

Cmb

Bruno Azevedo*and Miguel Costa†

*Análise e Transformação de Software,
UCE30 Engenharia de Linguagens,
Mestrado em Engenharia Informatica,
Universidade do Minho*

9 de Julho de 2012

Resumo

Este documento apresenta as resolução do Trabalho Prático de Análise e Transformação de Software em que se usa as técnicas de construção de ASTs e suas travessias tendo em conta atributos. O exercício está relacionado com a implementação da linguagem Cmb, dada nas aulas, e na criação de um Control Flow Graph (CFG), um Program Dependency Graph (PDG), System Dependency Graph (SDG) e ainda de um Directed Acyclic Graph (DAG). O resultado é um WebSite para mostrar os vários grafos criados.

*Email: azevedo.252@gmail.com

†Email: miguelpintodacosta@gmail.com

Conteúdo

1	Ambiente de Trabalho	3
2	Descrição do problema	3
3	Exemplo de um programa em Cmb	3
4	Gramáticas	4
4.1	Gramática concreta	4
4.1.1	AST	4
4.2	Tree Grammars	5
4.2.1	Control Flow Graph	5
4.2.2	Program Dependency Graph	11
4.2.3	System Dependency Graph	21
4.2.4	Single Static Assignment	25
5	WebSite	28
6	Conclusões	33
7	Anexos	34
7.1	Gramática final	34
7.2	CmbTGCFG	39
7.3	Código Java	47

1 Ambiente de Trabalho

Foi necessário usar um Gerador de Compiladores para gerar o nosso próprio compilador, por isso usámos o AnTLR que é também usado nas aulas. Para facilitar o processo de debugging durante a resolução do problema dado, usámos a ferramenta AnTLRWorks, que tem uma interface bastante agradável e simpática para ajudar a resolver problemas desta natureza.

A linguagem de programação adoptada foi o JAVA. De forma a tornar a nossa solução mais legível e estruturada. Para mostrar a informação criamos um site com a linguagem PHP.

2 Descrição do problema

O pretendido para este exercício usar as técnicas de construção de ASTs e suas travessias tendo em conta atributos e construir, tal como já foi indicado, um CFG, PDG, SDG e SSA tendo como linguagem o Cmb desenvolvido nas aulas.

O resultado deve ser apresentado no formato de WebSite.

3 Exemplo de um programa em Cmb

Em todos os exemplos que vão ser apresentados neste relatório, o input introduzido é o que se segue:

Listing 1: Linguagem Cmb

```
1 void imprime(string nome)
2 {
3     string msg;
4     msg = "blabla";
5     print (nome);
6     print (msg);
7 }
8
9 int main(int x, int y)
10 {
11     int a;
12     int b;
13
14     a=2+1;
15
16     if(a==2) {
17         a = a + 1;
18         b = 3;
19     }
20     else
21         b = 5;
22
23     while (a<5)
24     {
25         a = a+5 * 3;
26     }
27
28     b = xtop(a+2*3,a);
29
30     print (a);
31
```

```

32     scan (a);
33 }
34
35 bool xtop (bool t, int i)
36 {
37     string s;
38
39     s = "luis";
40
41     imprime (s);
42
43     return s;
44 }

```

4 Gramáticas

Neste capítulo, iremos abordar a gramática concreta fornecida que define uma linguagem Cmb apresentada nas aulas de Engenharia Gramatical e explicar o objetivo da mesma. A transformação numa AST também foi fornecida e por isso abordaremos apenas o processo de criação associado. Por fim, mostraremos a implementação da cada um dos módulos (Tree Grammars) pedidos para este trabalho.

4.1 Gramática concreta

A linguagem Cmb é uma simplificação da linguagem C. Simplificada no sentido em que apenas reúne algumas das características presentes no C, nomeadamente, funções e os seus argumentos, declaração de variáveis, atribuições, operações de I/O (scan e print), expressões if e ciclos while, invocação de funções, retorno de variáveis numa função (return) e a utilização de expressões que utilizam operadores aritméticos, à exceção dos operadores de incremento (++) e decremento (--), operadores de comparação e operadores lógicos.

Após criada a gramática, o próximo passo seria validar o texto de input. Mas como fazê-lo? Existem várias abordagens, uma delas e a que iremos utilizar neste trabalho é a geração de uma representação intermédia para que a partir dela se possam criar os grafos pedidos. Na secção seguinte, iremos falar desta abordagem.

4.1.1 AST

Uma Representação Intermédia (RI) é uma versão independente de qualquer linguagem ou máquina do código original. A utilização de uma RI traz algumas vantagens tais como o aumento do nível de abstração e uma separação mais limpa entre o produto inicial e o final.

Existem várias representações intermédias e a que iremos utilizar é a AST (Abstract Syntax Tree) que é uma representação em árvore da estrutura sintática abstrata do código fonte. A sintaxe é abstrata no sentido em que não representa cada detalhe que aparece na sintaxe real, ou seja, elementos como parênteses de agrupamento estão implícitos na estrutura da árvore e uma construção sintática como uma condição if e os seus blocos then e else pode ser representada através de um único nodo e dois ramos, e símbolos intermédios e palavras reservadas são tipicamente eliminados. Basicamente, mantém-se uma estrutura suficiente para realizar processos semânticos e geração de código.

O próximo passo será, então, criar a AST e para isso é necessário criar regras de reescrita sobre a gramática concreta, um mecanismo que o ANTLR oferece. Enquanto que uma gramática de parsing especifica como reconhecer input, as regras de reescrita são gramáticas geradoras, ou seja, especificam como gerar output. Estas regras de reescritas, já nos são fornecidas juntamente com a gramática concreta e a AST resultante terá, por cada, elemento que agrupa outros elementos, um token imaginário, ou seja, referências a tokens que não se encontram na produção original, elementos tais como ';', ou parênteses serão eliminados e elementos com o mesmo nome numa produção são agrupados numa única lista.

A gramática final com as regras de reescrita pode ser consultada em anexo.

4.2 Tree Grammars

O próximo passo consiste na construção de um parser da AST gerada, que permitirá atravessá-la (tree walker) e manipulá-la, transformando-a gradualmente em diversas fases de tradução até que se obtenha uma forma final que satisfaça as nossas necessidades. Este parser será construído utilizando um mecanismo fornecido pelo ANTLR, uma Tree Grammar (TG). As ações numa TG possuem um contexto muito nítido e conseguem aceder a informação passada das regras invocadas.

A utilização de TGs, para além da utilização referida acima, também nos fornece algumas vantagens:

- uma especificação formal, concisa e independente de um sistema da estrutura da AST;
- as ações têm um contexto implícito graças à sua localização na gramática;
- os dados podem ser passados entre as ações de forma livre utilizando parâmetros (atributos), valores de retorno e variáveis locais.

O problema apresentado, exige a construção de 4 TG (módulos), por isso, dividiremos esta secção em 4 subsecções.

A primeira referente ao Control Flow Graph (CFG), o segundo ao Program Dependency Graph (PDG), o terceiro ao System Dependency Graph (SDG) e o último referente ao Single Static Assignment (SSA).

4.2.1 Control Flow Graph

Um Control Flow Graph (CFG) é um grafo direcionado com a adição de um único nodo de entrada START e um único nodo de saída STOP, tal que cada nodo no grafo tem no máximo dois sucessores. Assume-se que nodos com dois sucessores têm atributos "T"(Verdadeiro) e "F"(Falso) associados aos ramos que saem, assume-se também que, para cada nodo N no grafo, existe um caminho de START a N e um caminho de N a STOP.

Este tipo de grafos pode servir para verificar se os programas que representam estão corretos, verificando se determinados nodos são atingíveis ou não e a partir de aí otimizar o código, por exemplo, eliminando *dead code*, código que é executado mas cujo resultado nunca é utilizado em mais nenhuma computação.

Numa visão geral, a estratégia utilizada para gerar este grafo consiste, na passagem de uma instância de uma classe Java Grafo (esta será explicada de seguida) por todas as produções da TG, assim como uma lista (`TreeSet<Integer>` em Java) com um ou mais números de instrução correspondentes à última(s) statement(s) executada(s) com o objetivo de conectar no grafo instruções consequentes e também, uma string label que indica se a instrução que está a ser calculada é a primeira instrução de um bloco then ou else. Todo o código externo à TG está escrito na linguagem de programação Java.

A classe Grafo é uma classe Java que armazena os nodos e os caminhos do CFG encontrados ao longo do processo de parsing da TG para cada função existente no programa input. Cada nodo é um mapeamento (`TreeMap`) entre o número de instrução (sequencial) e a instrução, que é representada por uma classe `Instrucao`, de momento, apenas importa referir que a classe `Instrucao` armazena a instrução em si. Cada caminho é um mapeamento entre o número da instrução origem e uma lista (`TreeSet<ParNrInstrucaoLabel>`), a classe `ParNrInstrucaoLabel` é constituída pelo número da instrução destino e a label referida acima. Um grafo é gerado para cada função existente no programa de input.

A lista com números de instrução é atualizada com o número da última instrução, no caso de uma atribuição, read, write, invocação ou return, ou das últimas instruções no caso de um if, while ou vários dos mesmos aninhados. Na instrução seguinte, a lista é utilizada para conectar os números contidas nela ao número da nova instrução visitada. A lista é inicializada com o número do nodo START (0) e após a última instrução de uma função ser executada, o conteúdo da lista é conectado ao nodo EXIT que é gerado na altura.

Finalmente, a string label é inicializada com uma string vazia e apenas toma o valor "T" quando o bloco then de um statement if ou quando o bloco de instruções de um while é visitado. E toma o valor "F" quando

o bloco else de um statement if é visitado ou o bloco de instruções de um while termina. Nos restantes casos, depois de um statement ser visitado esta volta a tomar o valor de string vazia.

No final da execução da TG um TreeMap contendo um mapeamento entre o identificador de uma função e o respetivo grafo CFG é retornado à Interface Java (esta será explicada posteriormente).

O processo de codificação das ações revelou-se, apesar de não ser idêntico em todas as produções com características semelhantes, sistemático. Após codificada a ação para uma produção, as restantes precisaram apenas de pequenas alterações. Tentaremos mostrar, com alguns excertos da TG, as ações criadas para obter o resultado final.

Começamos pela produção inicial, cujo símbolo não terminal representa o axioma da nossa linguagem, a partir da qual todo o processo de derivação se inicia. O TreeMap que vai armazenar os CFG gerados é instanciado nesta produção e para cada função existente no programa input, um novo grafo é instanciado e passado como atributo ao símbolo não terminal funcao, e o grafo resultante do processamento de uma função é adicionado ao TreeMap que será retornado no final. A produção é apresentada de seguida:

Listing 2: Produção programa

```

1  programa returns [TreeMap<String, Grafo> grafos_out]
2  @init {
3      TreeMap<String, Grafo> grafos = new TreeMap<String, Grafo>();
4  }
5      : ~(PROGRAMA (funcao[new Grafo()]
6      {
7          grafos.put($funcao.func_id, $funcao.g_out);
8      }
9      )+
10     {
11         $programa.grafos_out = grafos;
12     }
13     )
14     ;

```

A ação criada para tratar cada função, mais especificamente o símbolo não terminal (SNT) corpo_funcao. Nesta produção, apenas na primeira visita, o TreeSet que guarda os números das últimas instruções executadas é instanciado, assim como o nodo inicial START é adicionado ao grafo e o número criado para este (0) é adicionado-o ao TreeSet. Num CFG as declarações de uma função são ignoradas, por isso apenas nos interessa a parte dos statements. Este símbolo não terminal recebe como atributos de entrada (herdados) para além dos três atributos já mencionados, uma string contexto que toma valores entre "CORPO_FUNCAO" e "BLOCO", o seu significado será explicado posteriormente. A produção é exibida de seguida:

Listing 3: Produção corpo funcao

```

1  corpo_funcao [Grafo g_in, String id_funcao] returns [Grafo g_out]
2  @init{
3      Grafo g = $corpo_funcao.g_in;
4      TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
5      // 0 <=> Nodo START. E passado como parametro para que o nodo START se ligue
6      // À primeira instrucao
7      int nr = g.putNodo(0, new Instrucao("START", null, null));
8      nrs.add(nr);
9  }
10     : ~(CORPO declaracoes statements[$corpo_funcao.g_in, "CORPO_FUNCAO", nrs, ""
11     ])
12     {
13         $corpo_funcao.g_out = $statements.g_out;
14     }
15     ;

```

Apenas mostramos a produção para o SNT statements para explicar a utilizada do atributo herdado contexto. Após todas as instruções de uma função terem sido executadas e devidamente introduzidas no grafo assim como os caminhos entre eles, falta conectar os nodos das últimas instruções ao nodo EXIT. Como esta

produção é visitada, não só a partir da produção corpo_funcao, mas também da produção bloco, que representa o conjunto de instruções presentes num bloco then ou else de um if ou as instruções de um bloco while, é necessário distinguir o contexto em que a produção é visitada, visto que só faz sentido ligar os último nodos ao nodo EXIT se realmente se tratar do final do corpo da função e não o final do bloco de um ciclo while.

Listing 4: Produção statements

```

1 statements [Grafo g_in, String contexto, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in,
  String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out,
    String label_out]
2   @init {
3       Grafo g = $statements.g_in;
4       TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao = $statements.nrs_ultima_instrucao_in;
5   }
6   :   ^(STATEMENTS (statement[g, nrs_ultima_instrucao, $statements.label_in]
7       {
8           g = $statement.g_out;
9           nrs_ultima_instrucao = $statement.nrs_ultima_instrucao_out;
10          $statements.label_in = $statement.label_out;
11      }
12  )+
13  {
14      // Apos todos os statements do corpo de uma funcao tiverem sido
        executados, os ultimos nodos sao ligados ao nodo EXIT
15      if ($statements.contexto.equals("CORPO_FUNCAO")){
16          // cria nodo EXIT
17          int nodo_exit = g.putNodo(new Instrucao("EXIT", null, null));
18          // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
        essas instrucoes ao nodo EXIT
19          g.checkAndPutCaminho(nrs_ultima_instrucao, new ParNrInstrucaoLabel(
        nodo_exit, $statement.label_out));
20      }
21
22      $statements.g_out = g;
23      $statements.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_ultima_instrucao;
24      $statements.label_out = $statement.label_out;
25  }
26  )
27  ;

```

Para o SNT statement, apenas ilustraremos a ação criada para um statement em específico visto que os restantes são semelhantes.

Vamos apresentar o caso em que o lado direito da produção contém o SNT atribuicao. Neste caso, os atributos passados a atribuicao são o grafo e a label e após esta ser executada um ou mais caminhos são adicionados ao grafo, isto é, a lista dos números das últimas instruções anteriores à atribuição são conectados ao número de instrução gerado para a atribuição e que é devolvido pelo SNT atribuicao através de um atributo sintetizado juntamente com a label passada como atributo herdado ao statement.

Listing 5: Produção statement

```

1 statement [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in]
  returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
2   @init {
3       Grafo g = $statement.g_in;
4   }
5   :   atribuicao[g, $statement.label_in]
6       {
7           g = $atribuicao.g_out;
8
9           // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
        essas instrucoes a nova instrucao

```

```

10         g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
11             ParNrInstrucaoLabel($atribuicao.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
12                 $statement.label_in));
13
14         $statement.g_out = g;
15         $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $atribuicao.
16             nrs_ultima_instrucao_out;
17         $statement.label_out = $atribuicao.label_out;
18     }
19     | ...
20 ;

```

Este comportamento só modifica para as produções cujo lado direito da produção são o SNT ifs e whiles, sendo que a única diferença é o facto de a adição de novos caminhos ao grafo não ser feita após a execução da instrução, mas sim nas produções correspondentes. Devido a esse facto a essas produções também lhes é passado como atributo herdado a lista dos números das últimas instruções.

Aproveitando o exemplo dado acima, vamos ilustrar a produção do SNT atribuição e ação criada para o mesmo. Esta ação consiste na inserção de um novo nodo no grafo, que como já foi dito, apenas consiste na inserção da instrução em si, assim como a atualização do TreeSet que armazena a última instrução executada, neste caso, este número é retornado pelo método de inserção de um novo nodo no grafo. O TreeSet e o grafo são retornados como atributos sintetizados.

Listing 6: Produção atribuição

```

1 atribuicao [Grafo g_in, String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer>
2     nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
3     @init {
4         Grafo g = $atribuicao.g_in;
5     }
6     :      ^('=' ID expr)
7     {
8         TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
9         // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
10        nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($ID.text + " = " + $expr.instrucao, null,
11            null)));
12
13        $atribuicao.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
14        $atribuicao.g_out = g;
15        $atribuicao.label_out = "";
16    }
17 ;

```

Da mesma forma que os casos do ifs e whiles diferiam dos outros, também a este nível diferem. As produções para ambos são um pouco mais elaboradas que as restantes.

Para o caso do ifs é preciso ter em atenção que os últimos nodos executados ligam apenas à expressão de condição do if, e esta, por sua vez, liga à primeira instrução do bloco then e, caso exista, à primeira instrução do bloco else, se não existir então é necessário conectá-la a próxima instrução a ser executada. Posto isto, para facilitar as explicações seguintes, mostraremos de seguida a produção no seu formato original na AST para servir de guia.

Listing 7: Produção ifs

```

1 ifs
2     :      ^(IF expr a=bloco (b=bloco)?)
3     ;

```

O primeiro passo é a criação do nodo correspondente à expressão do if no grafo, assim como, dos caminhos entre as últimas instruções a ser executadas e a instrução correspondente à expressão, juntamente com a label passada como atributo herdado. Adicionalmente, o número da nova instrução é atribuído a duas variáveis auxiliares cuja utilidade está explicada nos comentários do excerto de código seguinte.

Listing 8: Produção ifs

```

1 ifs [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in] returns [
  Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
2   @init {
3       Grafo g = $ifs.g_in;
4       int nr_ult_inst_exp = -1;
5       TreeSet<Integer> nrs_exp = new TreeSet<Integer>();
6       TreeSet<Integer> nrs_out = new TreeSet<Integer>();
7   }
8   :   ~(IF expr
9       {
10          // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
11          nr_ult_inst_exp = g.putNodo(new Instrucao($IF.text + "(" + $expr.
            instrucao + ")", null, null));
12
13          // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e
            conecta essas instrucoes a nova instrucao (expressao)
14          g.checkAndPutCaminho($ifs.nrs_ultima_instrucao_in, new
            ParNrInstrucaoLabel(nr_ult_inst_exp, $ifs.label_in));
15
16          // variavel que sera passada aos blocos para indicar o nodo que
            sera ligado a primeira instrucao de cada bloco
17          nrs_exp.add(nr_ult_inst_exp);
18
19          // adiciona provisoriamente o nr da expressao. caso exista o
            bloco else, este e removido ja que a instrucao seguinte,
            ligar-se-a a Última instrucao dos blocos then e else
20          // caso contrario, ligar-se-a a expressao e ao bloco then.
21          nrs_out.add(nr_ult_inst_exp);
22      }

```

Ao bloco de instruções then são passados como atributos herdados o grafo, o TreeSet com o número da instrução correspondente à expressão do if, ou seja, a última instrução executada e a string "T", que corresponde à label que indica que a próxima instrução será conectada à expressão com a label "T". Após a sua execução o grafo e o TreeSet das últimas instruções são atualizados com os atributos sintetizados pelo bloco.

Listing 9: Produção bloco

```

1   a=bloco[g, nrs_exp, "T"]
2   {
3       g = $a.g_out;
4       // adiciona os nrs das ultimas instrucoes deste bloco
5       nrs_out.addAll($a.nrs_ultima_instrucao_out);
6   }

```

O bloco de instruções else é semelhante ao bloco anterior, apenas difere no atributo herdado label que passa a ser "F", tal como, foi dito acima, o TreeSet nrs_out tinha guardado temporariamente o número da instrução da expressão do if, se o bloco else for visitado significa que este existe, logo não faz sentido que a instrução da expressão seja conectada à próxima instrução.

Listing 10: Produção bloco

```

1   (b=bloco[g, nrs_exp, "F"]
2   {
3       g = $b.g_out;
4       // remove o nr da expressao adicionado provisoriamente
5       nrs_out.remove(nr_ult_inst_exp);
6       // adiciona os nrs das ultimas instrucoes deste bloco
7       nrs_out.addAll($b.nrs_ultima_instrucao_out);
8   } )?
9   )
10  {

```

```

11         $ifs.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_out;
12         $ifs.g_out = g;
13         $ifs.label_out = "";
14     }
15
16 ;

```

Para o caso do whiles, temos que, à semelhança do ifs, os últimos nodos executados ligam apenas à expressão de condição do while, e esta liga à primeira instrução do bloco e à próxima instrução a ser executada após o bloco. Tal como fizemos anteriormente, para facilitar as explicações seguintes, mostraremos a produção no seu formato original na AST para servir de guia.

Listing 11: Produção whiles

```

1 whiles
2     : ^(WHILE expr bloco)
3     ;

```

O primeiro passo é semelhante ao do if, ou seja, criamos o nodo correspondente à expressão do while no grafo, assim como, dos caminhos entre as últimas instruções a ser executadas e a instrução correspondente à expressão. E o número da nova instrução é guardado numa variável que será depois passada ao bloco.

Listing 12: Produção whiles

```

1 whiles [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in]
  returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
2   @init {
3       Grafo g = $whiles.g_in;
4       int nr_ult_inst_exp = -1;
5       TreeSet<Integer> nrs_exp = new TreeSet<Integer>();
6   }
7   :    ^(WHILE expr
8       {
9           // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
10          nr_ult_inst_exp = g.putNodo(new Instrucao($WHILE.text + "(" + $expr.
              instrucao + ")", null, null));
11
12          // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
              essas instrucoes a nova instrucao (expressao)
13          g.checkAndPutCaminho($whiles.nrs_ultima_instrucao_in, new
              ParNrInstrucaoLabel(nr_ult_inst_exp, $whiles.label_in));
14
15          // variavel que sera passada ao bloco para indicar o nodo que sera
              ligado a primeira instrucao do bloco
16          nrs_exp.add(nr_ult_inst_exp);
17      }

```

Ao bloco de instruções são passados como atributos herdados o grafo, o TreeSet com o número da instrução correspondente à expressão do while e a string "T". Após a sua execução o grafo é atualizado com o grafo passado como atributo sintetizado pelo bloco.

Finalmente, novos caminhos entre as últimas instruções do bloco e a expressão são inseridos no grafo. O TreeSet com o número da instrução correspondente à expressão de condição, o grafo e label com o valor "F" para que a próxima instrução seja conectada com essa label são retornadas como atributos sintetizados.

Desta forma, apresentámos a implementação da solução encontrada para construir um ou mais CFG a partir de um programa Cmb. A Tree Grammar completa (CmbTGCFG.g) pode ser consultada em anexo.

Exemplo de um grafo CFG gerado:

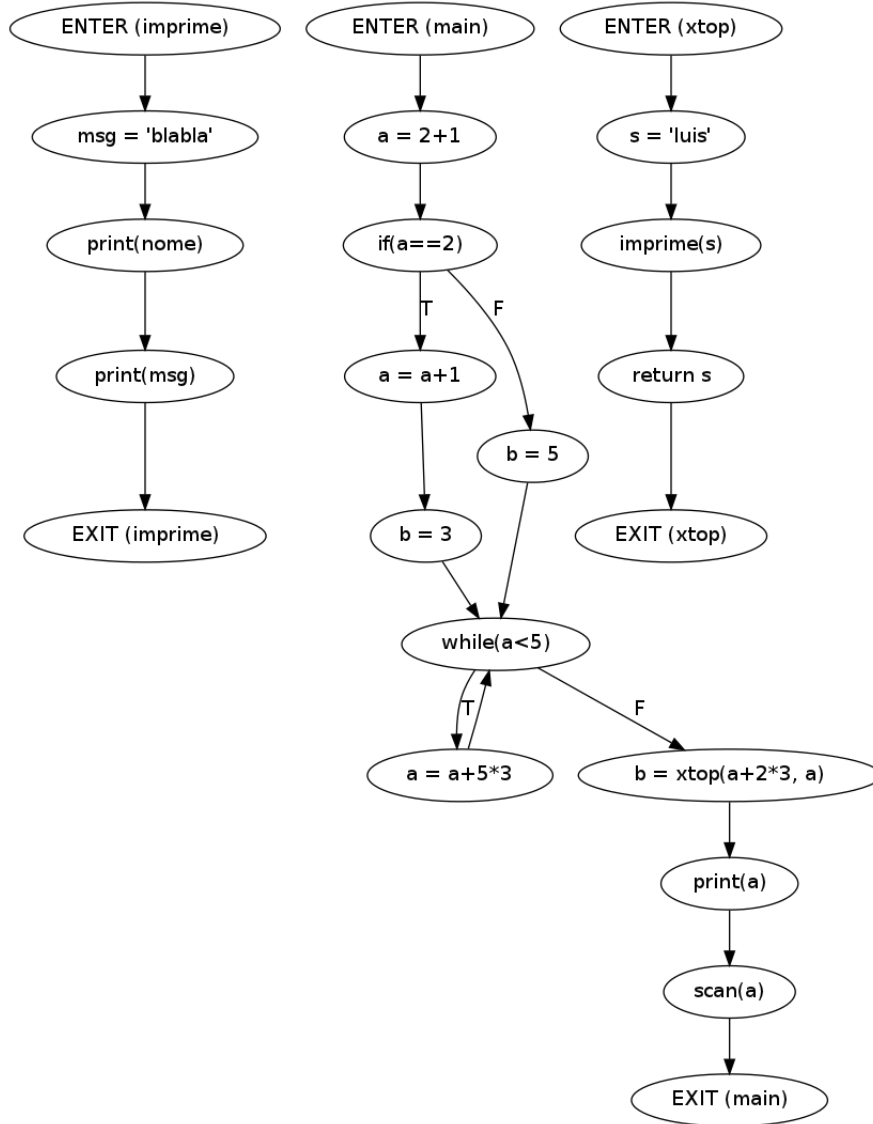


Figura 1: Grafo CFG

4.2.2 Program Dependency Graph

Um Program Dependency Graph (PDG) é uma representação de um programa que contém os mesmos nodos que o CFG e dois tipos de arestas: arestas de controlo de dependência e arestas de controlo de dados. Portanto, é um grafo direcionado em que os vértices correspondem a statements e predicados de controlo, e as arestas correspondem a dados e a controlos de dependência.

Dado que as dependências neste grafo conectam partes do programa computacionalmente relevantes, muitas transformações para melhoramento de código requerem menos tempo de execução comparativamente a outras representações de programas. Uma simples travessia sobre estas dependências é suficiente para realizar bastantes otimizações. Dado que ambos os tipos de dependências estão presentes numa única forma, transformações como vetorização¹ conseguem lidar com as dependências de controlo e dados de uma forma uniforme. Transformações tais como *code motion*², que requerem a interação dos dois tipos de dependência, também conseguem ser controladas por este grafo. Para além disso, a natureza hierárquica do PDG permite que grandes secções

¹Vetorização é o processo de converter um programa de uma implementação escalar que processa um único par de operandos de cada vez, para uma implementação vetorial que processa uma operação em múltiplos pares de operandos.

²Code motion consiste na movimentação automática, por parte do compilador, de statements ou expressões presentes num ciclo para fora do mesmo sem afetar a semântica do programa.

do programa sejam sumariadas. É por isso, a base de muitos algoritmos eficientes para transformações de reordenação.

Vamos dividir a explicação da nossa estratégia em duas partes, correspondentes à implementação das dependências de controlo e dependências de dados.

Dependências de controlo

As dependências de controlo diferem um pouco das do CFG, no sentido em que o fluxo das instruções é representado da esquerda para a direita, sendo o nodo pai o nodo que representa a entrada na função e os restantes nodos, correspondentes às instruções no contexto desta função, são conectados a este nodo inicial. Quando um ciclo while ou uma estrutura if são encontrados, é gerada uma sub-árvore, sendo a raiz desta sub-árvore a expressão de controlo da estrutura. Por isso, a estratégia passa também por fazer passar como atributo uma instância de uma classe GrafoPDG (herdado: GrafoPDG g_in; sintetizado: GrafoPDG g_out) por grande parte da AST, uma lista (herdado: TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in; sintetizado: TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out) com o número da instrução inicial, ou quando o contexto mudar (quando um ciclo while ou uma estrutura de controlo if for encontrado) o número da instrução do predicado de controlo dessa estrutura, com o objetivo de conectar as instruções de modo a representar o fluxo de dados pretendido e, finalmente, uma string label (herdado: String label_in; sintetizado: String label_out), "T" se a instrução pertence a um bloco then ou ao bloco de instruções de um while e "F" se pertence a um bloco else. Esta label estará depois associada a uma aresta entre um predicado de controlo e uma instrução.

A classe GrafoPDG é uma extensão à classe Grafo, herdando as variáveis e métodos da classe Grafo, adicionalmente possui uma variável que representa as dependências de dados numa função, ou seja, é um TreeMap que conecta um número de instrução a outros, cujas variáveis referenciadas nessas instruções são dependentes da variável definida na primeira. Mais tarde, quando as dependências de dados forem abordadas, será explicado com mais detalhe esta implementação. Também neste módulo, um grafo é gerado para cada função existente no programa de input.

A lista com o número da última instrução é atualizado sempre que o contexto muda, ou seja, quando uma estrutura while ou if são executadas. Em cada instrução, a lista é utilizada para conectar o número contido nela ao número da nova instrução executada. A lista é inicializada com o número do nodo inicial (0).

Finalmente, a string label é inicializada com uma string vazia e apenas toma o valor "T" quando o bloco then de um statement if ou quando o bloco de instruções de um while é visitado. E toma o valor "F" quando o bloco else de um statement if é visitado. Nos restantes casos, depois de um statement ser visitado esta volta a tomar o valor de string vazia. No final da execução da TG um TreeMap contendo um mapeamento entre o identificador de uma função e o respetivo grafo PDG é retornado à Interface Java (esta será explicada posteriormente).

A implementação das ações associadas à deteção de dependências de controlo, por ser semelhante à do CFG, não será ilustrada. A Tree Grammar pode ser consultada em anexo.

Dependências de dados

Uma dependência de dados existe entre duas instruções sempre que uma variável que é referenciada numa delas possa ter um valor incorreto se a ordem das instruções for trocada. A estratégia encontrada para detetar estas dependências pode ser dividida em duas abordagens distintas:

- Para cada instrução visitada, uma procura de dependências de dados é iniciada a partir dessa instrução comparando com outras instruções antecedentes;
- Sempre que um ciclo while for visitado, a procura de dependências para as instruções pertencentes ao seu bloco são adiadas até que o final do bloco seja atingido, altura em que uma procura a estas instruções é feita com um algoritmo diferente ao anterior, visto tratar-se de um ciclo e a ordem das instruções ser afetada;

Para que as abordagens referidas acima fossem possíveis, foi necessário fazer passar como atributo na TG, para além daqueles já referidos para as dependências de controlo, uma string contexto (herdado: String contexto_in, sintetizado: String contexto_out) para poder distinguir o contexto em que uma instrução é visitada e assim, se essa string contiver "CORPO_FUNCAO", podemos iniciar a procura de dependências, mas se contiver "WHILE", essa procura é adiada, tal como foi explicado na segunda abordagem. Também, para auxiliar a

segunda metodologia, uma lista de números de instrução (herdado: `TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_in`, sintetizado: `TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_out`) vai armazenar os números das instruções que são adicionadas, para que no final do bloco estas possam ser alvo de uma procura de dependências. Finalmente, o último atributo (herdado: `String bloco_if_in`; sintetizado: `String bloco_if_out`) surge da necessidade de distinguir diferentes cenários em que uma dependência pode ser encontrada, estes cenários serão explicados posteriormente, mas estes dependem do bloco de instruções de uma estrutura `if` em que ambas as instruções envolvidas numa dependência se encontram. Este atributo toma o valor "THEN" quando o bloco `then` de um `if` é visitado e "ELSE" quando o bloco `else` é visitado.

O primeiro passo, para que a deteção de dependência de dados fosse possível, foi modificar a inserção de nodos no grafo, isto é, em termos de conteúdo. No CFG, tínhamos mencionado que da classe `Instrucao` apenas nos interessava a própria instrução em si. No PDG, isso já não se verifica e 4 novas variáveis foram adicionadas à classe. Para detetar uma dependência entre duas instruções é necessário sabermos que variáveis são referenciadas e também definidas, por isso, na classe `Instrucao`, foram criados dois `HashSet<String>` (`variaveis_definidas` e `variaveis_referenciadas`) para guardar exatamente essas variáveis. E também como já foi referido, é necessário saber o contexto em que uma instrução surge ("CORPO_FUNCAO" ou "WHILE") e se esta está num bloco `then`, `else` ou em nenhum ("THEN", "ELSE",), por isso, as outras duas variáveis adicionadas à classe foram `String contexto` e `String bloco_if`, respetivamente.

Dos 6 tipos de instrução existentes na linguagem Cmb, as instruções onde existe definição de variáveis são o `scan` (`read`) e a atribuição (`atribuicao`), e em todas as 6 é possível referenciar variáveis. Posto isto, para que na altura da inserção de um novo nodo no grafo, as variáveis definidas e referenciadas estivessem presentes, foi necessário sintetizá-las até cada uma das 6 instruções. De seguida mostramos a produção original da instrução atribuição para auxiliar a explicação.

Listing 13: Produção atribuicao

```
1 atribuicao
2       :      ^('=' ID expr)
3       ;
```

O caso da atribuição é o único caso em que simultaneamente, pode existir definição e referência de variáveis. Neste caso, `ID` é a variável definida e `expr` uma expressão onde podem existir variáveis referenciadas, é, então, necessário fazer chegar através de `expr` as variáveis referenciadas e por isso, o excerto seguinte ilustra a ação criada no SNT `expr` para que tal fosse possível.

Listing 14: Produção expr

```
1 expr returns [String instrucao, HashSet<String> vars_ref]
2   @init {
3       HashSet<String> vf = new HashSet<String>();
4   }
5       :      ^('||' a=expr b=expr)  {$expr.instrucao = $a.instrucao + "||" + $b.instrucao; vf = $a.vars_ref; vf.addAll($b.vars_ref); $expr.vars_ref = vf; }
6       ...
7       |      ^('!' a=expr) {$expr.instrucao = "!" + $a.instrucao; vf = $a.vars_ref; $expr.vars_ref = vf;}
8       |      factor {$expr.instrucao = $factor.instrucao;      $expr.vars_ref = $factor.vars_ref;}
9       ;
```

Podemos observar que o atributo `vars_ref` é sintetizado contendo as possíveis variáveis referenciadas. A produção do SNT `factor` não é aqui ilustrada, mas pode ser consultada em anexo.

Existe mais uma situação onde há definição de variáveis, esta é quando existem parâmetros de entrada numa função. Até agora, o cabeçalho de uma função tinha sido ignorado, mas agora é necessário capturar as variáveis que são passadas como parâmetro e adicioná-las à primeira instrução do grafo, aquela que representa a entrada na função. De seguida é apresentada a produção do SNT `funcao`, onde podemos observar que as variáveis definidas no cabeçalho são passadas como atributo herdado ao corpo da função.

Listing 15: Produção funcao

As produções que sintetizam esse atributo podem ser consultadas em anexo.

Em baixo, está a produção do SNT `corpo_funcao`, onde podemos observar a inserção do nodo inicial, assim como a passagem dos atributos já mencionados ao SNT `statements`.

Listing 16: Produção `corpo_funcao`

```

1 corpo_funcao [GrafoPDG g_in, String id_funcao, HashSet<String> vars_def] returns [
  GrafoPDG g_out]
2   @init{
3       GrafoPDG g = $corpo_funcao.g_in;
4       TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
5       TreeSet<Integer> nrs_while = new TreeSet<Integer>();
6       // 0 <=> Nodo inicial. E passado como parametro para que as restantes
          // instrucoes se liguem a este
7       int nr = g.putNodo(0, new Instrucao("ENTER (" + $corpo_funcao.id_funcao + ")")
          , $corpo_funcao.vars_def, null));
8       nrs.add(nr);
9   }
10   : ^(CORPO declaracoes statements[$corpo_funcao.g_in, "CORPO_FUNCAO", nrs, "",
          nrs_while, ""])
11   {
12       $corpo_funcao.g_out = $statements.g_out;
13   }
14   ;

```

De seguida, é mostrada apenas uma produção `statement`, onde, após processar a instrução, neste caso atribuição, o último nodo executado é conectado à atribuição juntamente com o atributo herdado `label`.

Listing 17: Produção `corpo_funcao`

```

1 statement [GrafoPDG g_in, String contexto_in, TreeSet<Integer>
  nrs_ultima_instrucao_in, String label_in, TreeSet<Integer>
  nrs_instrucao_while_in, String bloco_if_in] returns [GrafoPDG g_out, String
  contexto_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out,
  TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_out, String label_out, String bloco_if_out]
2   @init {
3       GrafoPDG g = $statement.g_in;
4       String cx = $statement.contexto_in;
5       String bi = $statement.bloco_if_in;
6   }
7   :   atribuicao[g, $statement.label_in, cx, nrs_instrucao_while_in, bi]
8       {
9           g = $atribuicao.g_out;
10
11           // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
              // essas instrucoes à nova instrucao
12           g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
              ParNrInstrucaoLabel($atribuicao.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
              $statement.label_in));
13
14           $statement.g_out = g;
15           $statement.contexto_out = cx;
16           $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $statement.
              nrs_ultima_instrucao_in;
17           $statement.label_out = $atribuicao.label_out;
18           $statement.nrs_instrucao_while_out = $atribuicao.
              nrs_instrucao_while_out;
19           $statement.bloco_if_out = bi;
20       }
21   | ...
22   ;

```

As restantes produções do SNT statement são semelhantes, à exceção do whiles, que adiciona um caminho extra, que é do predicado de controlo para si mesmo.

É ao nível dos SNT correspondentes às 6 instruções que a verificação de dependência de dados é feita. Vamos ilustrar 3 casos distintos para demonstrar a nossa implementação.

A próxima produção a ser exibida é a do SNT atribuicao, onde ocorre a inserção de um novo nodo no grafo, como já mencionámos anteriormente e também, onde ocorre a verificação de dependência de dados.

Listing 18: Produção atribuicao

```

1 atribuicao [GrafoPDG g_in, String label_in, String contexto_in, TreeSet<Integer>
  nrs_instrucao_while_in, String bloco_if_in] returns [GrafoPDG g_out, TreeSet<
  Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out, TreeSet<Integer>
  nrs_instrucao_while_out]
2 @init {
3     GrafoPDG g = $atribuicao.g_in;
4     HashSet<String> variaveis_definidas = new HashSet<String>();
5     String cx = $atribuicao.contexto_in;
6     TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while = $atribuicao.nrs_instrucao_while_in;
7     String bi = $atribuicao.bloco_if_in;
8 }
9 :   ^('=', ID {variaveis_definidas.add($ID.text);} expr)
10 {
11     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
12     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
13     nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($ID.text + " = " + $expr.instrucao,
14     variaveis_definidas, $expr.vars_ref, cx, bi)));
15
16     // verifica existencia de dependencia de dados apenas se for uma instrucao
17     // que nao se encontre dentro de um if ou while (contexto "IF" ou "WHILE")
18     if (cx.equals("CORPO_FUNCAO")) {
19         g.checkDependenciasDados(nrs.first());
20     }
21     // se for uma instrucao que se encontre dentro de um while, entao o nr da
22     // instrucao e guardado para ser verificado no final do bloco while
23     if (cx.equals("WHILE")) {
24         nrs_instrucao_while.addAll(nrs);
25     }
26
27     $atribuicao.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
28     $atribuicao.nrs_instrucao_while_out = nrs_instrucao_while;
29     $atribuicao.g_out = g;
30     $atribuicao.label_out = $atribuicao.label_in;
31 }
32 ;

```

Tal como já foi dito, um nodo é inserido no grafo com mais informação, a instrução em si, as variáveis definidas, obtidas do token ID, as variáveis referenciadas, obtidas a partir do SNT expr, e o contexto e o bloco_if obtidos dos atributos herdados pelo SNT atribuicao. Depois, utilizando o atributo herdado contexto_in, se esta atribuição surgir no contexto do corpo da função então verifica a existência de dependências de dados para essa instrução, fazendo uma chamada ao método checkDependenciasDados da instância do grafo passada como atributo herdado. Caso a atribuição surja dentro de um bloco while, então não é feita a verificação e o número da instrução do while é guardado na variável nrs_instrucao_while que será sintetizada no final da execução desta produção.

A produção seguinte é a do SNT ifs, que apenas difere da atribuicao pela existência dos blocos then e else.

Listing 19: Produção ifs

```

1 ifs [GrafoPDG g_in, String contexto_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in,
  String label_in, TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_in] returns [GrafoPDG
  g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out, TreeSet<
  Integer> nrs_instrucao_while_out]

```

```

2 @init {
3     GrafoPDG g = $ifs.g_in;
4     int nr_ult_inst_exp = -1;
5     TreeSet<Integer> nrs_exp = new TreeSet<Integer>();
6     TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while = $ifs.nrs_instrucao_while_in;
7     String cx = $ifs.contexto_in;
8 }
9 :   ~(IF expr
10     {
11         nr_ult_inst_exp = g.putNodo(new Instrucao($IF.text + "(" + $expr.
12             instrucao + ")", null, $expr.vars_ref, cx));
13
14         nrs_exp.add(nr_ult_inst_exp);
15
16         if (cx.equals("CORPO_FUNCAO")) {
17             g.checkDependenciasDados(nrs_exp.first());
18         }
19         if (cx.equals("WHILE")) {
20             nrs_instrucao_while.addAll(nrs_exp);
21         }
22     }
23     a=bloco[g, cx, nrs_exp, "T", nrs_instrucao_while, "THEN"]
24     {
25         g = $a.g_out;
26         if (cx.equals("WHILE")) {
27             nrs_instrucao_while.addAll($a.nrs_instrucao_while_out);
28         }
29     }
30     (b=bloco[g, cx, nrs_exp, "F", nrs_instrucao_while, "ELSE"]
31     {
32         g = $b.g_out;
33         if (cx.equals("WHILE")) {
34             nrs_instrucao_while.addAll($b.nrs_instrucao_while_out);
35         }
36     } )?
37 )
38 {
39     $ifs.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_exp;
40     $ifs.nrs_instrucao_while_out = nrs_instrucao_while;
41     $ifs.g_out = g;
42     $ifs.label_out = $ifs.label_in;
43 }
44 ;

```

As ações executadas após o predicado de controlo são as mesmas que para a atribuição. Ao o bloco de instruções then são passados os mesmo atributos que foram passados em todas as produções que mostrámos, mas com valores diferentes, o número da última instrução executada é o número do predicado de controlo (expressão) para que as instruções do bloco se conectem a essa instrução, a label é passada com o valor "T" para associar aos ramos das conexões que serão criadas, e o bloco_if com o valor "THEN" para identificar as instruções como pertencentes a um bloco then. Após a execução do bloco, se as instruções do if surgirem no contexto de um while então os números que foram guardados no bloco são adicionados a uma variável que será depois sintetizada no final da produção. O bloco else é idêntico, só mudam os valores da label para "F" e o bloco_if para "ELSE".

Finalmente, a última produção é a do SNT whiles, onde no final da execução dos SNT do lado direito da produção, caso o ciclo while tenha surgido no contexto do corpo da função (isto é, se existirem whiles aninhados, todas as instruções internas são adiadas até ao final do mais externo), é feita a verificação da existência de dependências de dados para as instruções que foram adiadas.

Listing 20: Produção whiles


```

1  whiles [GrafoPDG g_in, String contexto_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in,
    String label_in, TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_in, String bloco_if_in]
    returns [GrafoPDG g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String
    label_out, TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_out]
2  @init {
3      GrafoPDG g = $whiles.g_in;
4      int nr_ult_inst_exp = -1;
5      TreeSet<Integer> nrs_exp = new TreeSet<Integer>();
6      TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while = $whiles.nrs_instrucao_while_in;
7      String cx = $whiles.contexto_in;
8      String bi = $whiles.bloco_if_in;
9  }
10 :    ^(WHILE expr
11     {
12         nr_ult_inst_exp = g.putNodo(new Instrucao($WHILE.text + "(" + $expr.
            instrucao + ")", null, $expr.vars_ref, "WHILE", bi));
13         nrs_exp.add(nr_ult_inst_exp);
14         nrs_instrucao_while.addAll(nrs_exp);
15     }
16     bloco[g, "WHILE", nrs_exp, "T" ,nrs_instrucao_while, bi]
17     {
18         g = $bloco.g_out;
19         nrs_instrucao_while.addAll($bloco.nrs_instrucao_while_out);
20     })
21     {
22         if (cx.equals("CORPO_FUNCAO")) {
23             g.checkDependenciasDadosWhile(nrs_instrucao_while);
24             nrs_instrucao_while.clear();
25         }
26
27         $whiles.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_exp;
28         $whiles.nrs_instrucao_while_out = nrs_instrucao_while;
29         $whiles.g_out = g;
30         $whiles.label_out = $whiles.label_in;
31     }
32 ;

```

Nesta produção a verificação de dependências de todas as instruções pertencentes ao while, inclusive o predicado de controlo são adiadas até ao final da produção. Ao bloco de instruções é passado o atributo contexto_in com o valor "WHILE", que obriga ao adiamento da verificação de dependências das instruções no bloco, o atributo nrs_ultima_instrucao_in com o número de instrução do predicado de controlo (expressão) e o atributo label_in com o valor "T"(todas as instruções de um bloco while têm no caminho criado do predicado de controlo para si a label "T"). Por fim, a verificação de dependências de dados é feita fazendo uma chamada ao método checkDependenciasDadosWhile da instância do grafo.

A Tree Grammar completa pode ser consultada em anexo.

A explicação dos métodos de verificação de existência de dependência de dados mencionados nesta secção será feita na secção seguinte.

Deteção de dependências de dados

Nesta secção explicaremos os métodos de deteção de dependências de dados criados. Tal como foi dito na secção anterior, existem dois métodos que são chamados na Tree Grammar, um método (checkDependenciasDados) que deteta as dependências para instruções fora de um ciclo while e um método (checkDependenciasDadosWhile) para instruções dentro de um ciclo while.

Foram identificados vários cenários que permitem a deteção de dependências apenas em determinadas circunstâncias. Estes cenários representam uma possível dependência entre duas instruções A e B, sendo que uma variável referenciada em B pode depender de uma definida em A.

Os cenários são:

1. B encontra-se fora de uma estrutura if, ou seja, não se encontra num bloco then ou else
2. B pertence a um bloco then
3. B pertence a um bloco else

Os cenários mencionados são conjugados com um dos cenários seguintes:

4. A pertence ao corpo da função (não pertence a nenhum tipo de bloco)
5. A pertence a um ciclo while
6. A pertence a um bloco then
7. A pertence a um bloco else

O método `checkDependenciasDados` recebe como parâmetro o número de instrução de B, e para cada variável referenciada em B inicia a procura de dependências de dados percorrendo as instruções precedentes, para isso invocando o método com o mesmo identificador mas com variáveis diferentes (princípio do polimorfismo presente no Java e noutras linguagens orientadas a objetos). Estas variáveis são, pela ordem respetiva, o número da instrução cuja variável definida está a ser comparada, o número da instrução sobre a qual se está a procurar dependências, a variável sobre a qual se está a procurar dependências e uma variável de controlo. A implementação em Java é ilustrada a seguir:

Listing 21: Método `checkDependenciasDados`

```

1 public void checkDependenciasDados(int nr_instrucao){
2     Instrucao i = this.getNodos().get(nr_instrucao);
3
4     // para cada variavel referenciada na instrucao passada por
      parametro
5     for (String var_ref : i.getVariaveis_referenciadas()){
6         boolean dep_encontrada = false;
7         boolean procurar_fora_bloco = false;
8         // inicia a procura a partir da instrucao imediatamente anterior
          À instrucao nr_instrucao
9         int inst_comp = nr_instrucao-1;
10        // procura enquanto nenhuma dependencia for encontrada, ou ate
          todas as instrucoes da funcao tiverem sido comparadas
11        while (!dep_encontrada && inst_comp>=0) {
12            ParDependenciaInstrucao p = checkDependenciasDados(inst_comp
              , nr_instrucao, var_ref, procurar_fora_bloco);
13            dep_encontrada = p.isExiste_dependencia();
14            inst_comp = p.getInstrucao_seguinte();
15            procurar_fora_bloco = p.isProcurar_fora_bloco();
16        }
17    }
18 }
```

E o método de deteção de dependência de dados entre duas instruções, com base nos cenários mencionados, fica com a seguinte estrutura (apenas mostramos a estrutura base, não pusemos o código completo):

Listing 22: Método `ParDependenciaInstrucao`

```

1 public ParDependenciaInstrucao checkDependenciasDados(int nodo_anterior, int
      nodo_posterior, String var_ref, boolean procurar_fora_bloco){
2     Instrucao i = this.getNodos().get(nodo_anterior);
3     Instrucao i_post = this.getNodos().get(nodo_posterior);
4
5 }
```

```

6      // CENARIO - 1
7      if ((!i_post.getBloco_if().equals("THEN") && !i_post.getBloco_if().
      equals("ELSE")) || procurar_fora_bloco) {
8          // CENARIO - 5
9          if (i.getContexto().equals("WHILE")){ ... }
10         // CENARIO - 4
11         else if (!i.getBloco_if().equals("THEN") && !i.getBloco_if().equals(
            "ELSE")) { ... }
12         // CENARIO - 7
13         else if (i.getBloco_if().equals("ELSE")) { ... }
14         // CENARIO - 6
15         else if (i.getBloco_if().equals("THEN")) { ... }
16     }
17     // CENARIO - 3
18     else if (i_post.getBloco_if().equals("ELSE")) { ... }
19     // CENARIO - 2
20     else if (i_post.getBloco_if().equals("THEN")) { ... }
21 }

```

De seguida, para cada cenário vamos explicitar o que acontece, deixando os detalhes de implementação para consulta do código em anexo.

No cenário 5 (A pertence a um ciclo while) são procuradas dependências nas instruções pertencentes ao bloco while, parando a procura quando uma dependência for encontrada e adicionado-a ao grafo. Uma dependência encontrada apenas num bloco else não implica que a procura pare porque é ainda possível encontrar uma dependência em instruções anteriores, por isso é também feita uma procura no bloco then. Se uma dependência for encontrada tanto no bloco then como no bloco else, então a procura para, porque qualquer instrução anterior à estrutura if não influenciará B, caso contrário continua a procura (este comportamento é o que acontece no cenário 7). Caso se encontre uma dependência apenas no bloco then, a procura não para (este comportamento é o que acontece no cenário 6).

Independentemente de uma dependência ser encontrada dentro do bloco while, também é iniciada uma procura de dependências a partir da instrução imediatamente anterior ao predicado de controlo do ciclo while.

O cenário 4 (A pertence ao corpo da função (não pertence a nenhum tipo de bloco)) é o mais simples, pois se uma dependência for encontrada esta é inserida no grafo e a procura para.

Os cenários 6 (A pertence a um bloco then) e 7 (A pertence a um bloco else) já foram explicados no cenário 5.

No cenário 3 (B pertence a um bloco else), como a instrução B pertence a um bloco else, nunca poderá depender de uma instrução pertencente ao bloco then desse mesmo if. Por isso, se uma dependência for encontrada dentro do bloco a procura para e a dependência é inserida no grafo, caso contrário a procura continua a partir do predicado de controlo desse if.

O cenário 2 (B pertence a um bloco then) é semelhante ao 3, ou seja, se uma dependência for encontrada no interior do bloco then então a procura para e a dependência é inserida no grafo, caso contrário a procura continua a partir do predicado de controlo desse if.

O método `checkDependenciasDadosWhile`, ou seja, o método que deteta as dependências para instruções dentro de um ciclo while, recebe como parâmetro um `TreeSet<Integer>` com os números de instrução contidos no ciclo while incluindo o predicado de controlo. Esse `TreeSet` é percorrido por ordem decrescente, ou seja, começa da última instrução e termina no predicado de controlo. Vamos considerar B o número de instrução em cada iteração. Para cada variável referenciada em B é iniciada uma procura de dependências de dados, comparando B com todas as instruções presentes no ciclo, iniciando a procura no próprio B e avançando para instruções anteriores. Quando o predicado de controlo for atingido e ainda houver instruções para procurar, então a procura continua na última instrução do ciclo e para na instrução imediatamente a seguir a B. Quando uma dependência for encontrada a procura para e inicia uma nova procura para as restantes variáveis referenciadas em B. Se não houver mais variáveis então avança para a instrução anterior a B e assim sucessivamente até que todas as instruções tenham sido verificadas.

À semelhança do método anterior, este também possui uma estratégia baseada nos cenários apresentados anteriormente. Por isso, a estrutura do método é apresentada de seguida.

Listing 23: Método ParDependenciaInstrucao

```

1  public void checkDependenciasDadosWhile(TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while
    ){
2      for (int inst_dependente : nrs_instrucao_while.descendingSet()){
3          Instrucao i = this.getNodos().get(inst_dependente);
4          for (String var_ref : i.getVariaveis_referenciadas()){
5              int inst_comp = inst_dependente;
6              while(nr_inst_comparadas <= nr_inst_a_comparar && !
                dep_encontrada){
7                  Instrucao i_comp = this.getNodos().get(inst_comp);
8
9                  // CENARIO 1
10                 if ((!i.getBloco_if().equals("THEN") && !i.getBloco_if().
                    equals("ELSE")) || proc_fora_bloco) {
11                     // CENARIO 4
12                     if (!i_comp.getBloco_if().equals("THEN") && !i_comp.
                        getBloco_if().equals("ELSE")) { ... }
13                     // CENARIO 7
14                     else if (i_comp.getBloco_if().equals("ELSE")) { ... }
15                     // CENARIO 6
16                     else if (i_comp.getBloco_if().equals("THEN")) { ... }
17                 }
18                 // CENARIO 3
19                 else if (i.getBloco_if().equals("ELSE")) { ... }
20                 // CENARIO 2
21                 else if (i.getBloco_if().equals("THEN")) { ... }
22
23                 // atualiza inst_comp
24                 ...
25             }
26             // insere possiveis dependencias encontradas na procura, mas que
                so podem ser confirmadas no final da procura
27             ...
28
29             // inicia a procura a partir da instrucao imediatamente anterior
                a expressao do while
30             ...
31         }
32     }
33 }

```

Pode-se observar a iteração sobre todas as instruções do ciclo while (1º for), a iteração sobre as variáveis referenciadas em B (2º for) e a procura de dependências de dados percorrendo as instruções iniciando em B (while).

De seguida, para cada cenário vamos explicitar o que acontece, deixando os detalhes de implementação para consulta do código em anexo.

O cenário 4 (A pertence ao corpo da função (não pertence a nenhum tipo de bloco)) não é tão simples como no método anterior, porque existem algumas exceções que precisam de se ter em conta. A primeira exceção é a possibilidade de a instrução poder depender dela própria, no entanto, isto só é possível se mais nenhuma dependência para além dessa tiver sido encontrada, por isso, a dependência não é inserida de imediato e a sua inserção é adiada para o final da verificação das dependências para B. Outra exceção depende da ordem das instruções, ou seja, se o número de instrução de A for menor que B então não há necessidade de procurar mais, nem dentro nem fora do while e por isso uma flag é ativada para que tal procura fora do while seja ou não seja

realizada. Finalmente, se nenhuma destas exceções se verificar, e uma dependência for encontrada então esta é inserida no grafo e a procura para.

No cenário 7 (A pertence a um bloco else) é necessário a procura tanto no bloco else como no then, já que, por ser um ciclo, uma instrução pode depender tanto de um bloco como do outro. Uma dependência encontrada num bloco é imediatamente inserida no grafo. Se em ambos os blocos forem detetadas dependências então a procura para. Neste cenário também existe a exceção da ordem das instruções, ou seja, a dependência encontrada, quer a instrução seja no bloco then ou else, se for anterior a B então a procura para.

No cenário 6 (A pertence a um bloco then) a procura é feita no bloco then e se for encontrada uma dependência esta é inserida no grafo. Quer encontre uma dependência ou não, a procura continua nas instruções imediatamente anteriores.

No cenário 3 (B pertence a um bloco else), se uma dependência for encontrada dentro do bloco else, então a procura para. Se uma dependência for encontrada no bloco then, esta não é inserida imediatamente porque se existir uma dependência fora do if, essa dependência entre os blocos deixa de fazer sentido. Existe uma exceção neste cenário que dita que pode existir uma dependência de B para B, apenas se nenhuma dependência for encontrada no bloco then.

No cenário 2 (B pertence a um bloco then) se uma dependência for encontrada no interior do bloco then então a procura para e a dependência é inserida no grafo, caso contrário a procura continua a partir do predicado de controlo desse if. Se a dependência encontrada for uma dependência dela própria, esta não é inserida de imediato, aguardando até ao final da procura no ciclo para garantir que outra dependência não foi encontrada.

As classes Java podem ser consultadas em anexo.

Exemplo de um grafo PDG gerado:

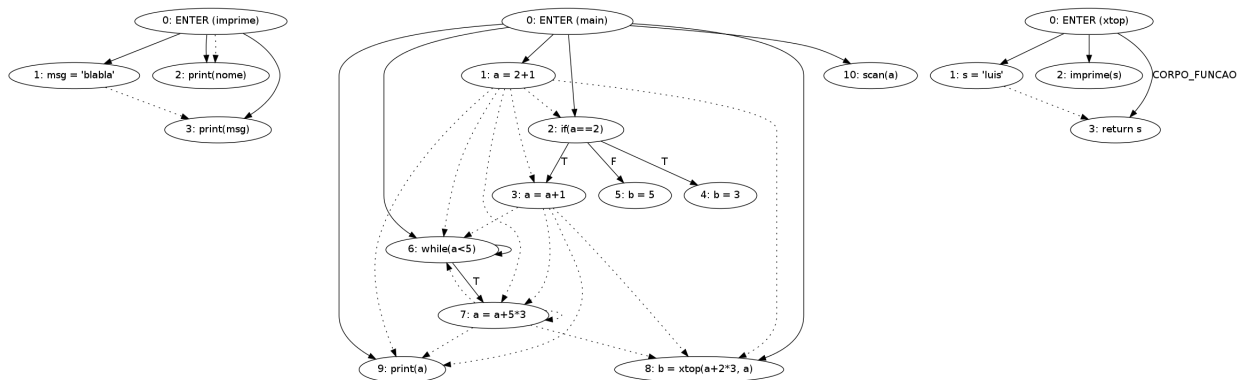


Figura 2: Grafo PDG

4.2.3 System Dependency Graph

Um System Dependency Graph é uma representação de um programa com uma estrutura idêntica ao PDG mas com outra informação. Neste tipo de grafos temos a representação do fluxo das instruções, as dependências de dados, as chamadas de funções e a passagem de parâmetros.

Aqui as verificações que são realizadas são geralmente na passagem de parâmetros quando ocorre a invocação de outras funções do sistema. A optimização pode ocorrer, por exemplo, quando a invocação de uma função é feita sempre com os mesmos parâmetros.

Para a implementação deste módulo apoiamos-nos na estrutura já criada para o PDG adicionando alguns atributos à gramática e criando novas classes para guardar a informação.

É essencial guardar o cabeçalho de uma função para sabermos que argumentos são esperados e o valor que será retornado. O atributo `TreeMap<String, CabecalhoFuncao> funcoes_out` que existe na produção `funcao` da gramática é responsável por armazenar tudo o que precisamos de saber para invocar uma função. O `TreeMap<String, CabecalhoFuncao>` tem como chave o nome da função (logo partimos do princípio que não

há funções com o mesmo nome) e o valor é uma instância de `CabecalhoFuncao`, esta classe guarda o nome da função, o tipo de retorno e ainda os parametros com a respectiva ordem.

É na produção `cabecalho` que se consegue obter o que necessitamos:

Listing 24: Produção cabecalho

```

1 cabecalho [GrafoSDG g_in] returns [GrafoSDG g_out, String id, HashSet<String>
   vars_def, String nomeFuncao_out]
2 @init{
3     HashSet<String> variaveis_definidas = new HashSet<String>();
4     TreeMap<Integer, String> parms = new TreeMap<Integer, String>();
5 }
6 : ^((CAEBECALHO tipo ID (argumentos{variaveis_definidas = $argumentos.vars_def;
   parms = $argumentos.parms_out; }))?
7 {
8     $cabecalho.id = $ID.text;
9     $cabecalho.vars_def = variaveis_definidas;
10
11     // cria uma instancia para guardar a informacao do cabecalho da funcao
12     CabecalhoFuncao cf = new CabecalhoFuncao();
13     cf.setNomeFuncao($ID.text);
14     cf.setTipoRetorno($tipo.text_out);
15     if($argumentos.parms_out != null){
16         cf.setParametros($argumentos.parms_out);
17     }
18     // adiciona o cf ao GrafoSDG
19     $cabecalho.g_in.putCabecalhoFuncao(cf);
20     $cabecalho.g_out = $cabecalho.g_in;
21 }
22 ;

```

É na produção `argumentos` que se obtêm os parametros e se calcula a ordem pela qual aparecem.

Listing 25: Produção argumentos

```

1 argumentos returns [HashSet<String> vars_def, TreeMap<Integer, String> parms_out]
2 @init{
3     HashSet<String> variaveis_definidas = new HashSet<String>();
4     // variavel para guardar os parametros
5     TreeMap<Integer, String> parms = new TreeMap<Integer, String>();
6     // inteiro que indica a ordem do parametro
7     Integer i = 0;
8 }
9 : ^((ARGUMENTOS (declaracao { variaveis_definidas.add($declaracao.var_def); parms
   .put(i, $declaracao.var_def); i = i+1;}
10 )+)
11 { $argumentos.vars_def = variaveis_definidas;
12     // sintetiza o TreeMap com os parametros
13     $argumentos.parms_out = parms;
14 }
15 ;

```

A classe `GrafoSDG` agora utilizada, é um `extends` da classe `GrafoPDG` em que se acrescentou as variáveis de instância necessárias para guardar as invocações e os cabecinhos das funções.

Já recolhemos a estrutura das funções, agora precisamos de ver quando ocorre uma invocação e arranjar uma forma para fazer um *mapping* entre o cabecalho e a função.

A estratégia foi criar uma classe chamada `ChamadasFuncao` onde é registado o número da instrução, o nome da função invocada, as variáveis que podem ser retornadas e ainda os parametros com a respectiva ordem. Através da classe `CabecalhoFuncao` e `CahamdasFuncao` e tendo em conta as suas variáveis de instância, verificamos que é agora possível fazer um *mapping* entre as invocações de um função com a respectiva função. De seguida é apresentada a forma utilizada para detectar as invocações.

Como não poderia deixar de ser, na própria produção `invocacao` é registrada a chamada a uma função, no entanto não é possível registrar tudo aqui, isto porque se a invocação não for uma instrução isolada (ou seja, se estiver na condição de um `if` ou de `while` por exemplo) temos de sintetizar alguma informação recolhida neste ponto até à produção onde já temos tudo o que é necessário.

Listing 26: Produção instrução

```

1 invocacao [GrafoSDG g_in, String contexto_in, String label_in, TreeSet<Integer>
  nrs_instrucao_while_in, String bloco_if_in] returns [GrafoSDG g_out, TreeSet<
  Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String instrucao, String label_out, HashSet<
  String> vars_ref, TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while_out, ChamadasFuncao
  cFuncao_out]
2 @init {
3   GrafoSDG g = $invocacao.g_in;
4   HashSet<String> variaveis_referenciadas = new HashSet<String>();
5   String cx = $invocacao.contexto_in;
6   TreeSet<Integer> nrs_instrucao_while = $invocacao.nrs_instrucao_while_in;
7   String bi = $invocacao.bloco_if_in;
8 }
9 : ^(INVOCACAO ID (args
10   {
11     variaveis_referenciadas = $args.vars_ref;
12   }
13   )?)
14 {
15   if (cx.equals("FACTOR")) {
16     $invocacao.instrucao = $ID.text + "(" + $args.ags + ")";
17     $invocacao.vars_ref = variaveis_referenciadas;
18
19     ChamadasFuncao cf_t = new ChamadasFuncao();
20     cf_t.setNomeFuncao($ID.text);
21     cf_t.setParametros($args.parametros_out);
22
23     $invocacao.cFuncao_out = cf_t;
24   }
25   else {
26     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
27     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
28     Integer numero_instrucao = g.putNodo(new Instrucao($ID.text + "(" + $args
29       .ags + ")", null, variaveis_referenciadas, cx, bi));
30     nrs.add(numero_instrucao);
31
32     ChamadasFuncao cf = new ChamadasFuncao();
33     cf.setNrInstrucao(numero_instrucao);
34     cf.setNomeFuncao($ID.text);
35     cf.setParametros($args.parametros_out);
36     g.putChamadaFuncao(numero_instrucao, cf);
37
38     $invocacao.cFuncao_out = null; // jÃ; estÃ; adicionado
39
40     ...
41
42     $invocacao.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
43     $invocacao.nrs_instrucao_while_out = nrs_instrucao_while;
44     $invocacao.g_out = g;
45     $invocacao.label_out = $invocacao.label_in;
46   }
47 }

```

Caso a invocação venha do contexto "FACTOR" (vai entrar no Then do IF) é necessário sintetizar a instância da classe `ChamadasFuncao` para uma produção onde se consiga saber o número da instrução onde ocorre.

Mesmo em `factor` não se consegue saber, por isso continua a sintetizar a chamada da função (CF):

Listing 27: Produção função

```
1 factor returns [String instrucao, HashSet<String> vars_ref, ChamadasFuncao
  cFuncao_out]
2 @init {
3     HashSet<String> variaveis_ref = null;
4 }
5 ...
6 | invocacao[null, "FACTOR", "", null, ""]
7 {
8     $factor.instrucao = $invocacao.instrucao;
9     $factor.vars_ref = $invocacao.vars_ref;
10    $factor.cFuncao_out = $invocacao.cFuncao_out;
11 }
12 ;
```

O mesmo acontece na `expr`:

Listing 28: Produção expr

```
1 expr returns [String instrucao, HashSet<String> vars_ref, ChamadasFuncao cFuncao_out]
2 @init {
3     HashSet<String> vf = new HashSet<String>();
4 }
5 ...
6 | factor {$expr.instrucao = $factor.instrucao; $expr.vars_ref = $factor.
  vars_ref; $expr.cFuncao_out = $factor.cFuncao_out; }
7 ;
```

Depois da produção `expr` sintetizar a CF, vamos estar perante outras produções em que já é possível obter o número da instrução. Essas produções são: atribuição, `write`, `ifs` e `whiles`, só não é o `read` porque como é óbvio não é possível ler do standard input para uma função. Nas produções referidas existe em todas algo como:

Listing 29: Produção expr

```
1 // caso exista vai adicionar uma invocacao a uma funcao
2 if($expr.cFuncao_out != null){
3     $expr.cFuncao_out.setNrInstrucao(nr_ult_inst_exp);
4     g.putChamadaFuncao(nr_ult_inst_exp, $expr.cFuncao_out);
5 }
```

A partir deste momento já temos registado todas as funções e todas as invocações que existem, o que se seguiu vou apenas criar um método que recebesse uma instância da classe `GrafoSDG` e gerar linguagem `Dot` para desenhar um grafo que representasse graficamente o resultado.

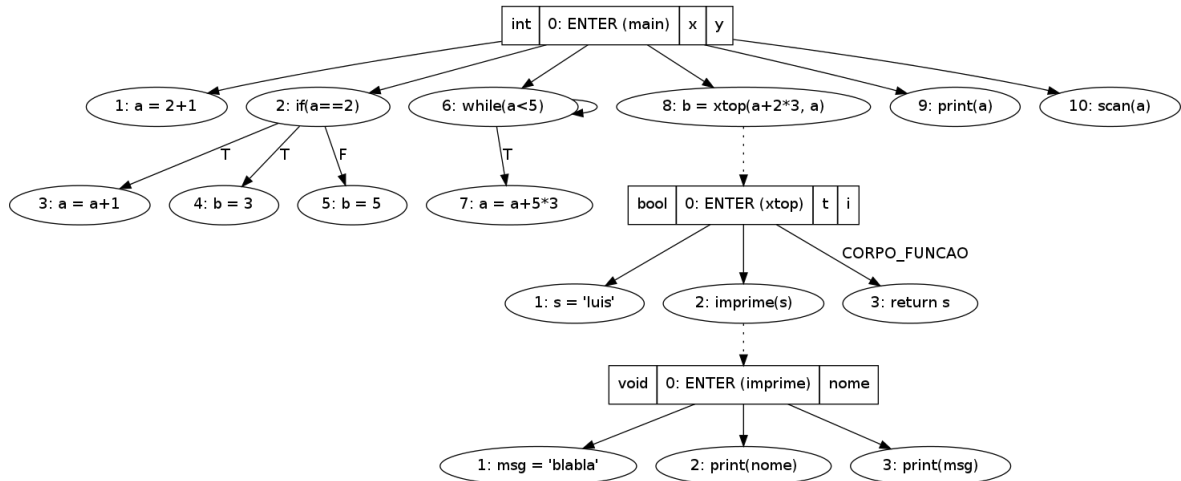


Figura 3: Grafo SDG

Analisando o grafo gerado, podemos verificar que algumas ligações não estão representadas mas estão implícitas, no caso dos argumentos, visto que foram colocados pela mesma ordem não achamos necessário estar a colocar. No entanto a ligação do "return" para a variável que está a invocar a função é que não está implementada, falta concluir este pormenor.

4.2.4 Single Static Assignment

Single Static Assignment (SSA) é uma propriedade de uma representação intermédia (RI), que diz que cada variável é definida uma vez. As variáveis que já existem na RI original são divididas em versões, em que as novas variáveis são normalmente representadas pelo nome original seguida de um dígito. Mostrando alguns exemplos verificamos que os benefícios são relativamente simples de detectar.

Se tivermos definido:

```
a = 3
a = 14
b = a
```

À primeira vista reparamos logo que a primeira atribuição é desnecessária, se passarmos o código para o formato SSA ele ficará:

```
a1 = 3
a2 = 14
b1 = a2
```

Se estivermos perante um bom compilador, ele agora irá detectar que a primeira instrução não é necessária e que o "b" irá tomar o valor de "a2".

A ideia inicial era criar um texto igual ao de entrada mas no formato SSA, no entanto o que nós fizemos foi um grafo como o CFG mas com as instruções no formato SSA.

Para resolver o problema criamos a classe **GrafoTGSSA** que é uma extensão da classe **Grafo**, nesta classe temos definidos:

Listing 30: Classe GrafoTGSSA

```
1 // variavel => versao
2 private TreeMap<String, Integer> versoesVariaveis;
3
```

```

4 // onde esta guardado o contexto onde as versoes das variaveis foram
   encontradas
5 // a1 => If_THEN; a2 => IF_ELSE
6 private TreeMap<String, String> contextoVariaveis;

```

em `versoesVariaveis` guardamos a variável com o número da última versão que foi definida, enquanto que na variável de instância `contextoVariavel` fica guardado a variável com a respectiva versão e o contexto em que ela foi definida. Isto de ter o contexto é necessário por exemplo para o caso em que a seguir a um "IF" temos uma variável que está a ser definida no "THEN" ou no "ELSE", nesta situação o que estiver a seguir ao "IF" não vai saber de onde é que vem o valor calculado, pode ser de um dos 2.

Para resolver o problema começamos por identificar onde é que as variáveis podem ser definidas e chegamos à conclusão que podem em: read e atribuição. Logo, é nestas produções que a versão de uma variável vai ser alterada:

Listing 31: Produção atribuição e read

```

1 atribuicao [GrafoTGSSA g_in, String label_in, String contexto_in] returns [GrafoTGSSA
   g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
2 @init {
3     GrafoTGSSA g = $atribuicao.g_in;
4 }
5 : ^('=' ID expr[g, $atribuicao.contexto_in])
6 {
7     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
8     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
9     Integer i_id = $atribuicao.g_in.getVersaoVariavelNext($ID.text);
10    nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($ID.text + " = " + $expr.instrucao, null,
        null, "", "", $ID.text + i_id + " = " + $expr.instrucaoVersao)));
11
12    //como ha uma atribuicao, a versao da variavel vai ter de ser incrementada
13    Integer i = g.incrementaVariavel($ID.text);
14
15    //vai adicionar a variavel e dizer qual e o contexto onde se encontra
16    g.adicionaVariavelContexto($ID.text + i, $atribuicao.contexto_in);
17    //System.out.println(g_in.getContextoVariaveis());
18
19    ...
20 }
21 ;
22
23
24
25 read [GrafoTGSSA g_in, String label_in, String contexto_in] returns [GrafoTGSSA
   g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
26 @init {
27     GrafoTGSSA g = $read.g_in;
28 }
29 : ^(READ ID)
30 {
31     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
32     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
33    nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($READ.text + "(" + $ID.text + ")", null, null
        )))
34
35    //como ha uma atribuicao, a versao da variavel vai ter de ser incrementada
36    Integer i = g.incrementaVariavel($ID.text);
37
38    // vai adicionar a variavel e dizer qual e o contexto onde se encontra
39    g.adicionaVariavelContexto($ID.text + i, $read.contexto_in);
40    ...
41 }

```

Quando se chama o método `incrementaVariavel(ID.text)` ele vai automaticamente incrementar no `TreeMap` `versoesVariaveis` a versão daquela variável e devolve o valor da actual versão. De seguida adicionamos à estrutura onde estão os contextos o que nos interessa para no final conseguirmos fazer todas as verificações necessárias (`adicionaVariavelContexto(ID.text + i, atribuicao.contexto_in)`).

Com toda a informação guardada que é necessária, bastou criar um método que calcula-se quais as dependências que podiam existir para uma variável, esse método está definido na classe `GrafoTGSSA` e chama-se `getVersaoVariavelDependentes`, recebe como parametro uma variável e vai verificar no que já está definido e tendo em conta o contexto as variáveis das quais o seu valor pode depender.

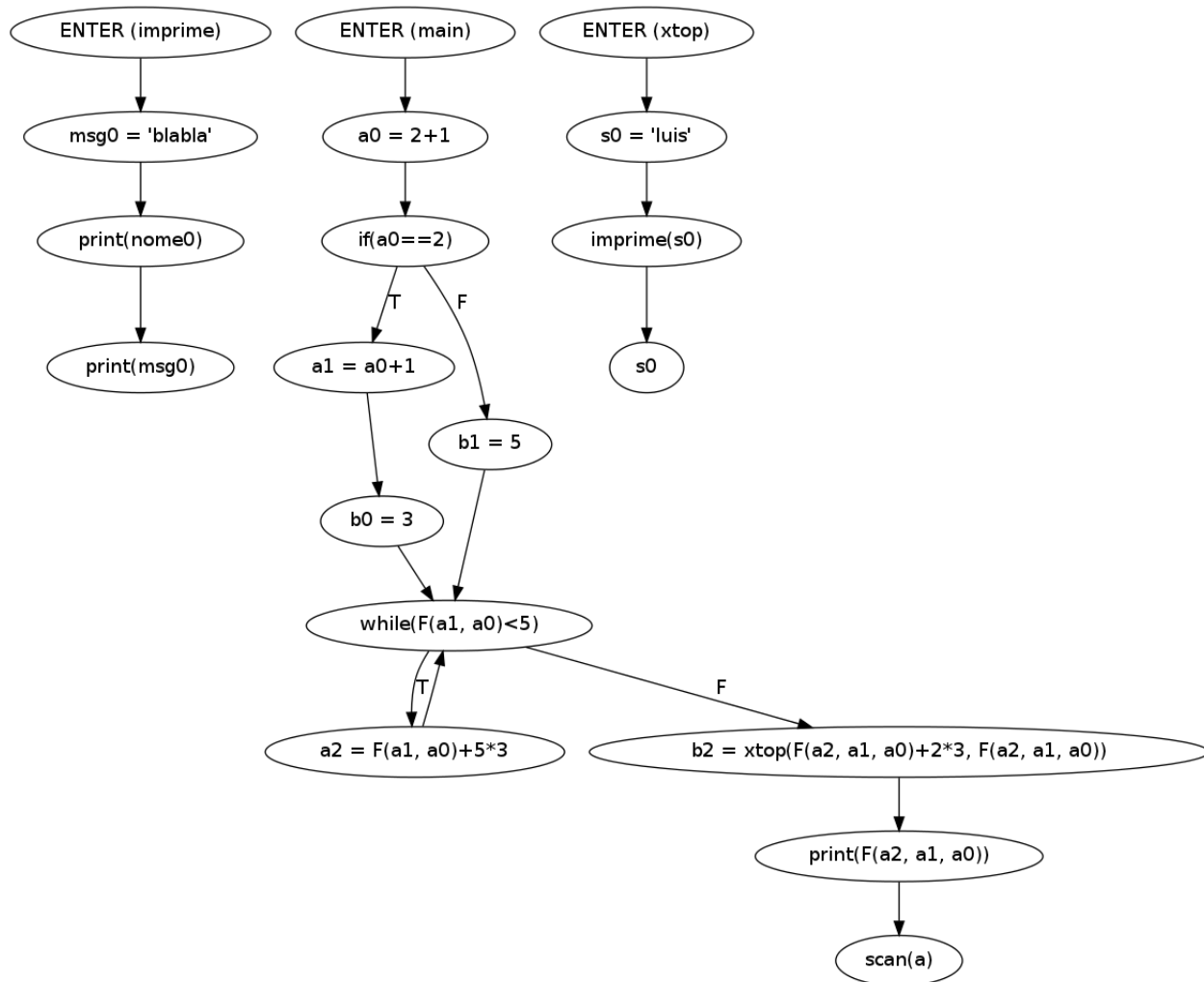


Figura 4: Grafo SSA

Nota: No grafo a letra "F" dentro dos nodos representa o símbolo phi.

5 WebSite

Foi dada a sugestão de criar um pequeno site com páginas para mostrar os resultados, o que nós fizemos foi colocar um formulário para submeter o código que é pretendido analisar e depois o resultado é mostrado nas correspondentes opções do menu.

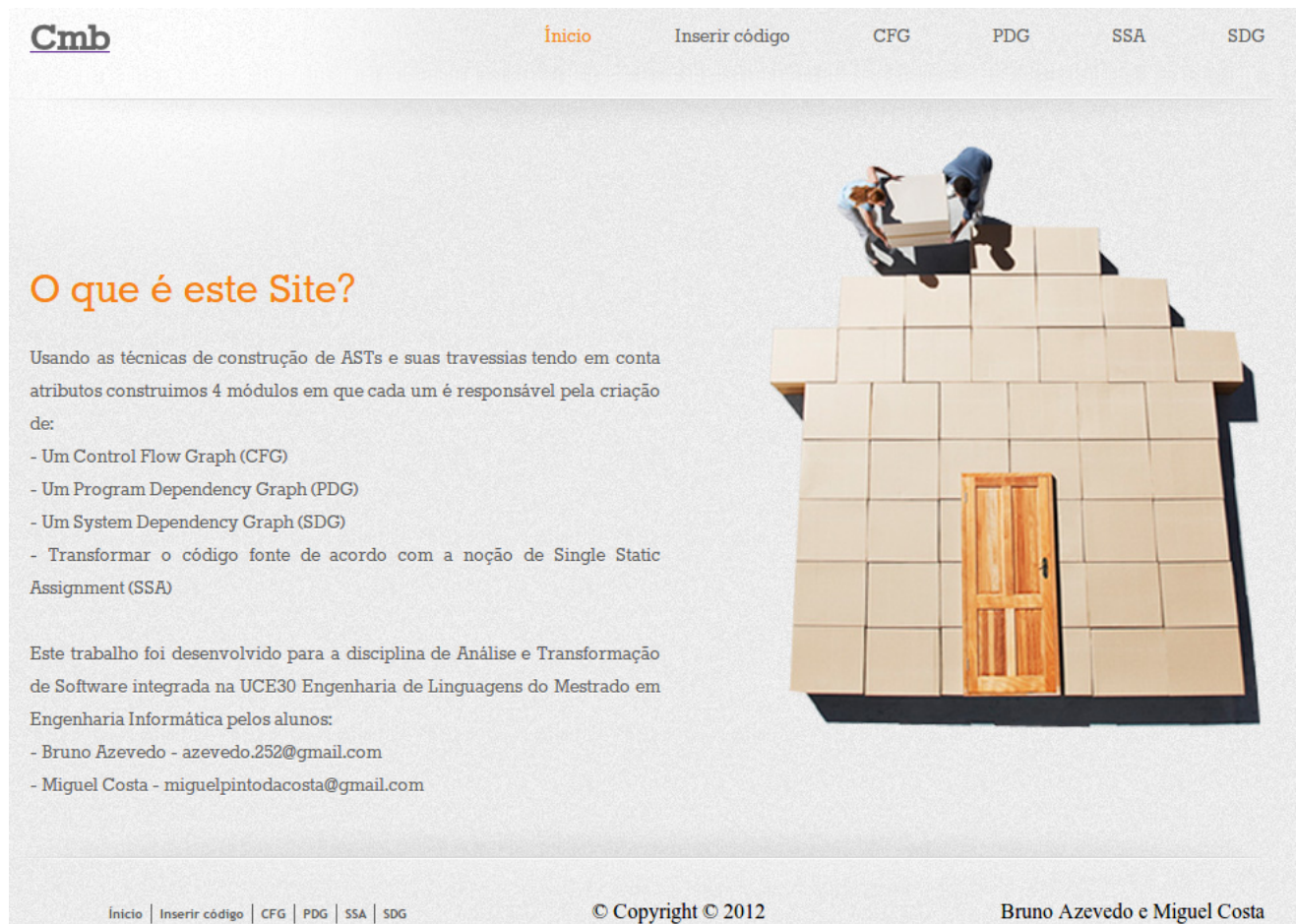


Figura 5: Página inicial

Esta é a página inicial apenas, em baixo aparece a página para se submeter o código a analisar:

Cmb

Ínicio

Inserir código

CFG

PDG

SSA

SDG

Texto de entrada:

```
void imprime(string nome)
{
    string msg;
    msg = "blabla";
    print (nome);
    print (msg);
}

int main(int x, int y)
{
    int a;
    int b;

    a=2+1;

    if(a==2) {
        a = a + 1;
        b = 3;
    }
    else
        b = 5;

    while (a<5)
    {
        a = a+5 * 3;
    }
}
```

submeter

Ínicio | Inserir código | CFG | PDG | SSA | SDG

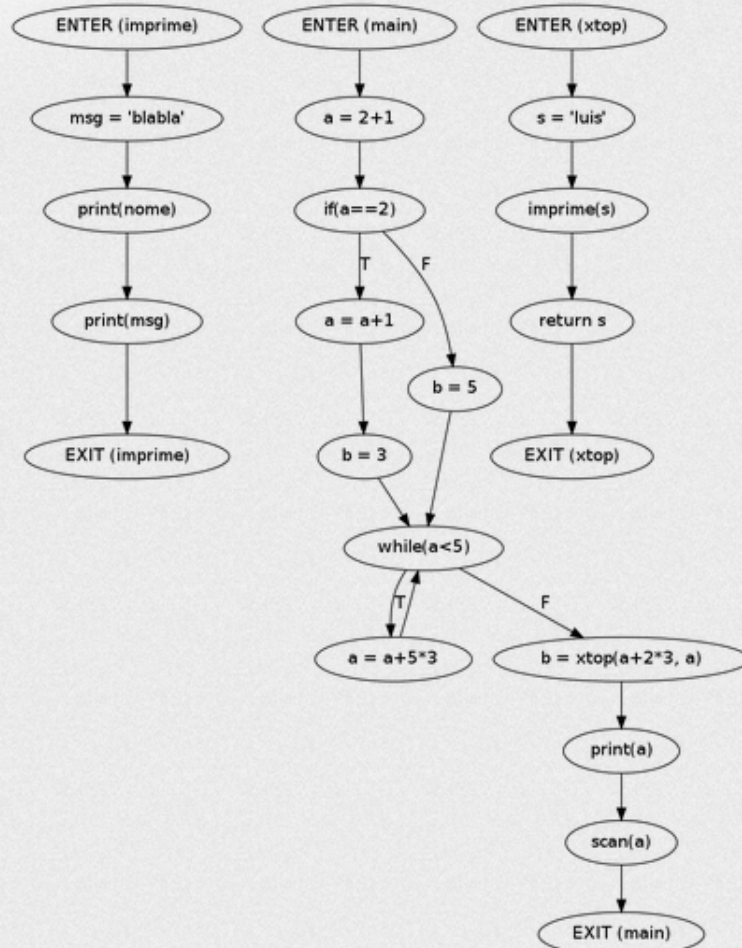
© Copyright © 2012

Bruno Azevedo e Miguel Costa

Figura 6: Página de submissão do código

Depois de submetido o código, é possível ver os resultados que se pretende escolhendo CFG, PDG, SSA ou SDG nas categorias disponíveis.

Control Flow Graph (CFG)

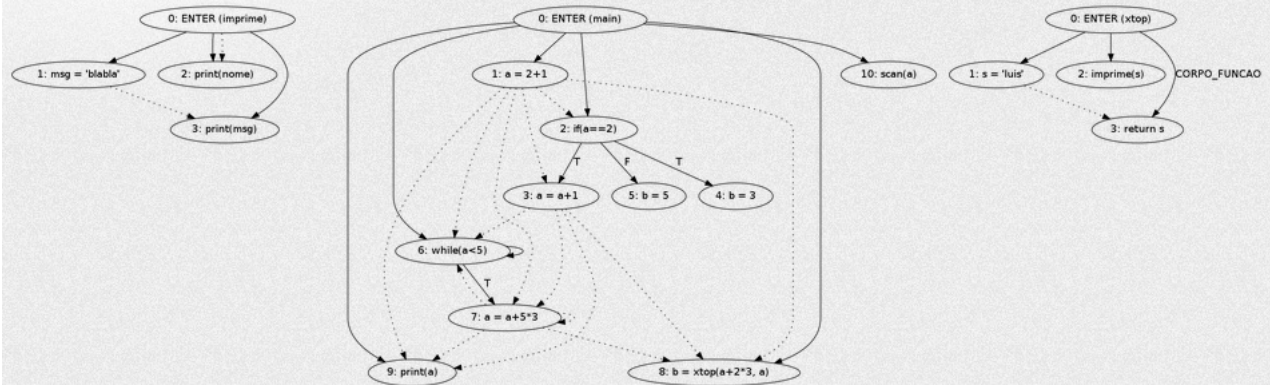


```
void imprime(string nome)
{
    string msg;
    msg = "blabla";
    print (nome);
    print (msg);
}

int main(int x, int v)
```

Figura 7: Página do CFG

Program Dependency Graph (PDG)



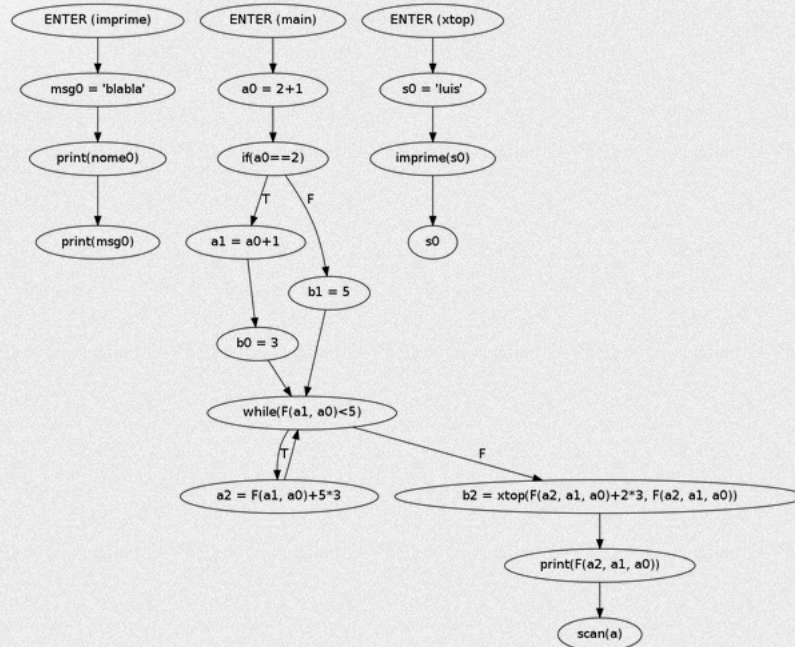
```
void imprime(string nome)
{
    string msg;
    msg = "blabla";
    print (nome);
    print (msg);
}

int main(int x, int y)
{
    int a;
    int b;

    a=2+1;
```

Figura 8: Página do PDG

Single Static Assignment (SSA)



```

void imprime(string nome)
{
    string msg;
    msg = "blabla";
    print (nome);
    print (msg);
}

int main(int x, int y)
{

```

Figura 9: Página do SSA

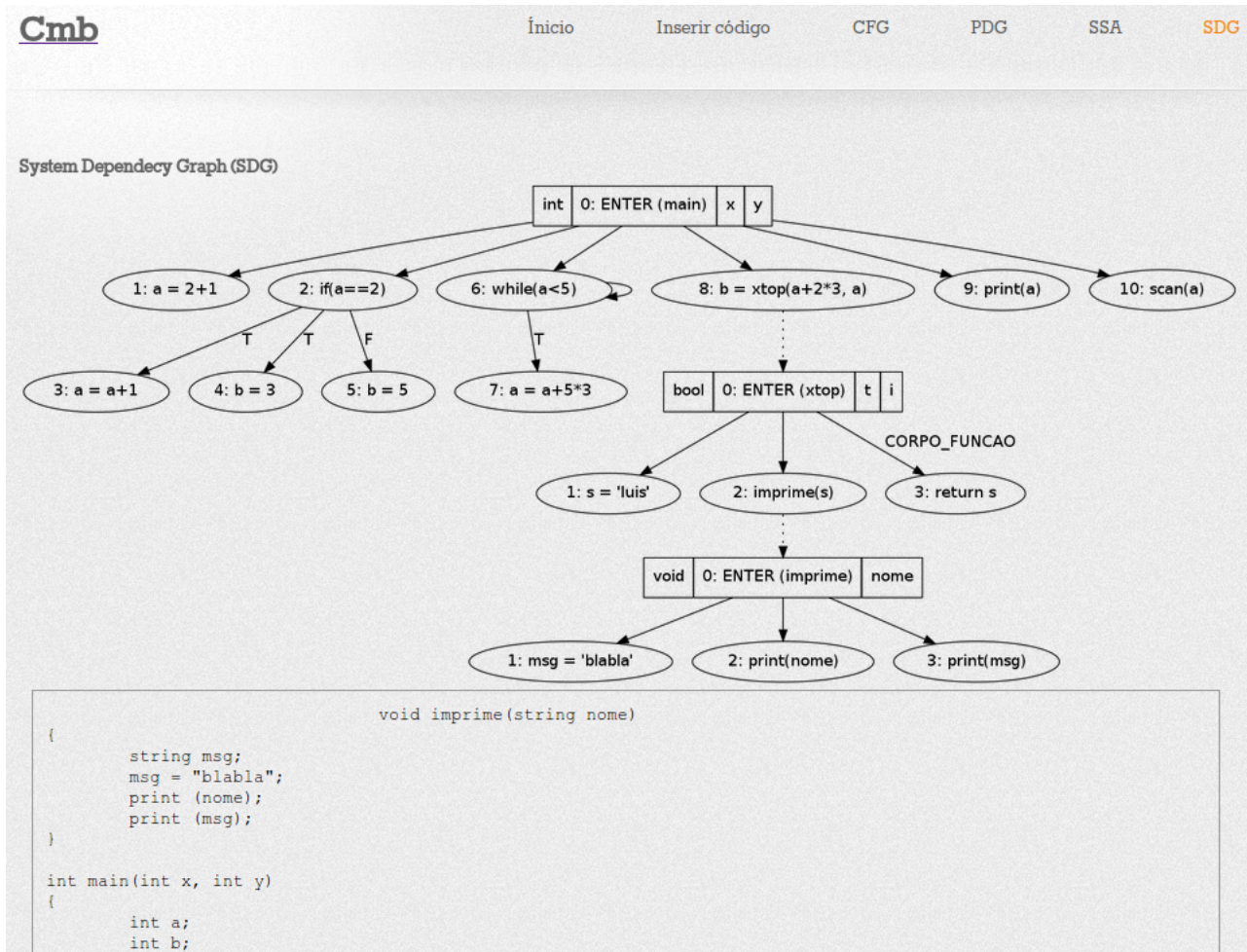


Figura 10: Página do SDG

Estas páginas foram feitas utilizando a linguagem PHP e são feitas invocações ao java para executar o Run fornecido nas aulas para analisar a gramática e ainda ao dot para gerar os grafos visualmente.

6 Conclusões

A utilização de Tree Grammars levou a que a construção de qualquer módulo se tornasse uma tarefa mais simples, já que o seu processo de construção se revelou sistemático. O facto de podermos fazer a travessia de uma AST através de uma gramática de atributos é uma mais valia pois de outra forma seria mais trabalhoso. Acima de tudo a utilização desta metodologia agilizou e simplificou todo o processo.

O estudo e implementação dos algoritmos de construção dos grafos fez-nos entender a facilidade que é, a partir destes meios, a otimização de código, como por exemplo a remoção de dead code, assim como, a transformação eficiente e poderosa de programas .

7 Anexos

7.1 Gramática final

```
1 grammar Cmb;
2
3 options{
4     backtrack = true;
5     output = AST;
6 }
7
8 tokens {
9     PROGRAMA;
10    DECLARACOES;
11    DECLARACAO;
12    STATEMENTS;
13    ATRIBUICAO;
14    THEN;
15    CORPO;
16    FUNCAO;
17    CAEBECALHO;
18    ARGUMENTOS;
19    INVOCACAO;
20    ARGS;
21    RETURN;
22 }
23
24 //grammar
25
26 programa
27     : funcao+
28     -> ^(PROGRAMA funcao+)
29     ;
30
31 funcao
32     : cabecalho '{' corpo_funcao '}'
33     -> ^(FUNCAO cabecalho corpo_funcao)
34     ;
35
36 cabecalho
37     : tipo ID '(' argumentos? ')'
38     -> ^(CAEBECALHO tipo ID argumentos?)
39     ;
40
41 argumentos
42     : declaracao (',' declaracao)*
43     -> ^(ARGUMENTOS declaracao+)
44     ;
45
46 corpo_funcao
47     : declaracoes statements
48     -> ^(CORPO declaracoes statements)
49     ;
50
51
52 declaracoes
53     : (declaracao ';'')+
54     -> ^(DECLARACOES declaracao+)
55     ;
56
```

```

57 declaracao
58     :   tipo ID
59     -> ^(DECLARACAO tipo ID)
60     ;
61
62 tipo
63     :   TD_INT
64     |   TD_BOOL
65     |   TD_STRING
66     |   TD_VAZIO
67     ;
68
69 statements
70     :   statement+
71     -> ^(STATEMENTS statement+)
72     ;
73
74
75 statement
76     :   atribuicao ';' -> atribuicao
77     |   read ';' -> read
78     |   write ';' -> write
79     |   ifs -> ifs
80     |   whiles -> whiles
81     |   invocacao ';' -> invocacao
82     |   retorna ';' -> retorna
83     ;
84
85 retorna
86     :   RETURN expr
87     -> ^(RETURN expr)
88     ;
89
90 invocacao
91     :   ID '(' args? ')',
92     -> ^(INVOCACAO ID args?)
93     ;
94
95 args
96     :   expr ( ',' expr )*
97     -> ^(ARGS expr+)
98     ;
99
100 atribuicao
101     :   ID '=' expr
102     -> ^('=' ID expr)
103     ;
104
105 write
106     :   WRITE '(' expr ')',
107     -> ^(WRITE expr)
108     ;
109
110 read
111     :   READ '(' ID ')',
112     -> ^(READ ID)
113     ;
114
115
116 ifs
117     :   IF '(' expr ')', bloco (ELSE bloco)?

```

```

118     -> ^(IF expr bloco (bloco)?)
119     ;
120
121 whiles
122     :   WHILE '(' expr ')' bloco
123     -> ^(WHILE expr bloco)
124     ;
125
126 bloco
127     :   '{' statements '}'           -> statements
128     |   statement                   -> ^(STATEMENTS statement)
129     ;
130
131 expr
132     :   orExpr
133     -> orExpr
134     ;
135
136 orExpr
137     :   andExpr (opOr^ andExpr )*
138     ;
139
140 andExpr
141     :   equalityExpr (opAnd^ equalityExpr )*
142     ;
143
144 equalityExpr
145     :   additiveExpr (opRel^ additiveExpr)*
146     ;
147
148
149 additiveExpr
150     :   multiplicativeExpr (opAdd^ multiplicativeExpr)*
151     ;
152
153 multiplicativeExpr
154     :   notExpr (opMul^ notExpr )*
155     ;
156
157 notExpr
158     :   (opNot^)? negationExpr
159     ;
160
161 negationExpr
162     :   ('-'^)? factor
163     ;
164
165
166 opAdd
167     :   '+'
168     |   '-'
169     ;
170
171 opMul
172     :   '*'
173     |   '/'
174     |   \'%'
175     ;
176
177 opOr:   '||'
178     ;

```

```

179
180 opAnd
181     :   '&&'
182     ;
183
184 opRel
185     :   '>'
186     |   '<'
187     |   '>='
188     |   '<='
189     |   '=='
190     |   '!='
191     ;
192
193 opNot
194     :   '!'
195     ;
196
197 factor
198     :   ID
199     |   constante    ->  constante
200     |   invocacao    ->  invocacao
201     ;
202
203 constante
204     :   STRING
205     |   INT
206     |   TRUE
207     |   FALSE
208     ;
209
210
211
212
213 //lexer
214
215 RETURN  :   'return';
216
217 IF      :   'if';
218
219 ELSE    :   'else';
220
221 TD_INT  :   'int';
222
223 TD_BOOL :   'bool';
224
225 TD_STRING :   'string';
226
227 TD_VAZIO :   'void';
228
229 WHILE   :   'while';
230
231 TRUE    :   'true';
232
233 FALSE   :   'false';
234
235 WRITE   :   'print';
236
237 READ    :   'scan';
238
239 ID      :   ('a'..'z'|'A'..'Z'|'_' ) ('a'..'z'|'A'..'Z'|'0'..'9'|'_' )*
```

```

240 ;
241
242 INT : '0'..'9'+
243 ;
244
245 COMMENT
246 : '//' ~('\'n'|\'r')* \'r'? \'n' {$channel=HIDDEN;}
247 | '/*' ( options {greedy=false;} : . )* '*/' {$channel=HIDDEN;}
248 ;
249
250 WS : ( ' '
251 | '\t'
252 | '\r'
253 | '\n'
254 ) {$channel=HIDDEN;}
255 ;
256
257 STRING
258 : '"' ( ESC_SEQ | ~('\\'|'"') )* '"'
259 ;
260
261 CHAR: '\'' ( ESC_SEQ | ~('\''|'\\') ) '\''
262 ;
263
264 fragment
265 HEX_DIGIT : ('0'..'9'|'a'..'f'|'A'..'F') ;
266
267 fragment
268 ESC_SEQ
269 : '\\\' ('b'|'t'|'n'|'f'|'r'|\'\"'|\'\\'|'\\')
270 | UNICODE_ESC
271 | OCTAL_ESC
272 ;
273
274 fragment
275 OCTAL_ESC
276 : '\\\' ('0'..'3') ('0'..'7') ('0'..'7')
277 | '\\\' ('0'..'7') ('0'..'7')
278 | '\\\' ('0'..'7')
279 ;
280
281 fragment
282 UNICODE_ESC
283 : '\\\' 'u' HEX_DIGIT HEX_DIGIT HEX_DIGIT HEX_DIGIT
284 ;

```

7.2 CmbTGCFG

Todas as Tree Grammars encontram-se na pasta Antlr.

```
1 tree grammar CmbTGCFG;
2
3 options{
4     tokenVocab=Cmb;
5     ASTLabelType = CommonTree;
6     output = AST;
7     backtrack = true;
8 }
9
10 @header{
11     import java.util.TreeSet;
12     import java.util.TreeMap;
13 }
14
15 programa returns [TreeMap<String, Grafo> grafos_out]
16 @init {
17     TreeMap<String, Grafo> grafos = new TreeMap<String, Grafo>();
18 }
19 : ^(PROGRAMA (funcao[new Grafo()]
20 {
21     grafos.put($funcao.func_id, $funcao.g_out);
22 }
23 )+
24 {
25     $programa.grafos_out = grafos;
26 }
27 )
28 ;
29
30 funcao [Grafo g_in] returns [Grafo g_out, String func_id]
31 : ^(FUNCAO cabecalho corpo_funcao[$funcao.g_in, $cabecalho.id])
32 {
33     $funcao.g_out = $corpo_funcao.g_out;
34     $funcao.func_id = $cabecalho.id;
35 }
36 ;
37
38 cabecalho returns [String id]
39 : ^(CAEBECALHO tipo ID argumentos?)
40 {
41     $cabecalho.id = $ID.text;
42 }
43 ;
44
45 argumentos
46 : ^(ARGUMENTOS declaracao+)
47 ;
48
49 corpo_funcao [Grafo g_in, String id_funcao] returns [Grafo g_out]
50 @init{
51     Grafo g = $corpo_funcao.g_in;
52     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
53     // 0 <=> Nodo START. E passado como parametro para que o nodo START se ligue a
54     primeira instrucao
55     int nr = g.putNodo(0, new Instrucao("START", null, null));
56     nrs.add(nr);
57 }
58 : ^(CORPO declaracoes statements[$corpo_funcao.g_in, "CORPO_FUNCAO", nrs, "])
```

```

58     {
59         $corpo_funcao.g_out = $statements.g_out;
60     }
61     ;
62
63 declaracoes
64 : ^(DECLARACOES declaracao+)
65 ;
66
67 declaracao
68 : ^(DECLARACAO tipo ID)
69 ;
70
71 tipo
72 : TD_INT
73 | TD_BOOL
74 | TD_STRING
75 | TD_VAZIO
76 ;
77
78 statements [Grafo g_in, String contexto, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in,
79 String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out,
80 String label_out]
81 @init {
82     Grafo g = $statements.g_in;
83     TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao = $statements.nrs_ultima_instrucao_in;
84 }
85 : ^(STATEMENTS (statement[g, nrs_ultima_instrucao, $statements.label_in]
86 {
87     g = $statement.g_out;
88     nrs_ultima_instrucao = $statement.nrs_ultima_instrucao_out;
89     $statements.label_in = $statement.label_out;
90 }
91 )+
92 {
93     // Apos todos os statements do corpo de uma funcao tiverem sido executados,
94     // os ultimos nodos sao ligados ao nodo EXIT
95     if ($statements.contexto.equals("CORPO_FUNCAO")){
96         // cria nodo EXIT
97         int nodo_exit = g.putNodo(new Instrucao("EXIT", null, null));
98         // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
99         // essas instrucoes ao nodo EXIT
100         g.checkAndPutCaminho(nrs_ultima_instrucao, new ParNrInstrucaoLabel(
101             nodo_exit, $statement.label_out));
102     }
103
104     $statements.g_out = g;
105     $statements.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_ultima_instrucao;
106     $statements.label_out = $statement.label_out;
107 }
108 )
109 ;
110
111 statement [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in]
112 returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
113 ]
114 @init {
115     Grafo g = $statement.g_in;
116 }
117 : atribuicao[g, $statement.label_in]

```



```

112     {
113         g = $atribuicao.g_out;
114
115         // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
116         // essas instrucoes a nova instrucao
117         g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
118             ParNrInstrucaoLabel($atribuicao.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
119                 $statement.label_in));
120
121         $statement.g_out = g;
122         $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $atribuicao.
123             nrs_ultima_instrucao_out;
124         $statement.label_out = $atribuicao.label_out;
125     }
126 | read[g, $statement.label_in]
127 {
128     g = $read.g_out;
129
130     // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
131     // essas instrucoes a nova instrucao
132     g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
133         ParNrInstrucaoLabel($read.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
134             $statement.label_in));
135
136     $statement.g_out = g;
137     $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $read.nrs_ultima_instrucao_out;
138     $statement.label_out = $read.label_out;
139 }
140 | write[g, $statement.label_in]
141 {
142     g = $write.g_out;
143
144     // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
145     // essas instrucoes a nova instrucao
146     g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
147         ParNrInstrucaoLabel($write.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
148             $statement.label_in));
149
150     $statement.g_out = g;
151     $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $write.nrs_ultima_instrucao_out;
152     $statement.label_out = $write.label_out;
153 }
154 | ifs[g, $statement.nrs_ultima_instrucao_in, $statement.label_in]
155 {
156     g = $ifs.g_out;
157
158     $statement.g_out = g;
159     $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $ifs.nrs_ultima_instrucao_out;
160     $statement.label_out = $ifs.label_out;
161 }
162 | whiles[g, $statement.nrs_ultima_instrucao_in, $statement.label_in]
163 {
164     g = $whiles.g_out;
165
166     $statement.g_out = g;
167     $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $whiles.nrs_ultima_instrucao_out;
168     $statement.label_out = $whiles.label_out;
169 }
170 | invocacao[g, "STATEMENT", $statement.label_in]
171 {
172     g = $invocacao.g_out;

```

```

163
164 // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
165 // essas instrucoes a nova instrucao
166 g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
167     ParNrInstrucaoLabel($invocacao.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
168         $statement.label_in));
169
170 $statement.g_out = g;
171 $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $invocacao.
172     nrs_ultima_instrucao_out;
173 $statement.label_out = $invocacao.label_out;
174 }
175 | retorna[g, $statement.label_in]
176 {
177     g = $retorna.g_out;
178
179     // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
180     // essas instrucoes a nova instrucao
181     g.checkAndPutCaminho($statement.nrs_ultima_instrucao_in, new
182         ParNrInstrucaoLabel($retorna.nrs_ultima_instrucao_out.first(),
183             $statement.label_in));
184
185     $statement.g_out = g;
186     $statement.nrs_ultima_instrucao_out = $retorna.nrs_ultima_instrucao_out;
187     $statement.label_out = $retorna.label_out;
188 }
189 ;
190
191 retorna [Grafo g_in, String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer>
192     nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
193 @init {
194     Grafo g = $retorna.g_in;
195 }
196 : ^(RETURN expr)
197 {
198     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
199     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
200     nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($RETURN.text + " " + $expr.instrucao, null,
201         null)));
202
203     $retorna.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
204     $retorna.g_out = g;
205     $retorna.label_out = "";
206 }
207 ;
208
209 invocacao [Grafo g_in, String contexto, String label_in] returns [Grafo g_out,
210     TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String instrucao, String label_out]
211 @init {
212     Grafo g = $invocacao.g_in;
213 }
214 : ^(INVOCACAO ID args?)
215 {
216     if ($invocacao.contexto.equals("FACTOR")) {
217         $invocacao.instrucao = $ID.text + "(" + $args.ags + ")";
218     }
219     else {
220         TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
221         // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
222         nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($ID.text + "(" + $args.ags + ")", null,
223             null)));

```

```

213         $invocacao.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
214         $invocacao.g_out = g;
215         $invocacao.label_out = "";
216     }
217 }
218 }
219 ;
220
221 args returns [String ags]
222 @init{
223     String a = "";
224 }
225 : ^(ARGS (expr
226 {
227     a += $expr.instrucao + ", ";
228 }
229 )+
230 {
231     // limpa os caracteres finais ", "
232     $args.ags = a.substring(0,a.length()-2);
233 }
234 )
235 ;
236
237 atribuicao [Grafo g_in, String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer>
    nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
238 @init {
239     Grafo g = $atribuicao.g_in;
240 }
241 : ^('=' ID expr)
242 {
243     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
244     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
245     nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($ID.text + " = " + $expr.instrucao, null,
        null)));
246
247     $atribuicao.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
248     $atribuicao.g_out = g;
249     $atribuicao.label_out = "";
250 }
251 ;
252
253 write [Grafo g_in, String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer>
    nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
254 @init {
255     Grafo g = $write.g_in;
256 }
257 : ^(WRITE expr)
258 {
259     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
260     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
261     nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($WRITE.text + "(" + $expr.instrucao + ")",
        null, null)));
262
263     $write.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
264     $write.g_out = g;
265     $write.label_out = "";
266 }
267 ;
268

```

```

269 read [Grafo g_in, String label_in] returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer>
    nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
270 @init {
271     Grafo g = $read.g_in;
272 }
273 : ^(READ ID)
274 {
275     TreeSet<Integer> nrs = new TreeSet<Integer>();
276     // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
277     nrs.add(g.putNodo(new Instrucao($READ.text + "(" + $ID.text + ")", null, null
        ));
278     $read.nrs_ultima_instrucao_out = nrs;
279     $read.g_out = g;
280     $read.label_out = "";
281 }
282 ;
283
284
285 ifs [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in] returns [
    Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
286 @init {
287     Grafo g = $ifs.g_in;
288     int nr_ult_inst_exp = -1;
289     TreeSet<Integer> nrs_exp = new TreeSet<Integer>();
290     TreeSet<Integer> nrs_out = new TreeSet<Integer>();
291     // boolean entrou_else = false;
292 }
293 : ^(IF expr
294     {
295         // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
296         nr_ult_inst_exp = g.putNodo(new Instrucao($IF.text + "(" + $expr.
            instrucao + ")", null, null));
297
298         // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
            essas instrucoes a nova instrucao (expressao)
299         g.checkAndPutCaminho($ifs.nrs_ultima_instrucao_in, new
            ParNrInstrucaoLabel(nr_ult_inst_exp, $ifs.label_in));
300
301         // variavel que sera passada aos blocos para indicar o nodo que sera
            ligado a primeira instrucao de cada bloco
302         nrs_exp.add(nr_ult_inst_exp);
303
304         // adiciona provisoriamente o nr da expressao. caso exista o bloco
            else, este E removido ja que a instrucao seguinte, ligar-se-Ã; a
            Ãºltima instrucao dos blocos then e else
305         // caso contrario, ligar-se-Ã; a expressÃ£o e ao bloco then.
306         nrs_out.add(nr_ult_inst_exp);
307     }
308     a=bloco[g, nrs_exp, "T"]
309     {
310         g = $a.g_out;
311         // adiciona os nrs das utlimas instrucoes deste bloco
312         nrs_out.addAll($a.nrs_ultima_instrucao_out);
313     }
314     (b=bloco[g, nrs_exp, "F"]
315     {
316         g = $b.g_out;
317         // remove o nr da expressao adicionado provisoriamente
318         nrs_out.remove(nr_ult_inst_exp);
319         // adiciona os nrs das utlimas instrucoes deste bloco
320         nrs_out.addAll($b.nrs_ultima_instrucao_out);

```

```

321         // entrou_else = true;
322     } )?
323 )
324 {
325     $ifs.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_out;
326     $ifs.g_out = g;
327     //if (entrou_else)
328     $ifs.label_out = "";
329     // else $ifs.label_out = "F";
330
331 }
332 ;
333
334 whiles [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in]
    returns [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out
    ]
335 @init {
336     Grafo g = $whiles.g_in;
337     int nr_ult_inst_exp = -1;
338     TreeSet<Integer> nrs_exp = new TreeSet<Integer>();
339 }
340 :    ^(WHILE expr
341     {
342         // cria nodo no grafo e guarda o nr da instrucao
343         nr_ult_inst_exp = g.putNodo(new Instrucao($WHILE.text + "(" + $expr.
            instrucao + ")", null, null));
344
345         // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas e conecta
            essas instrucoes a nova instrucao (expressao)
346         g.checkAndPutCaminho($whiles.nrs_ultima_instrucao_in, new
            ParNrInstrucaoLabel(nr_ult_inst_exp, $whiles.label_in));
347
348         // variavel que sera passada ao bloco para indicar o nodo que sera ligado
            a primeira instrucao do bloco
349         nrs_exp.add(nr_ult_inst_exp);
350     }
351     bloco[g, nrs_exp, "T"] { g = $bloco.g_out; })
352     {
353         // verifica se existem instrucoes anteriormente executadas no bloco e
            conecta essas instrucoes a instrucao (expressao)
354         g.checkAndPutCaminho($bloco.nrs_ultima_instrucao_out, new
            ParNrInstrucaoLabel(nr_ult_inst_exp, $bloco.label_out));
355
356         // E passado o nr da instrucao inicial do while, ou seja a expressao,
            para que proximo statement se ligue a este
357         $whiles.nrs_ultima_instrucao_out = nrs_exp;
358         $whiles.g_out = g;
359         // devolve "F" porque a proxima instrucao so acontece quando a expressao
            do while der falso
360         $whiles.label_out = "F";
361     }
362 ;
363
364 bloco [Grafo g_in, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_in, String label_in] returns
    [Grafo g_out, TreeSet<Integer> nrs_ultima_instrucao_out, String label_out]
365 :    statements[$bloco.g_in, "BLOCO", $bloco.nrs_ultima_instrucao_in, $bloco.
    label_in]
366 {
367     $bloco.g_out = $statements.g_out;
368     $bloco.nrs_ultima_instrucao_out = $statements.nrs_ultima_instrucao_out;
369     $bloco.label_out = $statements.label_out;

```

```

370 }
371 // | ^ (STATEMENTS statement)
372 ;
373
374 expr returns [String instrucao]
375 :   ^('||' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "||" + $b.
    instrucao;}
376 |   ^('&&' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "&&" + $b.
    instrucao;}
377 |   ^('+ ' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "+" + $b.
    instrucao;}
378 |   ^('- ' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "-" + $b.
    instrucao;}
379 |   ^('* ' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "*" + $b.
    instrucao;}
380 |   ^('/ ' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "/" + $b.
    instrucao;}
381 |   ^('\%' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "\" + $b.
    instrucao;}
382 |   ^('>' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + ">" + $b.
    instrucao;}
383 |   ^('<' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "<" + $b.
    instrucao;}
384 |   ^('>=' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + ">=" + $b.
    instrucao;}
385 |   ^('<=' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "<=" + $b.
    instrucao;}
386 |   ^('==' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "==" + $b.
    instrucao;}
387 |   ^('!==' a=expr b=expr) {$expr.instrucao = $a.instrucao + "!=" + $b.
    instrucao;}
388 |   ^('!' a=expr)          {$expr.instrucao = "!" + $a.instrucao;}
389 |   factor                 {$expr.instrucao = $factor.instrucao;}
390 ;
391
392 factor returns [String instrucao]
393 :   ID                      {$factor.instrucao = $ID.text;}
394 |   constante               {$factor.instrucao = $constante.valor;}
395 |   invocacao[null, "FACTOR", ""] {$factor.instrucao = $invocacao.instrucao;}
396 ;
397
398 constante returns [String valor]
399 :   STRING {$constante.valor = $STRING.text;}
400 |   INT    {$constante.valor = $INT.text;}
401 |   TRUE   {$constante.valor = $TRUE.text;}
402 |   FALSE  {$constante.valor = $FALSE.text;}
403 ;

```

7.3 Código Java

Todo o código java encontra-se na pasta Java.