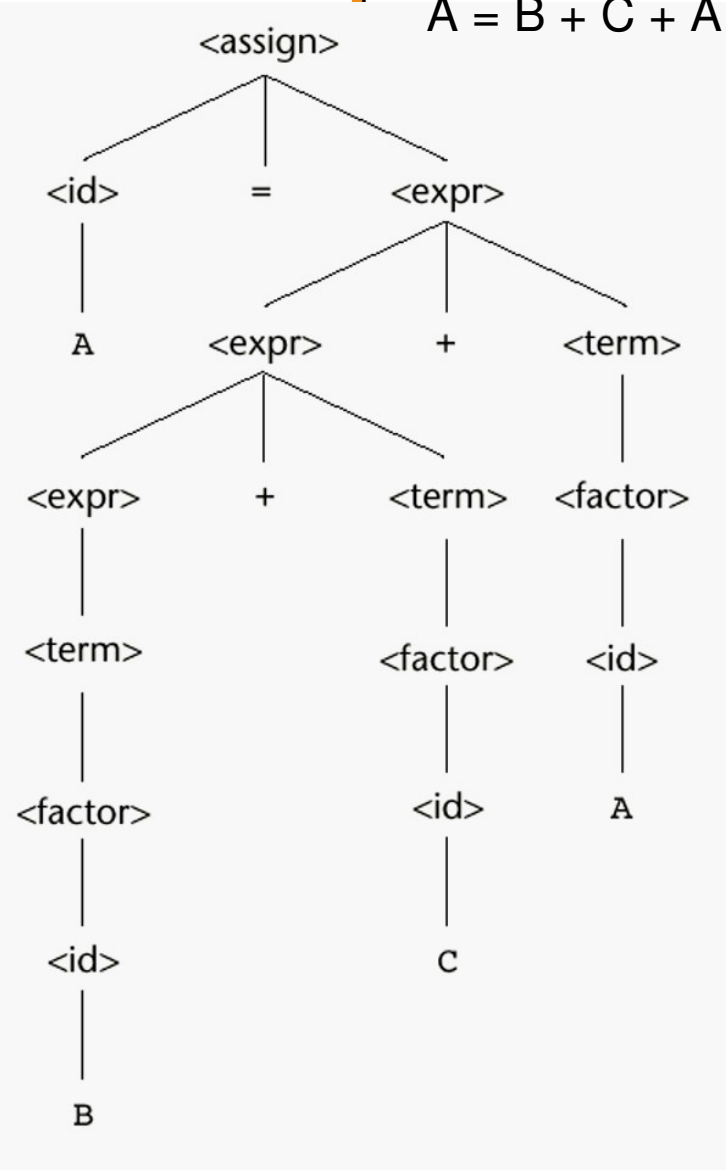
# Precedência de Operadores (2/3)

A = B + C * A



# Precedência de Operadores (3/3)

A = B + C + A



# BNF Estendida (1/3)

- Três extensões foram propostas:
  - Não melhoram o poder descritivo, mas aumenta a legibilidade e a redigibilidade.
- Parte opcional:
  - < selection > → **if (** < expression > **)** < statment > [ **else** < statement > ] **;**
- Repetição:
  - < ident_list > → < identifier > {**,** < identifier > }
- Múltipla escolha:
  - < for_stmt > → **for** < var > **:=** < expr > (**to** | **downto**) < expr > **do** < stmt >

# BNF Estendida (2/3)

- BNF:

< expr > → < expr > **+** < term >
| < expr > **-** < term >
| < term >
< term > → < term > ***** < factor >
| < term > **/** < factor >
| < factor >

- EBNF:

< expr > → < term > { ( **+** | **-** ) < term > }
< term > → < factor > { ( ***** | **/** ) < factor > }

# BNF Estendida (3/3)

- Algumas versões de EBNF permitem que se coloque um número sobrescrito indicando a quantidade de repetições;
- Ou que se coloque um sinal de mais (+) para indicar uma ou mais vezes.

< program > → **begin** < stmt > { < stmt > } **end**

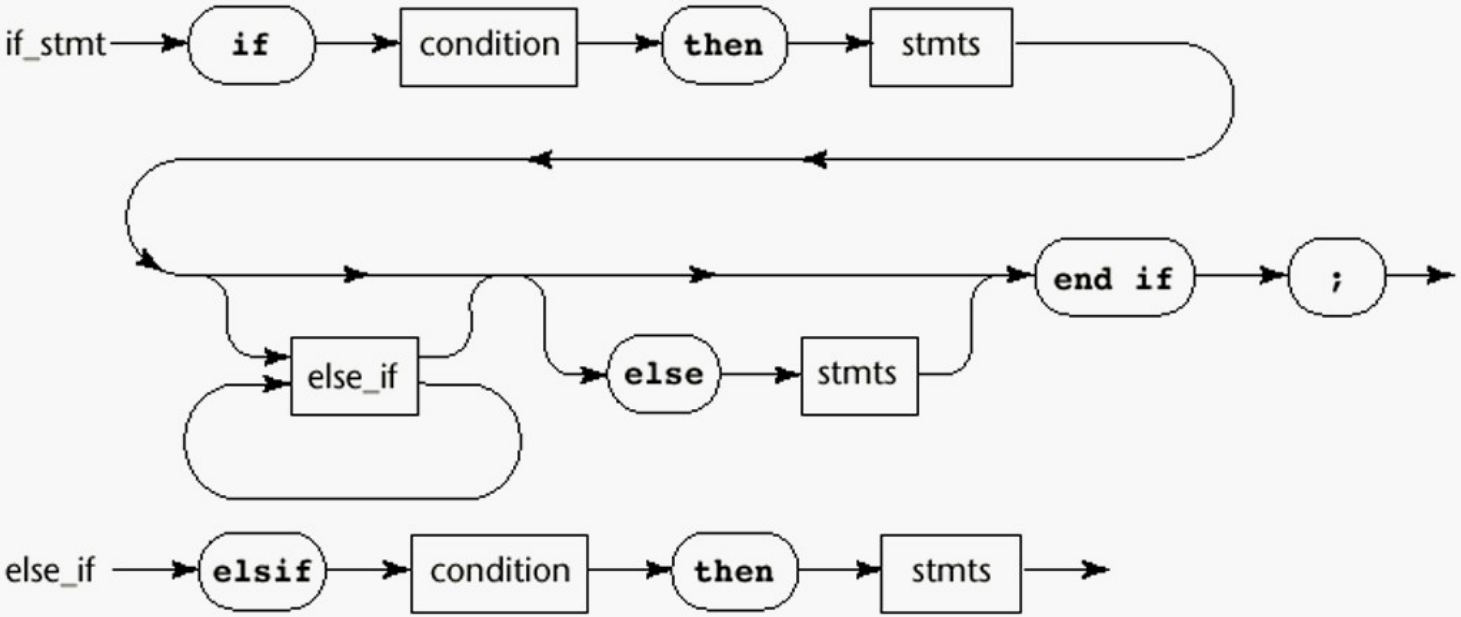
< program > → **begin** { < stmt > }$^{+}$ **end**

# Grafos de Sintaxe (1/2)

- Um grafo é uma coleção de nodos, alguns conectados através de linhas chamadas arestas.
- Um grafo direcionado possui arestas direcionais.
- As informações de regras BNF podem ser expressas em termos de grafos direcionais:
  - Chamados de grafos sintáticos.
- Usam diferentes tipos de nodos para representar os terminais e os não-terminais.
- Usar gráficos melhora a legibilidade.

# Grafos de Sintaxe (2/2)

- Grafo sintático e descrição EBNF da instrução if na linguagem ADA.




<if_stmt> ⟶ **if** <condition> **then** <stmts> {<else_if>}

[**else** <stmts>] **end if**

<else_if> ⟶ **elsif** <condition> **then** <stmts>

# Análise Sintática Descendente Recursiva (1/5)

- *Recursive Descent Parsing*.
- As gramáticas servem como base para o analisador sintático, ou *parser*, de um compilador.
- *Parsing* é o processo de construir uma árvore de derivação para uma dada cadeia de caracteres de entrada.
- A idéia é que existe um subprograma para cada  não-terminal.
- Quando é dado um texto de entrada, é produzido uma árvore de derivação que inicia neste não-terminal e cujas folhas casam com esta.

# Análise Sintática Descendente Recursiva (2/5)

- Este subprograma é um *parser* para esta linguagem que pode ser gerado por este não-terminal.
- As linguagens têm unidades sintáticas aninhadas, por isso os subprogramas são recursivos.
- Considere a seguinte descrição EBNF:

< expr > → < term > { ( **+** | **-** ) < term > }
< term > → < factor > { ( ***** | **/** ) < factor > }
< factor > → < id > | **(** < expr > **)**

# Análise Sintática Descendente Recursiva (3/5)

- O subprograma descendente recursivo para < expr >:

```
void expr ()
{
  term();  /*analise o primeiro termo*/
       while (prox_token == sinal_mais || prox_token == sinal_menos)
  {
    lexical(); /*peque o próximo token da entrada*/
    term(); /*analise o próximo termo*/
  }
}
```

# Análise Sintática Descendente Recursiva (4/5)

- A parte da linguagem que `<expr>` analisa consiste de um ou mais `<term>` separados pelos operadores de adição ou subtração.
- Esta é a linguagem gerada por `<expr>`.
- Ela é simples e não detecta erros sintáticos.
- O processo geral de escrita de subprograma para um dado não-terminal é feito da seguinte forma:
  - Para cada terminal, este é comparado com o próximo token. Se não casarem houve um erro de sintaxe. Se casarem, o analisador léxico é chamado para pegar o próximo token.

# Análise Sintática Descendente Recursiva (5/5)

```
void factor()
{
  if (prox_token_ == id_code)
  {
    lexical();
    return;
  }
  else if (prox_token == cod_parent_esq)
  {
    lexical();
    expr();
    if (prox_token == cod_parent_dir)
    {
      lexical();
      return();
    }
    else error();  /*à espera do parêntese direito*/
  }
  else error();  /*não era nem um id, nem um parêntese esquerdo*/
}
```

# Gramática com Atributos (1/6)

- Serve para descrever tanto a sintaxe quanto a semântica estática.
- É um dispositivo usado para descrever melhor a estrutura de uma linguagem de programação do que o permitido pelas BNF.
- Existem algumas características de linguagens que são difíceis de descrever usando a notação BNF:
  - Compatibilidade de tipos:
    - A gramática ficaria muito grande.
  - Variáveis que devem ser declaradas antes de serem utilizadas:
    - Impossível.
  - O end de um subprograma em ADA deve casar com o nome do subprograma.

# Gramática com Atributos (2/6)

- Estes problemas exemplificam a categoria de regras de linguagem chamada de regras de semântica estática.
- Tem pouca relação com significado do programa:
  - Sintaxe ao invés de semântica.
- A análise requerida para checar estas especificações podem ser feitas em tempo de compilação.
- Gramática com atributos são gramáticas para as quais foram adicionadas atributos.
- Atributos intrínsecos possuem valores determinados fora da árvore de derivação. O tipo de uma variável pode vir de uma tabela de símbolos.

# Gramática com Atributos (3/6)

- O nome no end de um procedimento ADA deve combinar com o nome do procedimento.
- Regra sintática:

< proc_def > → **procedure** < proc_name >[1]
< proc_body > **end** < proc_name >[2]**;**

- Regra semântica:

< proc_name >[1].string = <proc_name>[2].string

- Quando existe mais de uma ocorrência de um não-terminal, este é indexado com colchetes para diferenciá-los.

# Gramática com Atributos (4/6)

1. Sintaxe: <assign> → <var> **=** <expr>
Semântica: <expr>.expected_type ← <var>.actual_type

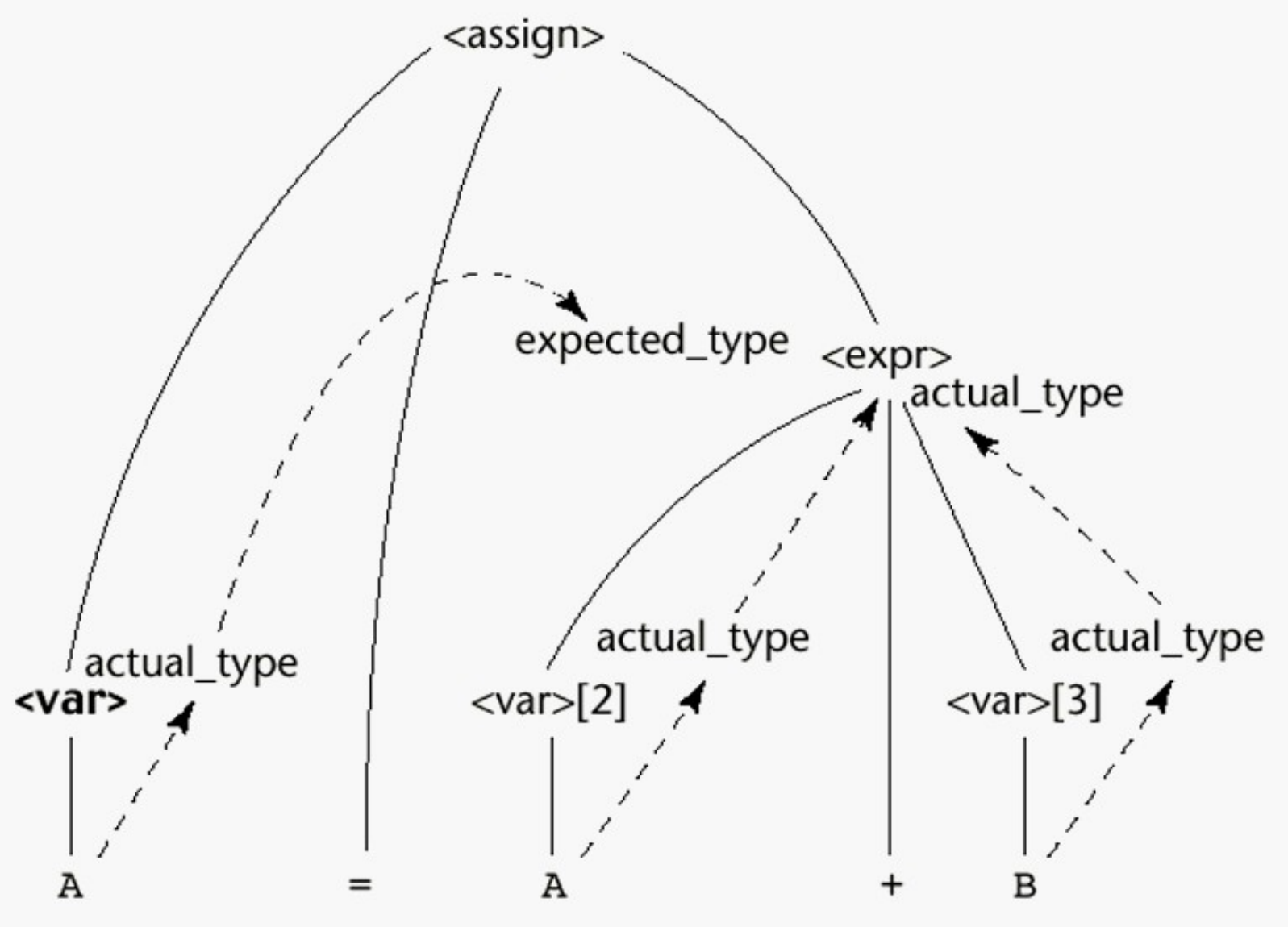
2. Sintaxe: <expr> → <var>[2] **+** <var>[3]
Semântica: <expr>.actual_type ← if (<var>[2].actual_type = int) &
(<var>[3].actual_type = int)
then int
else real
Predicado: <expr>.actual_type = <expr>.expected_type

3. Sintaxe: <expr> → <var>
Semântica: <expr>.actual_type ← <var>.actual_type
Predicado: <expr>.actual_type = <expr>.expected_type

4. Sintaxe: <var> → **A** | **B** | **C**
Semântica: <var>.actual_type ← look-up(<var>.string)

Obs.: look-up pesquisa determinado nome de variável na tabela de símbolos e retorna o tipo desta.

# Gramática com Atributos (5/6)



# Gramática com Atributos (6/6)

1. <var>.actual_type ← look-up(A) (regra 4)
2. <expr>.expected_type ← <var>.actual_type (regra 1)
3. <var>[2].actual_type ← look-up(A) (regra 4)
4. <var>[3].actual_type ← look-up(B) (regra 4)
5. <expr>.actual_type ← int ou real (regra 2)
6. <expr>.expected_type = <expr>.actual_type é TRUE ou FALSE (regra 2)

# Semântica Dinâmica (1/2)

- Descrever a semântica dinâmica, ou significado, de expressões, instruções e unidades, não é uma tarefa fácil.
- Não existe uma notação universalmente aceita para descrevê-la.
- Por que descrever a semântica dinâmica:
  - Programadores precisam saber o que os elementos da linguagem fazem.
  - Desenvolvedores de compiladores baseiam a semântica em descrições da linguagem natural.

# Semântica Dinâmica (2/2)

- É objeto de pesquisa encontrar um formalismo semântico que possa ser usado tanto por programadores quanto por desenvolvedores de compiladores.
- A prova de corretude de programas confiam em alguma descrição formal da semântica da linguagem:
  - Semântica operacional.
  - Semântica axiomática.
  - Semântica denotacional.

# Semântica Operacional (1/5)

- A ideia por trás da semântica operacional é a descrição do significado de um programa pela execução de suas instruções em uma máquina real ou simulada.
- As alterações que ocorrem no estado da máquina quando esta executa uma instrução define o significado desta instrução.
- Exemplo:
  - Instrução em linguagem de máquina.

# Semântica Operacional (2/5)

- Descrever a semântica operacional de uma linguagem de alto nível requer a construção de um computador real ou simulado.
- A semântica para uma linguagem de alto nível pode ser descrita usando um interpretador puro para esta linguagem.
- Dois problemas:
  - Complexidade do hardware pode fazer com que as ações sejam difíceis de entender.
  - Só serviriam para um computador igualmente configurado.

# Semântica Operacional (3/5)

- Estes problemas são evitados pela troca do computador real por um computador virtual, implementado via simulação por software.
- O conjunto de instruções poderiam ser projetado de tal forma que a semântica de cada instrução fosse fácil de entender.
- Requer a construção de dois componentes:
  - Tradutor para converter as instruções da linguagem de alto nível na linguagem intermediária.
  - A máquina virtual para esta linguagem intermediária.

# Semântica Operacional (4/5)

- Este conceito é frequentemente usado em manuais de linguagens.
- O leitor das descrições de semântica operacional é o computador virtual e é assumido ser capaz de executar corretamente as instruções e reconhecer os efeitos da execução.

# Semântica Operacional (5/5)

**Instrução em C**

```
for (expr1; expr2; expr3){
…
}
```

**Semântica Operacional**

```
expr1;
loop: if expr2 == 0 goto out;
…
expr3;
goto loop;
out: ....
```

# Semântica Axiomática (1/7)

- Semântica axiomática foi definida em conjunto com o desenvolvimento de um método para provar a corretude de programas.
- Tais provas de corretude, mostram que um programa executa a computação descrita por sua especificação.
- Cada instrução é precedida e seguida por uma expressão lógica que especifica restrições sobre variáveis de programa.
- Estas expressões, ao invés de representar o estado de uma máquina abstrata, são usadas para representar o significado de instruções.

# Semântica Axiomática (2/7)

- Notação usada para descrever restrições é o cálculo de predicados.
- Semântica axiomática é baseada em lógica matemática.
- As expressões lógicas são chamadas predicados ou assertivas.
- Uma assertiva imediatamente precedente de uma instrução descreve as restrições sobre as variáveis naquele ponto:
  - Chamadas de pré-condições.

# Semântica Axiomática (3/7)

- Uma assertiva imediatamente seguinte a uma instrução descreve uma nova restrição sobre estas, e outras, variáveis após a execução:
  - Chamadas de pós-condições.
- Toda a instrução em um programa tem que ter as duas condições.
- As pré-condições são computadas a partir das pós-condições.

# Semântica Axiomática (4/7)

- Exemplo:
  - sum = 2 * x + 1 {sum > 1}
- A pré-condição mais fraca é a pré-condição menos restritiva que garantirá a validade da pós-condição.
- {x > 10} e {x > 100} são exemplos de pré-condições válidas.
- Entretanto:
  - {x > 0} é a pré-condição mais fraca.

# Semântica Axiomática (5/7)

- Para algumas instruções de programas, a computação da pré-condição mais fraca é simples e pode ser especificada por um axioma.
- Na maioria dos casos, entretanto, só via regra de inferência.
- Um axioma é uma instrução lógica que é assumida ser verdade.
- Uma regra de inferência é um método de inferir a verdade de uma assertiva baseada em outras assertivas verdadeiras.

# Semântica Axiomática (6/7)

- Instrução de Atribuição:
  - Seja x := e uma instrução de atribuição geral e seja Q a pós-condição.
  - A pré-condição é definida pelo seguinte axioma:
    - P = Qx→e, o que significa que P é computado como Q com todas as instâncias de x trocadas por e.
  - Exemplo:
    - a := b / 2 – 1 {a > 10}
      - Calculando a pré-condição mais fraca:
        - b / 2 – 1 > 10
        - b > 22

# Semântica Axiomática (7/7)

- Instrução de Atribuição:
  - A notação usual para especificar a semântica axiomática é:
    - {P} S {Q}
  - No caso de uma instrução de atribuição:
    - {Qx→e} S {Q}

# Semântica Denotacional (1/6)

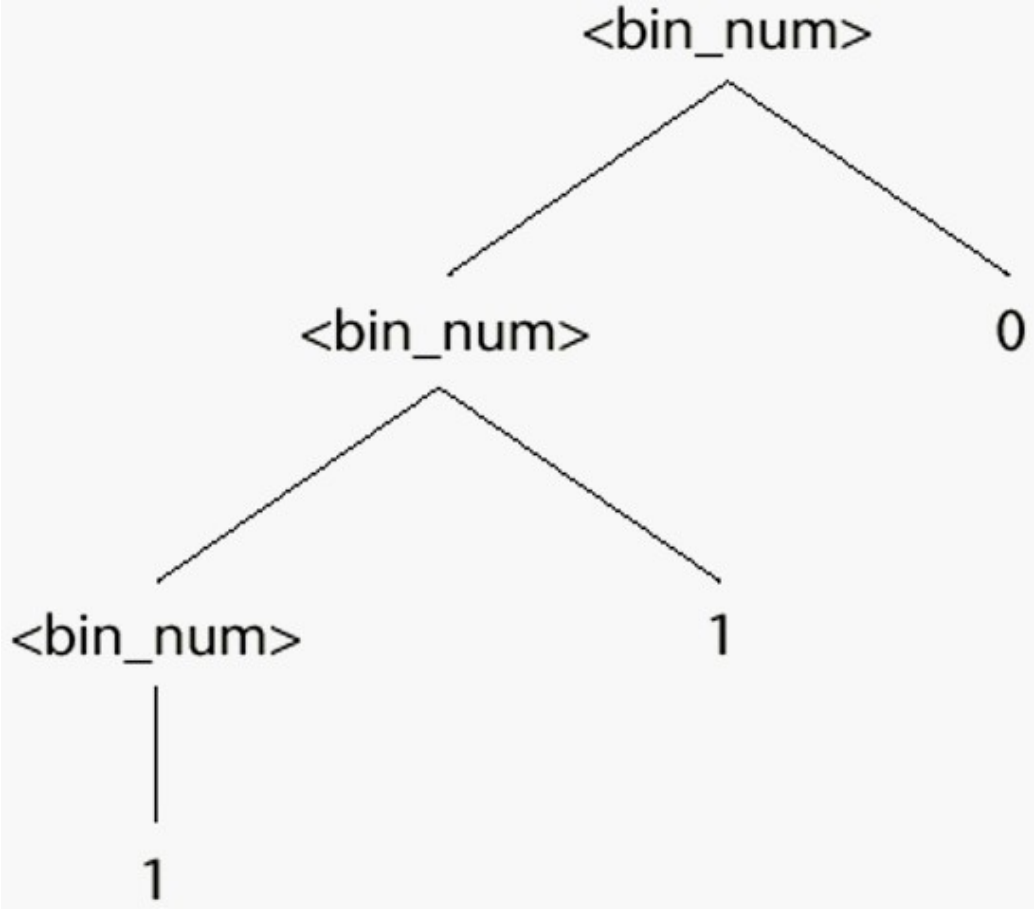
- Semântica denotacional é o método mais rigoroso para descrever o significado de programas.
- É baseado na teoria das funções recursivas.
- O conceito fundamental é a definição para cada entidade da linguagem tanto um objeto matemático quanto uma função que mapeia instâncias desta entidade em instâncias do objeto matemático.
- Os objetos são tão rigorosamente definidos que eles representam o significado exato das entidades correspondentes.

# Semântica Denotacional (2/6)

- A dificuldade deste método está na criação dos objetos e na função de mapeamento.
- O método é chamado denotacional porque os objetos denotam o significado de suas correspondentes entidades sintáticas.
- Exemplo:
  - A sintaxe de números binários podem ser descritas pelas seguintes regras gramaticais:
    - <bin_num> → 0 | 1 | <bin_num> 0 | <bin_num> 1

# Semântica Denotacional (3/6)

- Uma parse tree para o número binário 110 é:








ybadoo

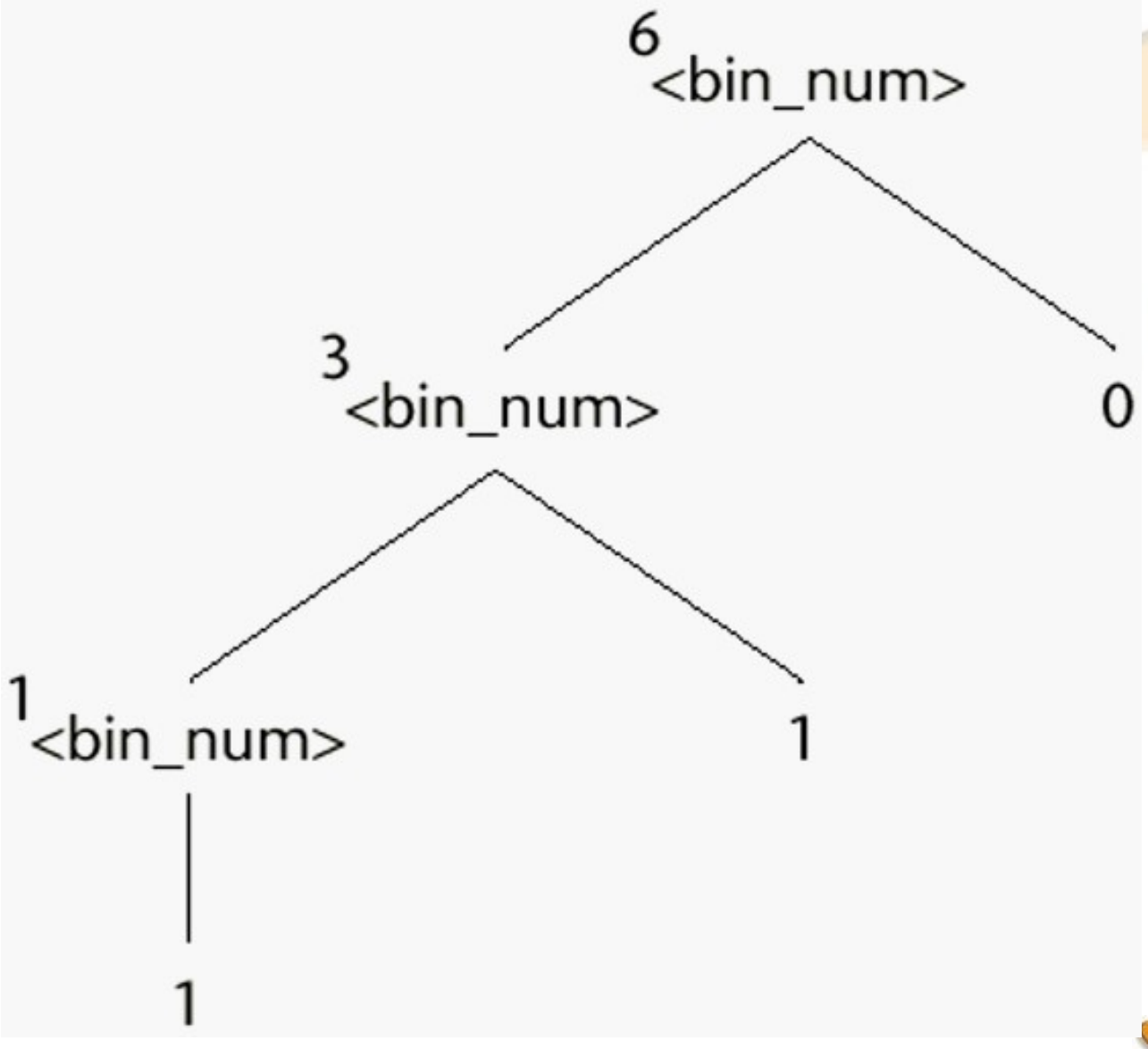
# Semântica Denotacional (4/6)

- Para descrever o significado de números binários usando a semântica denotacional e as regras gramaticais acima, o significado real é associado com cada regra que tem um simples símbolo terminal no lado direito. Objetos serão simples números decimais.
- Faça o domínio de valores semânticos dos objetos ser N. Estes serão os objetos que queremos associar com números binários.
- A função semântica, chamada Mbin mapeia a sintaxe abstrata, descrito pelas regras gramaticas, nos objetos de N.

# Semântica Denotacional (5/6)

- A função Mbin foi definida como:
  - Mbin(0) = 0
  - Mbin(1) = 1
  - Mbin(<bin_num> 0) = 2 * Mbin(<bin_num>)
  - Mbin(<bin_num> 1) = 2 * Mbin(<bin_num>) + 1
- O significado, ou objetos denotados (que no caso são números decimais), podem ser colocados junto aos nodos da *parse tree*.
- Entidades sintáticas abstratas são mapeadas em objetos matemáticos com significado concreto.

# Semântica Denotacional (6/6)








ybadoo