

Tema 2

ANTLR4

Introdução, Estrutura, Aplicação

Compiladores+LFA, 2º semestre 2019-2020

Miguel Oliveira e Silva, Artur Pereira, DETI, Universidade de Aveiro

Conteúdo

1	Apresentação	3
2	Exemplos	4
2.1	<i>Hello</i>	4
2.2	<i>Expr</i>	5
3	Exemplo figuras	7
3.1	Exemplo <i>listener</i>	8
3.2	Exemplo <i>visitor</i>	8
4	Construção de gramáticas	9
4.1	Especificação de gramáticas	10
5	Estrutura sintáctica	10
5.1	Secção de <i>tokens</i>	11
5.2	Acções no preâmbulo da gramática	11
6	Estrutura léxica	11
6.1	Comentários	11
6.2	Identificadores	12
6.3	Literais	12
6.4	Palavras reservadas	12
6.5	Acções	12
7	Regras léxicas	13
7.1	Padrões léxicos típicos	14
8	Operador léxico “não ganancioso”	14
9	Regras sintácticas	14
9.1	Padrões sintácticos típicos	16
9.2	Precedência	16
9.3	Associatividade	16
9.4	Herança de gramáticas	16
10	Mais sobre acções	17

11 Gramáticas ambíguas	18
12 Predicados semânticos	19
13 Separar analisador léxico do analisador sintático	20
14 “Ilhas” lexicais	21
15 Enviar <i>tokens</i> para canais diferentes	22
16 Reescrever a entrada	23
17 Desacoplar código da gramática	23

1 Apresentação

- *ANother Tool for Language Recognition*
- O ANTLR é um gerador de processadores de linguagens que pode ser utilizado para ler, processar, executar ou traduzir linguagens.
- Desenvolvido por Terrence Parr:
 - 1988: tese de mestrado (YUCC)
 - 1990: PCCTS (ANTLR v1). Programado em C++.
 - 1992: PCCTS v 1.06
 - 1994: PCCTS v 1.21 e SORCERER
 - 1997: ANTLR v2. Programado em Java.
 - 2007: ANTLR v3 (LL(*), *auto-backtracking*, yuk!).
 - 2012: ANTLR v4 (ALL(*), *adaptive LL*, yep!).
- Terrence Parr, *The Definitive ANTLR 4 Reference*, 2012, The Pragmatic Programmers.
- Terrence Parr, *Language Implementation Patterns*, 2010, The Pragmatic Programmers.
- <https://www.antlr.org>

ANTLR4: instalação

- Descarregar o ficheiro `antlr4-install.zip` do [elearning](http://antlr.org).
- Executar o script `./install.sh` no directório `antlr4-install`.
- Há dois ficheiros `jar` importantes:
`antlr-4.8-complete.jar` e `antlr-runtime-4.8.jar`
- O primeiro é *necessário* para *gerar* processadores de linguagens, e o segundo é o *suficiente* para *os executar*.
- Para experimentar basta:
`java -jar antlr-4.8-complete.jar`
ou:
`java -cp ./antlr-4.8-complete.jar org.antlr.v4.Tool`
- O ANTLR4 fornece uma ferramenta de teste muito flexível (implementada com o script `antlr4-test`):
`java org.antlr.v4.gui.TestRig`
- Podemos executar uma gramática sobre uma qualquer entrada, e obter a lista de *tokens* gerados, a árvore sintáctica (num formato tipo `LISP`), ou mostrar graficamente a árvore sintáctica.
- Nesta disciplina são disponibilizados vários comandos (em `bash`) para simplificar (ainda mais) a geração de processadores de linguagens:

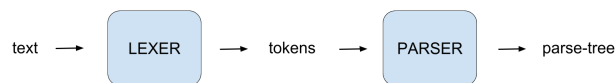
<code>antlr4</code>	compilação de gramáticas ANTLR-v4
<code>antlr4-test</code>	depuração de gramáticas
<code>antlr4-clean</code>	eliminação dos ficheiros gerados pelo ANTLR-v4
<code>antlr4-main</code>	geração da classe <code>main</code> para a gramática
<code>antlr4-build</code>	compila gramáticas e o código <code>java</code> gerado
<code>antlr4-run</code>	executa o compilador
<code>antlr4-jar-run</code>	executa um ficheiro <code>jar</code> (com os <code>jars</code> do <code>antlr4</code>)
<code>antlr4-javac</code>	compilador <code>java</code> (com os <code>jars</code> do <code>antlr4</code>)
<code>antlr4-java</code>	máquina virtual <code>java</code> (com os <code>jars</code> do <code>antlr4</code>)
<code>java-clean</code>	eliminação dos ficheiros binários <code>java</code>
<code>view-javadoc</code>	abre a documentação no <i>browser</i> de classes <code>java</code>
- Estes comandos estão disponíveis no `elearning` e fazem parte da instalação automática.

2 Exemplos

2.1 Hello

ANTLR4: Hello

- ANTLR4:



- Exemplo:

```
// (this is a line comment)
grammar Hello ; // Define a grammar called Hello
// parser (first letter in lower case) :
r : 'hello' ID ; // match keyword hello followed by an identifier
// lexer (first letter in upper case) :
ID : [a-z]+ ; // match lower-case identifiers
WS : [ \t\r\n]+ -> skip ; // skip spaces, tabs, newlines, (Windows)
```

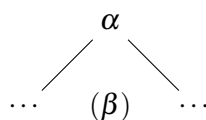
- As duas gramáticas – lexical e sintáctica – são expressas com instruções com a seguinte estrutura:

$$\alpha : \beta;$$

em que α corresponde a um único símbolo lexical ou sintáctico (dependendo da sua primeira letra ser, respectivamente, maiúscula ou minúscula); e em que β é uma expressão simbólica equivalente a α .

ANTLR4: Hello (2)

- Uma sequência de símbolos na entrada que seja reconhecido por esta regra gramatical pode sempre ser expressa por uma estrutura tipo árvore (chamada *sintáctica*), em que a raiz corresponde a α e os ramos à sequência de símbolos expressos em β :



- Podemos agora gerar o processador desta linguagem e experimentar a gramática utilizando o programa de teste do ANTLR4.

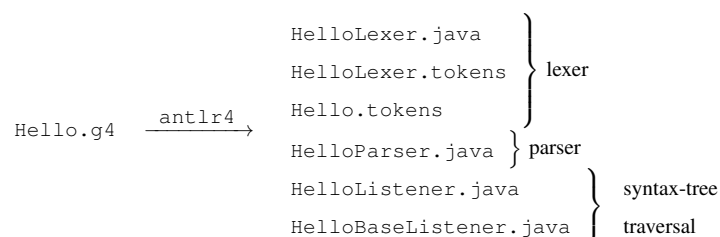
```
antlr4 Hello.g4
antlr4-javac Hello*.java
echo "hello compiladores" | antlr4-test Hello r -tokens
```

- Utilização:

```
antlr4-test [<Grammar> <rule>] [-tokens | -tree | -gui]
```

ANTLR4: Ficheiros gerados

- Executando o comando `antlr4` sobre esta gramática obtemos os seguintes ficheiros:



- Ficheiros gerados:
 - `HelloLexer.java`: código Java com a análise léxica (gera *tokens* para a análise sintáctica)
 - `Hello.tokens` e `HelloLexer.tokens`: ficheiros com a identificação de *tokens* (pouco importante nesta fase, mas serve para modularizar diferentes analisadores léxicos e/ou separar a análise léxica da análise sintáctica)
 - `HelloParser.java`: código Java com a análise sintáctica (gera a árvore sintáctica do programa)
 - `HelloListener.java` e `HelloBaseListener.java`: código Java que implementa automaticamente um padrão de execução de código tipo *listener* (*callbacks*) em todos os pontos de entrada e saída de todas as regras sintácticas do compilador.
- Podemos executar o ANTLR4 com a opção `-visitor` para gerar também código Java para o padrão tipo *visitor* (difere do *listener* porque a visita tem de ser explicitamente requerida).
 - `HelloVisitor.java` e `HelloBaseVisitor.java`: código Java que implementa automaticamente um padrão de execução de código tipo *visitor* todos os pontos de entrada e saída de todas as regras sintácticas do compilador.

2.2 Expr

ANTLR4: Expr

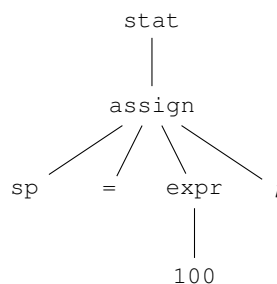
- Exemplo:

```
grammar Expr;
stat: assign ;
assign: ID '=' expr ';' ;
expr: INT ;
ID : [a-z]+ ;
INT : [0-9]+ ;
WS : [ \t\r\n]+ -> skip ;
```

- Se executarmos o compilador criado com a entrada:

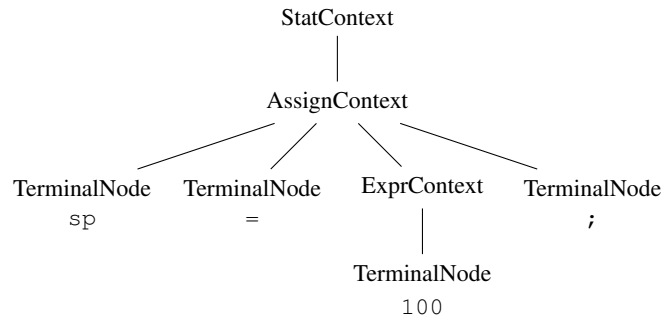
```
sp = 100;
```

- Vamos obter a seguinte árvore sintáctica:



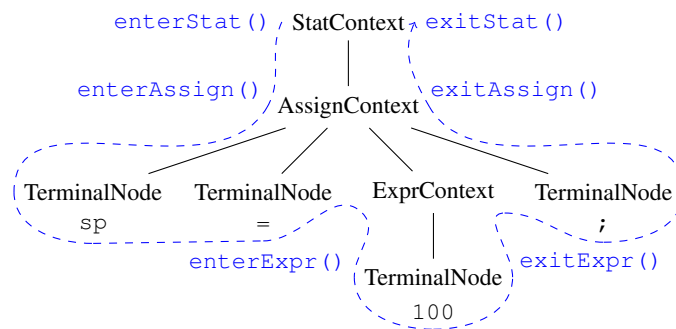
ANTLR4: contexto automático

- Para facilitar a análise semântica e a síntese, o ANTLR4 tenta ajudar na resolução automática de muitos problemas (como é o caso dos *listeners* e dos *visitors*)
- No mesmo sentido são geradas classes (e em execução os respectivos objectos) com o contexto de todas as regras da gramática:

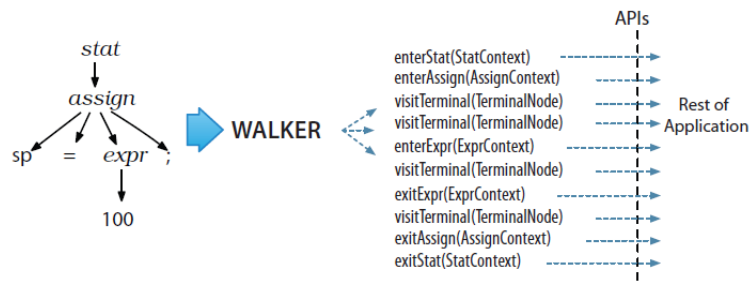


ANTLR4: *listener*

- Os objectos de contexto têm a si associada toda a informação relevante da análise sintáctica (*tokens*, referência aos nós filhos da árvore, etc.)
- Por exemplo o contexto `AssignContext` contém métodos `ID` e `expr` para aceder aos respectivos nós.
- O código gerado automaticamente do tipo *listener* tem o seguinte padrão de invocação:



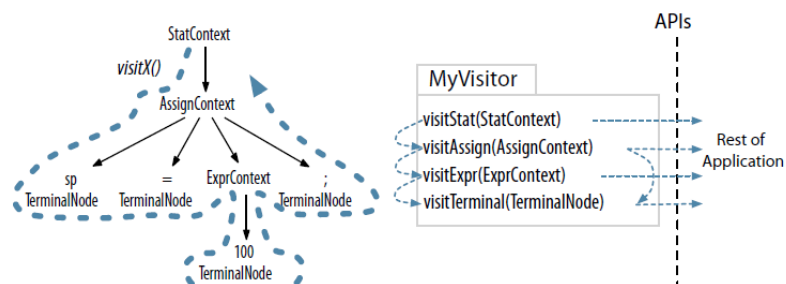
- A sua ligação à restante aplicação é a seguinte:



- (Já iremos ver como é que programaticamente se utiliza este código)

ANTLR4: *visitor*

- No caso do código gerado automaticamente do tipo *visitor* o padrão de invocação é ilustrado a seguir:



ANTLR4: atributos e acções

- É possível associar *atributos* e *acções* às regras:

```
grammar ExprAttr;
stat: assign ;
assign: ID '=' e=expr ';' ;
    {System.out.println($ID.text+" = "+$e.v);} ;
expr returns[int v]: INT
    {$v = Integer.parseInt($INT.text);} ;
ID : [a-z]+ ;
INT : [0-9]+ ;
WS : [ \t\r\n]+ -> skip ;
```

- Também podemos passar atributos para a regra (tipo passagem de argumentos para um método):

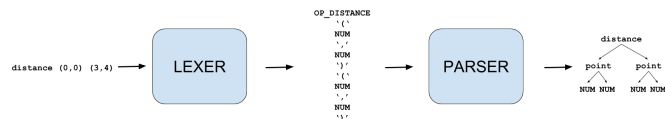
```
assign: ID '=' e=expr[true] ';' ;
    {System.out.println($ID.text+" = "+$e.v);} ;
expr[boolean inAssign] returns[int v]: INT {
    if ($inAssign)
        System.out.println("Wow! Used in an assignment!");
    $v = Integer.parseInt($INT.text);
} ;
```

- É clara a semelhança com a passagem de argumentos e resultados de métodos.
- Diz que os atributos são *sintetizados* quando a informação provém de sub-regras, e *herdados* quando se envia informação para sub-regras.

3 Exemplo figuras

- Recuperando o exemplo das figuras.
- Gramática inicial para figuras:

```
grammar Shapes;
// parser rules:
distance: 'distance' point point;
point: '(' x=NUM ',' y=NUM ')';
// lexer rules:
NUM: [0-9]+;
WS: [ \t\n\r]+ -> skip;
```



Integração num programa

```
import org.antlr.v4.runtime.*;
import org.antlr.v4.runtime.tree.*;

public class ShapesMain {
    public static void main(String[] args) throws Exception {
        // create a CharStream that reads from standard input:
        CharStream input = CharStreams.fromStream(System.in);
        // create a lexer that feeds off of input CharStream:
        ShapesLexer lexer = new ShapesLexer(input);
        // create a buffer of tokens pulled from the lexer:
        CommonTokenStream tokens = new CommonTokenStream(lexer);
        // create a parser that feeds off the tokens buffer:
        ShapesParser parser = new ShapesParser(tokens);
        // replace error listener:
        //parser.removeErrorListeners(); // remove ConsoleErrorListener
        //parser.addErrorListener(new ErrorHandlingListener());
        // begin parsing at distance rule:
        ParseTree tree = parser.distance();
        if (parser.getNumberOfSyntaxErrors() == 0) {
            // print LISP-style tree:
            // System.out.println(tree.toStringTree(parser));
        }
    }
}
```

```

    }
}

```

- O comando `antlr4-main` gera automaticamente esta classe com uma primeira implementação do método `main`.

3.1 Exemplo *listener*

```

import static java.lang.System.*;

import org.antlr.v4.runtime.ParserRuleContext;
import org.antlr.v4.runtime.tree.ErrorNode;
import org.antlr.v4.runtime.tree.TerminalNode;

public class ShapesMyListener extends ShapesBaseListener {
    @Override
    public void enterPoint(ShapesParser.PointContext ctx) {
        int x = Integer.parseInt(ctx.x.getText());
        int y = Integer.parseInt(ctx.y.getText());
        out.println("enterPoint x="+x+",y="+y);
    }

    @Override
    public void exitPoint(ShapesParser.PointContext ctx) {
        int x = Integer.parseInt(ctx.x.getText());
        int y = Integer.parseInt(ctx.y.getText());
        out.println("exitPoint x="+x+",y="+y);
    }
}

```

- Para utilizar esta classe:

```

public static void main(String[] args) throws Exception {
    ...

    // listener:
    ParseTreeWalker walker = new ParseTreeWalker();
    ShapesMyListener listener = new ShapesMyListener();
    walker.walk(listener, tree);
}

```

- O comando `antlr4-main` permite a geração automática deste código no método `main`.
`antlr4-main <Grammar> <start-rule> -l <nome-da-classe-ou-ficheiro-listener> ...`

3.2 Exemplo *visitor*

```

import org.antlr.v4.runtime.tree.AbstractParseTreeVisitor;

public class ShapesMyVisitor extends ShapesBaseVisitor<Object> {
    @Override
    public Object visitDistance(ShapesParser.DistanceContext ctx) {
        double res;
        double[] p1 = (double[]) visit(ctx.point(0));
        double[] p2 = (double[]) visit(ctx.point(1));
        res = Math.sqrt(Math.pow(p1[0]-p2[0],2)+Math.pow(p1[1]-p2[1],2));
        System.out.println("visitDistance: "+res);
        return res;
    }

    @Override
    public Object visitPoint(ShapesParser.PointContext ctx) {
        double[] res = new double[2];
        res[0] = Double.parseDouble(ctx.x.getText());
        res[1] = Double.parseDouble(ctx.y.getText());

        return (Object)res;
    }
}

```

- Para utilizar esta classe:


```

public static void main(String[] args) throws Exception {
    ...
    // visitor:
    ShapesMyVisitor visitor = new ShapesMyVisitor();
    System.out.println("distance: "+visitor.visit(tree));
}

```

- O comando `antlr4-main` permite a geração automática deste código no método `main`.
`antlr4-main <Grammar> <start-rule> -v <nome-da-classe-ou-ficheiro-visitor> ...`
- Note que podemos criar o método `main` com os *listeners* e *visitors* que quisermos (a ordem especificada nos argumentos do comando é mantida).

4 Construção de gramáticas

- A construção de gramáticas pode ser considerada uma forma de *programação simbólica*, em que existem símbolos que são equivalentes a sequências (que façam sentido) de outros símbolos (ou mesmo dos próprios).
- Os símbolos utilizados dividem-se em *símbolos terminais e não terminais*.
- Os símbolos terminais (ou *tokens*) são predefinidos, ou definidos fora da gramática; e os símbolos não terminais são definidos por produções (regras) da gramática (sendo estas transformações equivalentes de uma sequência de símbolos noutra sequência).
- No fim, todos os símbolos não terminais, com mais ou menos transformações, devem poder ser expressos em símbolos terminais.
- Uma gramática é construída especificando as *regras* ou produções dos elementos gramaticais.

```

grammar SetLang;
stat: set set;
set: '{' elem* '}' ;
elem: ID | NUM;
ID: [a-z]+;
NUM: [0-9]+;

```

- Sendo a sua construção uma forma de programação beneficia da identificação e reutilização de padrões comuns de resolução de problemas.
- Surpreendentemente, o número de padrões base é relativamente baixo:
 1. *Sequência*: sequência de elementos;
 2. *Optativo*: aplicação optativa do elemento (zero ou uma ocorrência);
 3. *Repetitivo*: aplicação repetida do elemento (zero ou mais, uma ou mais);
 4. *Alternativa*: escolha entre diferentes alternativas (como por exemplo, diferentes tipos de instruções);
 5. *Recursão*: definição directa ou indirectamente recursiva de um elemento (por exemplo, instrução condicional é uma instrução que selecciona para execução outras instruções);
- É de notar que a recursão e a iteração são alternativas entre si. Admitindo a existência da sequência vazia, os padrões optativo e repetitivo são implementáveis com recursão.
- No entanto, como em programação em geral, por vezes é mais adequado expressar recursão, e outras iteração.

- Considere o seguinte programa em Java:

```

import static java.lang.System.*;
public class PrimeList {
    public static void main(String[] args) {
        if (args.length != 1) {
            out.println("Usage: PrimeList -ea <n>");
            exit(1);
        }
        int n = 0;
    }
}

```

```

    try {
        n = Integer.parseInt(args[0]);
    }
    catch (NumberFormatException e) {
        out.println("ERROR: invalid argument \""+args[0]+"\"");
        exit(1);
    }
    for(int i = 2; i <= n; i++)
        if(isPrime(i))
            out.println(i);
}

public static boolean isPrime(int n) {
    assert n > 1; // precondition

    boolean result = (n == 2 || n % 2 != 0);
    for(int i = 3; result && (i*i <= n); i+=2)
        result = (n % i != 0);
    return result;
}
}

```

- Mesmo na ausência de uma gramática definida explicitamente, podemos neste programa inferir todos os padrões atrás referidos:
 1. *Sequência*: a instrução atribuição de valor é definida como sendo um identificador, seguido do carácter =, seguido de uma expressão.
 2. *Optativo*: a instrução condicional pode ter, ou não, a selecção de código para a condição falsa.
 3. *Repetitivo*: (1) uma classe é uma sequência de membros; (2) um algoritmo é uma sequência de comandos.
 4. *Alternativa*: diferentes instruções podem ser utilizadas onde uma instrução é esperada.
 5. *Recursão*: a instrução composta é definida como sendo uma sequência de instruções delimitada por chavetas; qualquer uma dessas instruções pode ser também uma instrução composta.

4.1 Especificação de gramáticas

- Uma linguagem para especificação de gramáticas precisa de suportar este conjunto de padrões.
- Para especificar elementos léxicos (*tokens*) a notação utilizada assenta em *expressões regulares*.
- A notação tradicionalmente utilizada para a análise sintáctica denomina-se por BNF (*Backus-Naur Form*).
- Esta última notação teve origem na construção da linguagem Algol (1960).
- O ANTLR4 utiliza uma variação alterada e aumentada (EBNF) desta notação onde se pode definir construções opcionais e repetitivas.

```
<symbol> ::= <meaning>
```

```
<symbol> : <meaning> ;
```

5 Estrutura sintáctica

- As gramáticas em ANTLR4 têm a seguinte estrutura sintáctica:

```

grammar Name;           // mandatory
options { ... }         // optional
import ... ;           // optional
tokens { ... }          // optional
@actionName { ... }     // optional
rule1 : ... ;           // parser and lexer rules
...

```

- As regras léxicas e sintácticas pode aparecer misturadas e distinguem-se por a primeira letra do nome da regra ser minúscula (analizador sintáctico), ou maiúscula (analizador léxico).

- A ordem pela qual as regras léxicas são definidas é muito importante. Excepto no caso indicado a seguir, na presença duma ambiguidade, a primeira definição é a que conta.
- A excepção são os *tokens* literais definidos em regras sintácticas que têm precedência sobre os *tokens* definidos explicitamente por regras léxicas.

- É possível separar as gramáticas sintácticas das léxicas precedendo a palavra reservada `grammar` com as palavras reservadas `parser` ou `lexer`.

```
parser grammar NameParser;
...
```

```
lexer grammar NameLexer;
...
```

- A secção das *opções* permite definir algumas opções para os analisadores (e.g. origem dos *tokens*, e a linguagem de programação de destino).

```
options { tokenVocab=NameLexer; }
```

- Qualquer opção pode ser redefinida por argumentos na invocação do ANTLR4.
- A secção de `import` relaciona-se com herança de gramáticas (que veremos mais à frente).

5.1 Secção de *tokens*

- A secção de *tokens* permite associar identificadores a *tokens*.
- Esses identificadores devem depois ser associados a regras léxicas, que podem estar na mesma gramática, noutra gramática, ou mesmo ser directamente programados.

```
tokens { «Token1», ..., «TokenN» }
```

- Por exemplo: `tokens { BEGIN, END, IF, ELSE, WHILE, DO }`
- Note que não é necessário ter esta secção quando os tokens tem origem numa gramática lexical antlr4 (basta a secção `options` com a variável `tokenVocab` correctamente definida).

5.2 Acções no preâmbulo da gramática

- Esta secção permite a definição de *acções* no preâmbulo da gramática (como já vimos, também podem existir acções noutras zonas da gramática).
- Actualmente só existem dois acções possíveis nesta zona (com o Java como linguagem destino): `header` e `members`

```
grammar Count;
@header {
package foo;
}
@members {
int count = 0;
}
```

- A primeira injecta código no início de ficheiros, e a segunda permite que se acrescentem membros às classes do analisador sintáctico e/ou léxico.
- Eventualmente podemos restringir estas acções ou ao analisador sintáctico (`@parser::header`) ou ao analisador léxico (`@lexer::members`)

6 Estrutura léxica

6.1 Comentários

- A estrutura léxica do ANTLR4 deverá ser familiar para a maioria dos programadores já que se aproxima da sintaxe das linguagens da família do C (C++, Java, etc.).
- Os comentários são em tudo semelhantes aos do Java permitindo a definição de comentários de linha, multilinha, ou tipo `JavaDoc`.

```

/**
 * Javadoc alike comment!
 */
grammar Name;
/*
multiline comment
*/

/** parser rule for an identifier */
id: ID ; // match a variable name

```

6.2 Identificadores

- O primeiro carácter dos identificadores tem de ser uma letra, seguida por outras letras dígitos ou o carácter `_`
- Se a primeira letra do identificador é minúscula é uma regra sintáctica, se, por outro lado, for maiúscula estamos na presença duma regra léxica.

```

ID, LPAREN, RIGHT_CURLY, Other // lexer token names
expr, conditionalInstruction // parser rule names

```

- Como em Java, podem ser utilizados caracteres Unicode.

6.3 Literais

- Em ANTLR4 não há distinção entre literais do tipo carácter e do tipo *string*.
- Todos os literais são delimitador por aspas simples.
- Exemplos: `'if'`, `'>='`, `'assert'`
- Como em Java, os literais podem conter sequências de escape tipo Unicode (`'\u3001'`), assim como as sequências de escape habituais (`'\r\t\n'`)

6.4 Palavras reservadas

- O ANTLR4 tem a seguinte lista de palavras reservadas (i.e. que não podem ser utilizadas como identificadores):

```

import, fragment, lexer,
parser, grammar, returns,
locals, throws, catch,
finally, mode, options,
tokens, skip

```

- Mesmo não sendo uma palavra reservada, não se pode utilizar a palavra `rule` já que esse nome entra em conflito com os nomes gerados no código.

6.5 Acções

- As acções são blocos de código escritos na linguagem destino (Java por omissão).
- As acções podem ter múltiplas localizações dentro da gramática, mas a sintaxe é sempre a mesma: texto arbitrário delimitado por chavetas: `{ ... }`
- Se por caso existirem *strings* ou comentários (ambos tipo C/Java) contendo chavetas não há necessidade de incluir um carácter de escape (`{ ... " " . / * } * / ... }`).
- O mesmo acontece se as chavetas foram balanceadas (`{ { ... } } ... }`).
- Caso contrário, tem de se utilizar o carácter de escape (`{ \ { } , \ } }`).
- O texto incluído dentro das acções tem de estar conforme com a linguagem destino.
- As acções podem aparecer nas regras léxicas, nas regras sintácticas, na especificação de excepções da gramática, nas secções de atributos (resultado, argumento e variáveis locais), em certas secções do cabeçalho da gramática e em algumas opções de regras (predicados semânticos).
- Pode considerar-se que cada acção será executada no contexto onde aparece (por exemplo, no fim do reconhecimento duma regra).

```

grammar Expr;
stat: assign ;
assign: ID '=' e=expr[true] ';' ;
    {System.out.println($ID.text+" = "+$e.v);} ;
expr[boolean inAssign] returns [int v]: INT {
    if ($inAssign)
        System.out.println("Used inside an assign!");
    $v = Integer.parseInt($INT.text);
} ;
ID : [a-z]+ ;
INT : [0-9]+ ;
WS : [ \t\r\n]+ -> skip ;

```

7 Regras léxicas

- A gramática léxica é composta por regras, que podem ser separadas em diferentes analisadores léxicos e compostas por diferentes modos (com regras léxicas distintas).
- As regras léxicas têm de começar por uma letra maiúscula, e podem ser visíveis apenas no analisador léxico:

```

INT: DIGIT+ ; // visible in both parser and lexer
fragment DIGIT: [0-9]; // visible only in lexer

```

- A especificação destas regras utiliza *expressões regulares*.

Expressões regulares em ANTLR4

<i>Syntax</i>	<i>Description</i>
<i>R</i> : ... ;	Define lexer rule <i>R</i>
<i>X</i>	Match lexer rule element <i>X</i>
'literal'	Match literal text
[char-set]	Match one of the chars in char-set
'x'..'y'	Match one of the chars in the interval
<i>XY ... Z</i>	Match a sequence of rule lexer elements
(...)	Lexer subrule
<i>X</i> ?	Match rule element <i>X</i>
<i>X</i> *	Match rule element <i>X</i> zero or more times
<i>X</i> +	Match rule element <i>X</i> one or more times
~ <i>x</i>	Match one of the chars NOT in the set defined by <i>x</i>
.	Match any char
<i>X</i> *? <i>Y</i>	Match <i>X</i> until <i>Y</i> appears (non-greedy match)
{...}	Lexer action
{ <i>p</i> }?	Evaluate semantic predicate <i>p</i> (if false, the rule is ignored)
<i>x</i> ... <i>z</i>	Multiple alternatives

7.1 Padrões léxicos típicos

Token category	Possible implementation
Identifiers	<pre>ID: LETTER (LETTER DIGIT)*; fragment LETTER: 'a'..'z' 'A'..'Z' '_' ; fragment DIGIT: '0'..'9' ;</pre>
Numbers	<pre>INT: DIGIT+; FLOAT: DIGIT+ '.' DIGIT+ '.' DIGIT+;</pre>
Strings	<pre>STRING: '"' (ESC .) *? '"'; fragment ESC: '\\"' '\\\\' ;</pre>
Comments	<pre>LINE_COMMENT: '//' . *? '\n' -> skip; COMMENT: '/*' . *? '*/' -> skip;</pre>
Whitespace	<pre>WS: [\t\n\r]+ -> skip;</pre>

8 Operador léxico “não ganancioso”

- Por omissão, a análise léxica é “gananciosa”.
- Isto é, os *tokens* são gerados com o maior tamanho possível.
- Esta particularidade é em geral a desejada, mas pode trazer problemas em alguns casos.
- Por exemplo, se quisermos reconhecer um *string*:

```
STRING: '"' .* '"';
```
- (No analisador léxico o ponto (.) reconhece qualquer carácter excepto o EOF.)
- Esta regra não funciona, porque o analisador léxico vai reconhecer todos os caracteres como pertencendo ao STRING até ao EOF
- Este problema resolve-se com o operador *non-greedy*:

```
STRING: '"' .*? '"'; // match all chars until a " appears!
```

9 Regras sintáticas

Construção de regras: síntese

Syntax	Description
$r : \dots;$	Define rule r
x	Match rule element x
$xy \dots z$	Match a sequence of rule elements
(\dots)	Subrule
$x?$	Match rule element x
x^*	Match rule element x zero or more times
x^+	Match rule element x one or more times
$x \dots z$	Multiple alternatives

A rule element is a token (lexical, or terminal rule), a syntactical rule (non-terminal), or a subrule.

Regras sintáticas: movendo informação

- Como já foi referido em ANTLR4 cada regras sintáctica é traduzida num método na linguagem destino (Java por omissão).

- Assim sendo é natural poder-se fazer uso dos mecanismos de comunicação entre métodos: *argumentos* e *resultado*, assim como poder-se definir *variáveis locais* à regra.
- Podemos também anotar regras com um nome alternativo:

```
expr: e1=expr '+' e2=expr
    | INT;
```

- Podemos também dar nomes alternativos a diferentes alternativas duma regra:

```
expr: expr '*' e2=expr # Mult
    | expr '+' e2=expr # Add
    | INT;              # Int
```

- O ANTLR4 irá gerar informação de contexto para cada nome (incluindo métodos para usar no *listener* e/ou nos *visitors*).

```
grammar Info;

@header {
import static java.lang.System.*;
}

main: seq1=seq[true] seq2=seq[false] {
    out.println("average(seq1): "+$seq1.average);
    out.println("average(seq2): "+$seq2.average);
}
;

seq[boolean crash] returns[double average=0]
locals[int sum=0, int count=0]:
'(' ( INT {$sum+=$INT.int;$count++;} )* ')' {
    if ($count > 0)
        $average = (double)$sum/$count;
    else if ($crash) {
        err.println("ERROR: divide by zero!");
        exit(1);
    }
}
;

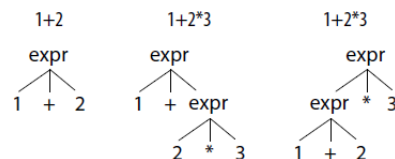
INT: [0-9]+;
WS: [ \t\n\r]+ -> skip;
```

9.1 Padrões sintáticos típicos

Pattern name	Possible implementation
Sequence	<pre>x y ... z '[' INT+ ']' '[' INT* ']'</pre>
Sequence with terminator	<pre>(instruction ';') * // program sequence (row '\n') * // lines of data</pre>
Sequence with separator	<pre>expr (',' expr) * // function call arguments (expr (',' expr) *) ? // optional arguments</pre>
Choice	<pre>type: 'int' 'float'; instruction: conditional loop ... ;</pre>
Token dependence	<pre>'(' expr ')' // nested expression ID '[' expr ']' // array index '{' instruction+ '}' // compound instruction '<' ID (',' ID) * '>' // generic type specifier</pre>
Nesting	<pre>expr: '(' expr ')' ID; classDef: 'class' ID '{' (classDef method field) * '}' ;</pre>

9.2 Precedência

- Por vezes, formalmente, a interpretação da ordem de aplicação de operadores pode ser subjectiva:



- Em ANTLR4 esta ambiguidade é resolvida dando primazia às sub-regras declaradas primeiro:

```
expr: expr '*' expr // higher priority
    | expr '+' expr
    | INT // lower priority
    ;
```

9.3 Associatividade

- Por omissão, a associatividade na aplicação do (mesmo) operador é feita da esquerda para a direita:
 $a + b + c = ((a + b) + c)$
- No entanto, há operadores, como é o caso da potência, que podem requerer a associatividade inversa:
 $a \uparrow b \uparrow c = a^{b^c} = a^{(b^c)}$
- Este problema é resolvido em ANTLR4 de seguinte forma:

```
expr: <assoc=right> expr '^' expr
    | expr '*' expr // higher priority
    | expr '+' expr
    | INT // lower priority
    ;
```

9.4 Herança de gramáticas

- A secção de *import* implementa um mecanismo de herança entre gramáticas.

- Por exemplo as gramáticas:

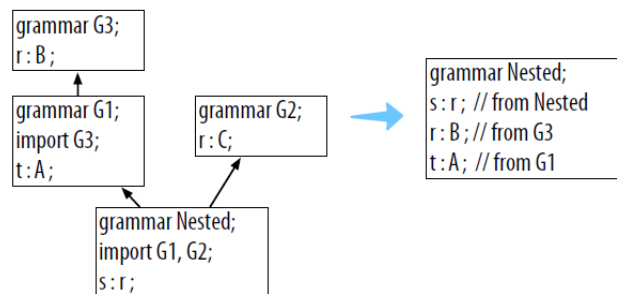
```
grammar ELang;
stat : (expr ';'*) EOF ;
expr : INT ;
INT : [0-9]+ ;
WS : [ \r\t\n]+ -> skip ;
```

```
grammar MyELang;
import ELang;
expr : INT | ID ;
ID : [a-z]+ ;
```

- Geram a gramática MyELang equivalente:

```
grammar MyELang;
stat : (expr ';'*) EOF ;
expr : INT | ID ;
ID : [a-z]+ ;
INT : [0-9]+ ;
WS : [ \r\t\n]+ -> skip ;
```

- Isto é, as regras são herdadas, excepto quando são redefinidas na gramática descendente.
- Este mecanismo permite herança múltipla:



- Note-se a importância na ordem dos `imports` na gramática Nested.
- A regra `r` vem da gramática G3 e não da gramática G2.

10 Mais sobre acções

- Já vimos que é possível acrescentar directamente na gramática acções (expressas na linguagem destino) que são executadas durante a fase de análise sintáctica (na ordem expressa na gramática).
- Podemos também associar a cada regra dois blocos especiais de código – `@init` e `@after` – cuja execução, respectivamente, precede ou sucede ao reconhecimento da regra.
- O bloco `@init` pode ser útil, por exemplo, para inicializar variáveis.
- O bloco `@after` é uma alternativa a colocar a acção no fim da regra.
- Exemplo: gramática para ficheiros tipo `csv` com os seguintes requisitos:
 1. A primeira linha indica o nome dos campos (deve ser escrita sem nenhuma formatação especial);
 2. Em todas as linhas que não a primeira associar o valor ao nome do campo (devem ser escritas com a associação explícita, tipo atribuição de valor com `field = value`).

Exemplo

```
grammar CSV;

file: line line* EOF;

line: field (SEP field)* '\r'? '\n';

field: TEXT | STRING | ;

SEP: ','; // (',' | '\t')*
STRING: [ \t]* '"' .*? '"' [ \t]*;
TEXT: ~[, "\r\n]~[, \r\n]*;
```

Exemplo

```
grammar CSV;
@header {
import static java.lang.System.*;
}
@parser::members {
    protected String[] names = new String[0];
    public int dimNames() { ... }
    public void addName(String name) { ... }
    public String getName(int idx) { ... }
}

file: line[true] line[false]* EOF;

line[boolean firstLine]
    locals[ int col = 0 ]
    @after { if (!firstLine) out.println(); }
    : field[$firstLine,$col++] (SEP field[$firstLine,$col++])* '\r'? '\n';

field[boolean firstLine, int col]
    returns[ String res = "" ]
    @after {
        if ($firstLine)
            addName($res);
        else if ($col >= 0 && $col < dimNames())
            out.print(" " + getName($col) + ": " + $res);
        else
            err.println("\nERROR: invalid field \"" + $res + "\" in column " + ($col+1));
    }
    :
    (TEXT {$res = $TEXT.text.trim();}) |
    (STRING {$res = $STRING.text.trim();}) |
    ;

SEP: ','; // (',' | '\t')*
STRING: [ \t]* '"' .*? '"' [ \t]*;
TEXT: ~[, "\r\n"] ~[, "\r\n"]*;
```

11 Gramáticas ambíguas

- A definição de gramáticas presta-se, com alguma facilidade, a gerar ambiguidades.
- Esta característica nas linguagens humanas é por vezes procurada (onde estaria a literatura e a poesia se não fosse assim), mas geralmente é um problema.

“Para o meu orientador, para quem nenhum agradecimento é demasiado.”

“O professor falou aos alunos de engenharia”

“*What rimes with orange? ... No it doesn't!*”

- No caso das linguagens de programação, em que os efeitos são para ser interpretados e executados por máquinas (e não por nós), não há espaço para ambiguidades.
- Assim, seja por construção da gramática, seja por regras de prioridade que lhe sejam aplicadas por omissão, as gramáticas não podem ser ambíguas.
- Em ANTLR4 a definição e construção de regras define prioridades.

Gramáticas ambíguas: analisador léxico

- Se as gramáticas léxicas fossem apenas definidas por expressões regulares que competem entre si para consumir os caracteres de entrada, então elas seriam naturalmente ambíguas.

```
...
conditional: 'if' '(' expr ')' 'then' stat; // incomplete
ID: [a-zA-Z]+;
...
```

- Neste caso a sequência de caracteres `if` tanto pode dar um identificador como uma palavra reservada.

- O ANTLR4 utiliza duas regras fora das expressões regulares para lidar com ambiguidade:
 1. Por omissão, escolhe o *token* que consome o máximo número de caracteres da entrada;
 2. Dá prioridade aos *tokens* definidos primeiro (sendo que os definidos implicitamente na gramática sintáctica têm precedência sobre todos os outros).

Gramáticas ambíguas: analisador sintáctico

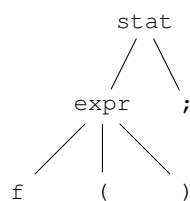
- Os dois excertos seguintes exemplificam gramáticas ambíguas:

```
stat: ID '=' expr
    | ID '=' expr
    ;
expr: NUM
    ;
```

```
stat: expr ';'
    | ID '(' ')' ';'
    ;
expr: ID '(' ')'
    | NUM
    ;
```

- Em ambos os casos a ambiguidade resulta de ser ter uma sub-regra repetida, directamente, no primeiro caso, e indirectamente, no segundo caso.
- A gramática diz-se ambígua porque, para a mesma entrada, poderíamos ter duas árvores sintácticas diferentes.

Expressão `f () ;`



Instrução `f () ;`



- Outros exemplos de ambiguidade são os da precedência e associatividade de operadores (secções 9.2 e 9.3).
- O ANTLR4 tem regras adicionais para eliminar ambiguidades sintácticas.
- Tal como no analisador léxico, regras *Ad hoc* fora da notação das gramáticas independentes de contexto, garantem a não ambiguidade.
- Essas regras são as seguintes:
 1. As alternativas, directa ou indirectamente, definidas primeiro têm precedência sobre as restantes.
 2. Por omissão, a associatividade de operadores é à esquerda.
- Das duas árvores sintácticas apresentadas no exemplo anterior, a gramática definida impõe a primeira alternativa.
- A linguagem C tem ainda outro exemplo prático de ambiguidade.
- A expressão `i*j` tanto pode ser uma multiplicação de duas variáveis, como a declaração de uma variável `j` como ponteiro para o tipo de dados `i`.
- Estes dois significados tão diferentes podem também ser resolvidos em gramáticas ANTLR4 com os chamados *predicados semânticos*.

12 Predicados semânticos

- Em ANTLR4 é possível utilizar informação semântica (expressa na linguagem destino e injetada na gramática), para orientar o analisador sintáctico.

- Essa funcionalidade chama-se *predicados semânticos*: { . . . } ?
- Os predicados semânticos permitem seletivamente activar/desactivar porções das regras gramaticais durante a própria análise sintáctica.
- Vamos, como exemplo, desenvolver uma gramática para analisar sequências de números inteiros, mas em que o primeiro número não pertence à sequência, mas indica sim a dimensão da sequência:
- Assim a lista 2 4 1 3 5 6 7 indicaria duas sequências: (4, 1) (5, 6, 7)

Exemplo

```
grammar Seq;

all: sequence* EOF;

sequence: INT numbers;

numbers: INT+;

INT: [0-9]+;
WS: [ \t\r\n]+ -> skip;
```

Exemplo

```
grammar Seq;

all: sequence* EOF;

sequence
    @init {
        System.out.print("(");
    }
    @after {
        System.out.println(")");
    }
    : INT numbers[$INT.int];

numbers[int count]
    locals [int c = 0]
    : ( { $c < $count } ? INT
        { $c++; System.out.print(($c == 1 ? "" : " ") + $INT.text); }
        )+ ;

INT: [0-9]+;
WS: [ \t\r\n]+ -> skip;
```

13 Separar analisador léxico do analisador sintáctico

- Muito embora se possa definir a gramática completa, juntando a análise léxica e a sintáctica no mesmo módulo, podemos também separar cada uma dessas gramáticas.
- Isso facilita, por exemplo, a reutilização de analisadores léxicos.
- Existem também algumas funcionalidades do analisador léxico, que obrigam a essa separação (“ilhas” lexicais).
- Para que a separação seja bem sucedida há um conjunto de regras que devem ser seguidas:
 1. Cada gramática indica o seu tipo no cabeçalho:
 2. Os nomes das gramáticas devem (respectivamente) terminar em `Lexer` e `Parser`
 3. Todos os *tokens* implicitamente definidos no analisador sintáctico têm de passar para o analisador léxico (associando-lhes um identificador para uso no *parser*).
 4. A gramática do analisador léxico deve ser compilada pelo ANTLR4 antes da gramática sintáctica.
 5. A gramática sintáctica tem de incluir uma opção (`tokenVocab`) a indicar o analisador léxico.

```
lexer grammar NAMELexer;
...

parser grammar NAMEParser;
options {
    tokenVocab=NAMELexer;
}
...
```

- No teste da gramática deve utilizar-se o nome sem o sufixo:

```
antlr4 -test NAME rule
```

Exemplo

```
lexer grammar CSVLexer;

COMMA: ',';
EOL: '\r'? '\n';
STRING: '"' ( '"' | ~'"' )* '"';
TEXT: ~[, "\r\n"] ~[, "\r\n"]*;

parser grammar CSVParser;

options {
    tokenVocab=CSVLexer;
}

file: firstRow row* EOF;

firstRow: row;

row: field (COMMA field)* EOL;

field: TEXT | STRING | ;

antlr4 CSVLexer.g4
antlr4 CSVParser.g4
antlr4 -javac CSV.java
// ou apenas: antlr4 -build
antlr4 -test CSV file
```

14 “Ilhas” lexicais

- Outra característica do ANTLR4 é a possibilidade de reconhecer um conjunto diferente de *tokens* consoante determinados critérios.
- Para esse fim existem os chamados *modos* lexicais.
- Por exemplo, em XML, o tratamento léxico do texto deve ser diferente consoante se está dentro duma “marca” (*tag*) ou fora.
- Uma restrição desta funcionalidade é o facto de só se poderem utilizar modos lexicais em gramáticas léxicas.
- Ou seja, torna-se obrigatória a separação entre os dois tipos de gramáticas.
- Existem assim os comandos: `mode (NAME)`, `pushMode (NAME)`, `popMode`
- O modo lexical por omissão é designado por: `DEFAULT_MODE`

Exemplo

```
lexer grammar ModesLexer;

// default mode

ACTION_START: '{' -> mode(INSIDE_ACTION);
OUTSIDE_TOKEN: ~'{'+;

mode INSIDE_ACTION;
ACTION_END: '}' -> mode(DEFAULT_MODE);
INSIDE_TOKEN: ~'}'+;
```

```

parser grammar ModesParser;

options {
    tokenVocab=ModesLexer;
}

all: ( ACTION_START | OUTSIDE_TOKEN | ACTION_END |
      INSIDE_TOKEN)* EOF;

lexer grammar ModesLexer;

// default mode

ACTION_START: '{' -> pushMode(INSIDE_ACTION);
OUTSIDE_TOKEN: ~'{' +;

mode INSIDE_ACTION;
ACTION_END: '}' -> popMode;
INSIDE_ACTION_START: '{' -> pushMode(INSIDE_ACTION);
INSIDE_TOKEN: ~[{}]+;

parser grammar ModesParser;

options {
    tokenVocab=ModesLexer;
}

all: ( ACTION_START | OUTSIDE_TOKEN | ACTION_END |
      INSIDE_ACTION_START | INSIDE_TOKEN)* EOF;

```

15 Enviar *tokens* para canais diferentes

- Nos exemplos de gramáticas que temos vindo a apresentar, tem-se optado pela acção `skip` quando na presença dos chamados espaços em branco ou de comentários.
- Esta acção faz desaparecer esses *tokens* simplificando a análise sintáctica.
- O preço a pagar (geralmente irrelevante) é perder o texto completo que lhes está associado.
- No entanto, em ANTLR4 é possível ter dois em um. Isto é, retirar *tokens* da análise sintáctica, sem no entanto fazer desaparecer completamente esses *tokens* (podendo-se recuperar o texto que lhe está associado).
- Esse é o papel dos chamados *canais léxicos*.

```

WS: [ \t\n\r ]+ -> skip; // make token disappear
COMMENT: '/*' .*? '*/' -> skip; // make token disappear

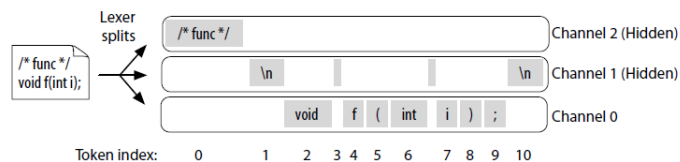
```

```

WS: [ \t\n\r ]+ -> channel(1); // redirect to channel 1
COMMENT: '/*' .*? '*/' -> channel(2); // redirect to channel 2

```

- A classe `CommonTokenStream` encarrega-se de juntar os tokens de todos os canais (o visível – canal zero – e os escondidos).



- (É possível ter código para aceder aos *tokens* de um canal em particular.)

Exemplo: declaração de função

```

grammar Func;

```

```

func: type=ID function=ID '(' varDecl* ')' ';' ;
varDecl: type=ID variable=ID;

```

```

ID: [a-zA-Z_]+;

```

```

WS: [ \t\r\n ]+ -> channel(1);

```

```

COMMENT: '/*' .*? '*/' -> channel(2);

```

16 Reescrever a entrada

- O ANTLR4 facilita a geração de código que resulte de uma reescrita do código de entrada. Isto é, inserir, apagar, e/ou modificar partes desse código.
- Para esse fim existe a classe `TokenStreamRewriter` (que têm métodos para inserir texto antes ou depois de *tokens*, ou para apagar ou substituir texto).
- Vamos supor que se pretende fazer algumas alterações de código fonte Java, por exemplo, acrescentar um comentário imediatamente antes da declaração de uma classe..
- Podemos ir buscar a gramática disponível para a versão 8 do Java: `Java8.g4`
(procurar em: <https://github.com/antlr/grammars-v4>)
- Para que a reescrita apenas acrescente o comentário, é necessário substituir o `skip` dos *tokens* que estão a ser desprezados, redireccionando-os para um canal escondido.
- Agora podemos criar um *listener* para resolver este problema.

Exemplo

```
import org.antlr.v4.runtime.*;

public class AddClassCommentListener extends Java8BaseListener {

    protected TokenStreamRewriter rewriter;

    public AddClassCommentListener(TokenStream tokens) {
        rewriter = new TokenStreamRewriter(tokens);
    }

    public void print() {
        System.out.print(rewriter.getText());
    }

    @Override public void enterNormalClassDeclaration(
        Java8Parser.NormalClassDeclarationContext ctx) {
        rewriter.insertBefore(ctx.start, "/*\n * class "+
                                ctx.Identifier().getText()+
                                "\n */\n");
    }
}
```

17 Desacoplar código da gramática

- Já vimos que podemos manipular a informação gerada na análise sintáctica de múltiplas formas:
 - Directamente na gramática recorrendo a acções e associando atributos a regras (argumentos, resultado, variáveis locais);
 - Utilizando *listeners*;
 - Utilizando *visitors*;
 - Associando atributos à gramática fazendo a sua manipulação dentro dos *listeners* e/ou *visitors*.
- No entanto, se quisermos associar informação extra à gramática, até agora só o podíamos fazer acrescentando atributos à gramática (sintetizados, herdados ou variáveis locais às regras), ou utilizando os resultados dos métodos `visit`.
- A primeira destas opções, no entanto, representa uma dependência da gramática à linguagem destino escolhida.
- Uma possibilidade para resolver este problema consiste na simulação da comunicação existente entre métodos implementando explicitamente uma estrutura de dados tipo *stack* (mas isso é trabalhoso e sujeito a erros).
- O ANTLR4 fornece uma solução melhor: a sua biblioteca de *runtime* contém um *array* associativo que permite associar nós da árvore sintáctica com atributos – `ParseTreeProperty`.
- Vamos ver um exemplo com uma gramática para expressões aritméticas:

Exemplo

```
grammar Expr;

main: stat* EOF;

stat: expr;

expr: expr '*' expr # Mult
    | expr '+' expr # Add
    | INT          # Int
    ;

INT: [0-9]+;
WS: [ \t\r\n]+ -> skip;
```

Exemplo

```
import org.antlr.v4.runtime.tree.ParseTreeProperty;

public class ExprSolver extends ExprBaseListener {
    ParseTreeProperty<Integer> mapVal = new ParseTreeProperty<>();
    ParseTreeProperty<String> mapTxt = new ParseTreeProperty<>();

    public void exitStat(ExprParser.StatContext ctx) {
        System.out.println(mapTxt.get(ctx.expr()) + " = " +
                           mapVal.get(ctx.expr()));
    }

    public void exitAdd(ExprParser.AddContext ctx) {
        int left = mapVal.get(ctx.expr(0));
        int right = mapVal.get(ctx.expr(1));
        mapVal.put(ctx, left + right);
        mapTxt.put(ctx, ctx.getText());
    }

    public void exitMult(ExprParser.MultContext ctx) {
        int left = mapVal.get(ctx.expr(0));
        int right = mapVal.get(ctx.expr(1));
        mapVal.put(ctx, left * right);
        mapTxt.put(ctx, ctx.getText());
    }

    public void exitInt(ExprParser.IntContext ctx) {
        int val = Integer.parseInt(ctx.INT().getText());
        mapVal.put(ctx, val);
        mapTxt.put(ctx, ctx.getText());
    }
}
```