

# Tema 4

## Síntese

Geração de código e gestão de erros

*Compiladores, 2<sup>o</sup> semestre 2022-2023*

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

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

## Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

## Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

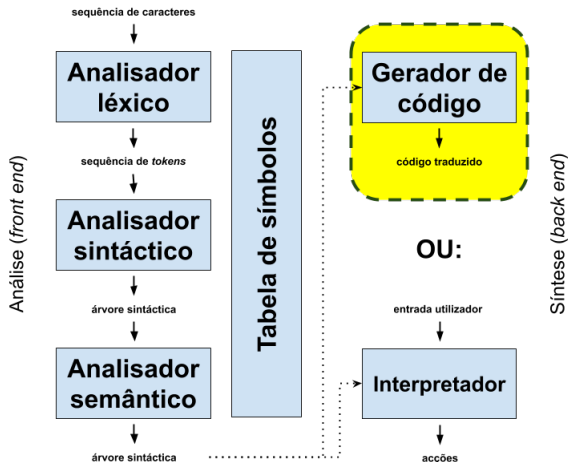
TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

# Síntese: geração de código

# Síntese: geração de código



## Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

## Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

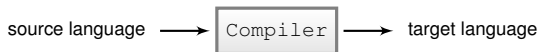
TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

## Síntese: geração de código (2)

- Podemos definir o objectivo de um compilador como sendo *traduzir* o código fonte de uma linguagem para outra linguagem.



- A geração do código para a linguagem destino pode ser feita por diferentes fases (podendo incluir fases de optimização), mas nós iremos abordar apenas uma única fase.
- A estratégia geral consiste em identificar **padrões de geração de código**, e após a análise semântica percorrer novamente a árvore sintáctica (mas já com a garantia muito importante de inexistência de erros sintácticos e semânticos) gerando o código destino nos pontos apropriados.

### Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

### Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

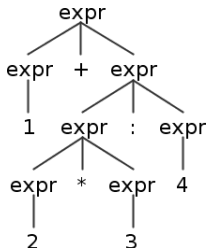
Controlo de fluxo

Funções

## Exemplo: Calculadora

- Código fonte:

```
1+2*3:4
```



- Uma possível compilação para Java:

```
public class CodeGen {
    public static void main(String[] args) {
        int v2 = 1;
        int v5 = 2;
        int v6 = 3;
        int v4 = v5 * v6;
        int v7 = 4;
        int v3 = v4 / v7;
        int v1 = v2 + v3;
        System.out.println(v1);
    }
}
```

### Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

### Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código:  
padrões comuns

Geração de código para  
expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de  
expressões binárias

TAC: Endereços e  
instruções

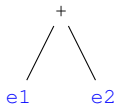
Controlo de fluxo

Funções

- Tradicionalmente, o ensino de processadores de linguagens tende a dar primazia à geração de código baixo nível (linguagem máquina, ou *assembly*).
- A larga maioria da bibliografia mantém esse enfoque.
- No entanto, do ponto de vista prático serão poucos os programadores que, fazendo uso de ferramentas para gerar processadores de linguagens, necessitam ou ambicionam este tipo de geração de código.
- Nesta disciplina vamos, alternativamente, discutir a geração de código numa perspectiva mais abrangente, incluindo a geração de código em linguagens de alto nível.

- No que diz respeito à geração de código em linguagens de baixo nível, é necessário um conhecimento robusto em arquitectura de computadores e lidar com os seguintes aspectos:
  - Representação e formato da informação (formato para números inteiros, reais, estruturas, *array*, etc.);
  - Gestão e endereçamento de memória;
  - Implementação de funções (passagem de argumentos e resultado, suporte para recursividade com pilha de chamadas e *frame pointers*);
  - Alocação de registos do processador.
- (Consultar a bibliografia recomendada para estudar este tipo de geração de código.)

- Seja qual for o nível da linguagem destino, uma possível estratégia para resolver este problema consiste em identificar sem ambiguidade **padrões de geração de código** associados a cada **elemento gramatical da linguagem**.
- Para esse fim, é necessário definir o contexto de geração de código para cada elemento (por exemplo, geração de instruções na linguagem destino, ou atribuir a valor a uma variável), e depois garantir que o mesmo é compatível com todas as utilizações do elemento.



$$\begin{aligned} & \dots (e_1) \\ & v_1 = e_1 \\ & \dots (e_2) \\ & v_2 = e_2 \\ & v_+ = v_1 + v_2 \end{aligned}$$

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções



### Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

### Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- Como a larguíssima maioria das linguagens destino são textuais, esses padrões de geração de código consistem em padrões de geração de texto.
- Assim sendo, em `Java`, poderíamos delegar esse problema no tipo de dados `String`, `StringBuilder`, ou mesmo na escrita directa de texto em em ficheiro (ou no *standard output*).
- No entanto, também aí o ambiente `ANTLR4` fornece uma ajuda mais estruturada, sistemática e modular para lidar com esse problema.

# *String Template*

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

## String Template

- A biblioteca (Java) *String Template* fornece uma solução estruturada para a geração de código textual.
- O software e documentação podem ser encontrados em <http://www.stringtemplate.org>
- Para ser utilizada é apenas necessário o pacote ST-4.?.jar (a instalação feita do antlr4 já incluiu este pacote).
- Vejamos um exemplo simples:

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
// code gen. pattern definition with <name> hole:
ST hello = new ST("Hello, <name>");
// hole pattern definition:
hello.add("name", "World");
// code generation (to standard output):
System.out.println(hello.render());
```

- Mesmo sendo um exemplo muito simples, podemos já verificar que a definição do padrão de texto, está separada do preenchimento dos “buracos” (atributos ou expressões) definidos, e da geração do texto final.

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- Podemos assim delegar em partes diferentes do gerador de código, a definição dos padrões (que passam a pertencer ao contexto do elemento de código a gerar), o preenchimento dos “buracos” definidos, e a geração do texto final de código.
- Os padrões são blocos de texto e expressões.
- O texto corresponde a código destino literal, e as expressões são em “buracos” que podem ser preenchidos com o texto que se quiser.
- Sintaticamente, as expressões são identificadores delimitados por `<expr>` (ou por `$`).

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
ST assign = new ST("<var> = <expr>;\n");
assign.add("var", "i");
assign.add("expr", "10");
String output = assign.render();
System.out.println(output);
```

#### Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

#### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

#### Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- Podemos também agrupar os padrões numa espécie de funções (módulo `STGroup`):

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
STGroup group = new STGroupString(
    "assign(var,expr) ::= \"<var> = <expr>;\" "
);
ST assign = group.getInstanceOf("assign");
assign.add("var", "i");
assign.add("expr", "10");
String output = assign.render();
System.out.println(output);
```

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- Podemos também colocar cada função num ficheiro:

```
// file assign.st
assign(var, expr) ::= "<var> = <expr>;"
```

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
// assuming that assign.st is in current directory:
STGroup group = new STGroupDir(".");
ST assign = group.getInstanceOf("assign");
assign.add("var", "i");
assign.add("expr", "10");
String output = assign.render();
System.out.println(output);
```

- Uma melhor opção é optar por ficheiros modulares contendo grupos de funções/padrões:

```
// file templates.stg

templateName(arg1, arg2, ..., argN) ::= "single-line template"

templateName(arg1, arg2, ..., argN) ::= <<
multi-line template preserving indentation and newlines
>>

templateName(arg1, arg2, ..., argN) ::= <%
multi-line template that ignores indentation and newlines
%>
```

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
// assuming that templates.stg is in current directory:
STGroup allTemplates = new STGroupFile("templates.stg");
ST st = group.getInstanceOf("templateName");
...
```

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

# String Template: dicionários e condicionais

- Nestes módulos podemos ainda definir dicionários (arrays associativos).

```
typeValue ::= [  
  "integer": "int",  
  "real": "double",  
  "boolean": "boolean",  
  default: "void"  
]
```

- Na definição de padrões podemos utilizar uma instrução condicional que só aplica o padrão caso o atributo seja adicionado:

```
stats(stat) ::= <<  
<if(stat)><stat; separator="\n"><endif>  
>>
```

- O campo `separator` indica que em cada operação `add` em `stat`, se irá utilizar esse separador (no caso, uma mudança de linha).

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções



- Podemos ainda definir padrões utilizando outros padrões (como se fossem funções).

```
module(name, stat) ::= <<
public class <name> {
    public static void main(String[] args) {
        <stats (stat)>
    }
}
>>

conditional(stat, var, stat_true, stat_false) ::= <<
<stats (stat)>
if (<var>) {
    <stat_true>
}< if (stat_false)>
else {
    <stat_false>
}< endif>
>>
```

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- Também existe a possibilidade de utilizar listas para concatenar texto e argumentos de padrões:

```
binaryExpression ( type , var , e1 , op , e2 ) ::=  
    "<decl ( type , var , [ e1 , \" \" , op , \" \" , e2 ] ) > "
```

- OU:

```
binaryExpression ( type , var , e1 , op , e2 ) ::= <<  
<decl ( type , var , [ e1 , \" \" , op , \" \" , e2 ] ) >  
>>
```

- Para mais informação sobre as possibilidades desta biblioteca devem consultar a documentação existente em:  
<http://www.stringtemplate.org>.

# Geração de código: padrões comuns

## Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

## *String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

## Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

## Geração de código: padrões comuns

- Uma geração de código modular requer um contexto uniforme que permita a inclusão de qualquer combinação de código a ser gerado.
- Na sua forma mais simples, o padrão comum pode ser simplesmente uma sequência de instruções.

```
stats ( stat ) ::= <<
< if ( stat ) > < stat ; separator = "\n" > < endif >
>>

module ( name , stat ) ::= <<
public class < name >
{
    public static void main ( String [] args )
    {
        < stats ( stat ) >
    }
}
>>
```

- Com este padrão, podemos inserir no lugar do “buraco” `stat` a sequência de instruções que quisermos.
- Naturalmente, que para uma geração de código mais complexa podemos considerar a inclusão de buracos para membros de classe, múltiplas classes, ou mesmo vários ficheiros.

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

## Geração de código: padrões comuns (2)

- Para a linguagem C, teríamos o seguinte padrão para um módulo de compilação:

```
stats(stat) ::= <<
<if(stat)><stat; separator="\n"><endif>
>>

module(name, stat) ::= <<
#include <stdio.h>
#include <math.h>

int main()
{
    <stats(stat)>
}
>>
```

- Se a geração de código for guiada pela árvore sintáctica (como normalmente acontece), então os padrões de código a ser gerados devem ter em conta as definições gramaticais de cada símbolo, permitindo a sua aplicação modular em cada contexto.

# Geração de código para expressões

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

# Geração de código para expressões

- Para ilustrar a simplicidade e poder de abstração do *String Template* vamos estudar o problema de geração de código para expressões.
- Para resolver este problema de uma forma modular, podemos utilizar a seguinte estratégia:
  - 1 considerar que qualquer expressão tem a si associada uma variável (na linguagem destino) com o seu valor;
  - 2 para além dessa associação, podemos também associar a cada expressão um `ST (stats)` com as instruções que atribuem o valor adequado à variável.
- Como habitual, para fazer estas associações podemos definir atributos na gramática, fazer uso do resultados das funções de um *Visitor* ou utilizar a classe `ParseTreeProperty`
- Desta forma, podemos fácil e de uma forma modular, gerar código para qualquer tipo de expressão.

## Geração de código para expressões (2)

- Padrões para expressões (para Java) podem ser:

```
typeValue ::= [  
    "integer":"int", "real":"double",  
    "boolean":"boolean", default:"void"  
]  
  
init(value) ::= "<if(value)> = <value><endif>"  
decl(type, var, value) ::=  
    "<typeValue.(type)> <var><init(value)>;"  
  
binaryExpression(type, var, e1, op, e2) ::=  
    "<decl(type, var, [e1, \" \", op, \" \", e2])>"
```

- Para C apenas seria necessário mudar o padrão

typeValue:

```
typeValue ::= [  
    "integer":"int", "real":"double",  
    "boolean":"int", default:"void"  
]
```



Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

# Exemplo: compilador simples

# Código de triplo endereço

## Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

## *String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

## Síntese: geração de código intermédio

### Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- O padrão para expressões é um exemplo duma representação muito utilizada para geração de código baixo nível (em geral, intermédio, e não final), designada por **codificação de triplo endereço** (TAC).
- Esta designação tem origem nas instruções com a forma:  
 $x = y \text{ op } z$
- No entanto, para além desta operação típica de expressões binárias, esta codificação contém outras instruções (ex: operações unárias e de controlo de fluxo).
- No máximo, cada instrução tem três operandos (i.e. três variáveis ou endereços de memória).
- Tipicamente, cada instrução TAC realiza uma operação elementar (e já com alguma proximidade com as linguagens de baixo nível dos sistemas computacionais).

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

*String Template*

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

## TAC: Exemplo de expressões binárias

- Por exemplo a expressão  $a + b * (c + d)$  pode ser transformada na sequência TAC:

```
t8 = d ;  
t7 = c ;  
t6 = t7 + t8 ;  
t5 = t6 ;  
t4 = b ;  
t3 = t4 * t5 ;  
t2 = a ;  
t1 = t2 + t3 ;
```

- Esta sequência – embora fazendo uso desregrado no número de registos (o que, num compilador gerador de código máquina, é resolvido numa fase posterior de optimização) – é codificável em linguagens de baixo nível.

- Nesta codificação, um endereço pode ser:
  - Um nome do código fonte (variável, ou endereço de memória);
  - Uma constante (i.e. um valor literal);
  - Um nome temporário (variável, ou endereço de memória), criado na decomposição TAC.
- As instruções típicas do TAC são:
  - 1 Atribuições de valor de operação binária:  $x = y \text{ op } z$
  - 2 Atribuições de valor de operação unária:  $x = \text{op } y$
  - 3 Instruções de cópia:  $x = y$
  - 4 Saltos incondicionais e etiquetas: **goto**  $L$  e **label**  $L$  :
  - 5 Saltos condicionais: **if**  $x$  **goto**  $L$  ou **ifFalse**  $x$  **goto**  $L$
  - 6 Saltos condicionais com operador relacional:  
**if**  $x$  **relop**  $y$  **goto**  $L$  (o operador pode ser de igualdade ou ordem)
  - 7 Invocações de procedimentos (**param**  $x_1 \dots \text{param } x_n$  ;  
**call**  $p, n$  ;  $y = \text{call } p, n$  ; **return**  $y$ )
  - 8 Instruções com arrays (i.e. o operador é os parêntesis rectos, e um dos operandos é o índice inteiro).
  - 9 Instruções com ponteiros para memória (como em C)

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções

- As instruções de controlo de fluxo são as instruções condicionais e os ciclos.
- Em linguagens de baixo nível muitas vezes estas instruções não existem.
- O que existe em alternativa é a possibilidade de dar “saltos” dentro do código recorrendo a endereços (*labels*) e a instruções de salto (*goto*, ...).

```
if (cond) {  
    A;  
}  
else {  
    B;  
}
```

```
ifFalse cond goto l1  
A  
goto l2  
label l1 :  
B  
label l2 :
```

### Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

### Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

## Controlo de fluxo

Funções

## Controlo de fluxo (2)

- De forma similar podemos gerar código para ciclos:

```
while ( cond ) {  
    A;  
}
```

```
label l1 :  
ifFalse cond goto l2  
A  
goto l1  
label l2 :
```

- A geração de código para funções pode ser feita recorrendo a uma estratégia tipo “macro”, ou implementando módulos algorítmicos separados.
- Neste último caso, é necessária a definição de um bloco algorítmico separado, assim como implementar a passagem de argumentos/resultado para/de a função.
- A passagem de argumentos pode seguir diferentes estratégias: passagem por valor, passagem por referência de variáveis, passagem por referência de objectos/registos.
- Para termos implementações recursivas é necessário que se definam novas variáveis em cada invocação da função.
- A estrutura de dados que nos permite fazer isso de uma forma muito eficiente e simples é a pilha de execução.
- Esta pilha armazena os argumentos, variáveis locais à função e o resultado da função (permitindo ao código que invoca a função não só passar os argumentos à função como ir buscar o seu resultado).

### Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

### String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

### Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

## Funções



## Funções (2)

- Geralmente as arquiteturas de linguagens de baixo nível (CPU's) têm instruções específicas para lidar com esta estrutura de dados.
- Vamos exemplificar esse procedimento:

```
// use:  
... f(x,y);  
...  
// define:  
int f(int a, int b) {  
    A;  
    return r;  
}
```

```
// use:  
push 0 // result  
push x  
push y  
call f,2  
pop r // result  
...  
// define:  
label f:  
pop b  
pop a  
pop r  
store stack-position  
A  
// reset stack to stack-position  
restore stack-position  
push r  
return
```

Síntese: geração de código

Geração de código máquina

Geração de código

String Template

Geração de código: padrões comuns

Geração de código para expressões

Síntese: geração de código intermédio

Código de triplo endereço

TAC: Exemplo de expressões binárias

TAC: Endereços e instruções

Controlo de fluxo

Funções