

Geração de Código Intermediário

Rômulo de Vasconcelos Feijão Filho - 140031260@aluno.unb.br
Prof^a Cláudia Nalon - nalon@unb.br

Universidade de Brasília, Brasília DF 70910-900, Brasil
{pcr,cic}@unb.br

Resumo This is the fourth and final deliverable for a Capstone project made for the Compilers course ministered by professor Cláudia Nalon at University of Brasilia. In this article we will present the motivation, description of the lexical analyser, description of the synthax analyser, description of the semanthic analyzer, description of test files, description of the intermediate code generation and instructions for building and executing the project.

Keywords: Compilers · Lexical Analysis · Synthax Analysis · Semantic Analysis · Intermediate Code Generation · Three Address Code · FLEX · Bison.

1 Motivação

Para esse curso, é essencial essa implementação, tanto para alcançar o resultado final desejado do projeto da disciplina, quanto para o aprendizado e fixação dos conceitos ministrados, estes que também serão testados nas provas. A linguagem a ser desenvolvida foi projetada com o intuito de facilitar o uso de conjuntos (*set*) em programas escritos em C. Além do tipo *set*, também será implementado um tipo polimórfico, denominado *elem*. Essas funcionalidades são interessantes porque oferecem recursos a mais para o usuário, permitindo este trabalho de forma mais ágil. Como a primeira fase de um compilador, a tarefa principal do analisador léxico é ler os caracteres da entrada do programa fonte, agrupá-los em lexemas e produzir como saída uma sequência de tokens para cada lexema no programa fonte [1]. A segunda etapa do processo de compilação, consiste da inserção dos tokens na gramática (saída do analisador léxico) no analisador sintático. Nessa etapa, a árvore sintática abstrata é gerada, assim como a tabela de símbolo contendo as declarações de variáveis e funções. A terceira etapa consiste da avaliação do código e seus valores semânticos, como por exemplo escopo de variáveis e funções, contenção da função main, verificação do número de parâmetros nas chamadas de funções, entre outros. A última etapa trata-se da parte de geração de código intermediário, este que será contido por comandos interpretáveis pelo interpretador TAC [2].

2 Descrição da Análise Léxica

A Análise Léxica foi feita com o auxílio da ferramenta de código aberto **FLEX** (*Fast Lexical Analyzer Generator*) [3]. Foi criado um arquivo **newc.l**, contendo as definições e regras do analisador léxico da linguagem previamente definida e apresentada pela professora. Após a execução do comando **flex newc.l**, um arquivo **lex.yy.c** é gerado contendo o autômato finito determinístico que aceita a mesma linguagem das expressões regulares especificadas. Foi desenvolvido também, com o auxílio de variáveis locais e do FLEX, um mecanismo de detecção de caracteres não permitidos, indicando a linha e a coluna em que este se encontra. Os tokens gerados pelo analisador léxico serão passados para o analisador sintático, pois este irá gerar um tabela de símbolos e a árvore sintática abstrata.

3 Descrição da Análise Sintática

A Análise Sintática foi feita com o auxílio da ferramenta de código aberto **GNU Bison** [4]. A gramática foi implementada de forma que realize a análise de forma **LR(1) Canônica** (*Canonical Left-Right, Rightmost Derivation Parser*). Foi criado um arquivo **newcParser.y**, contendo uma union para que possamos receber valores de diferentes tipos vindos do analisador léxico (string, inteiro e float), as declarações dos tokens e dos não-terminais, as regras da gramática e a **main**, que agora foi passada do arquivo do analisador léxico para o sintático. Essa função recebe um arquivo como argumento e executa o analisador léxico e sintático sobre essa entrada. Ao executar o comando **bison -d -v newcParser.y**, são gerados pelo Bison dois arquivos, **newcParser.tab.h** e **newcParser.tab.c**, contendo os tokens declarados no arquivo **newcParser.y**. Com o auxílio da flag **--report=counterexamples** foi possível observar mais claramente situações de conflito na gramática, ficando assim mais fácil de depurá-la. Além do arquivo principal do analisador, foram criados mais dois arquivos para a etapa de análise sintática: **tree.h** e **symbol.h**. O arquivo **tree.h** consiste da implementação da árvore sintática abstrata e suas funções. Cada nó dessa árvore possui um campo para cada tipo possível passado, até cinco nós filhos e um campo para determinar qual tipo de dado está sendo representado pelo nó (string, int, float, etc). Já o arquivo **symbol.h** é a implementação da tabela de símbolos. A tabela de símbolos guarda um nome, tipo do símbolo (variável ou função) e tipo da variável ou do retorno da função e esta foi montada a partir de uma estrutura hash com o auxílio da biblioteca uthash [5]. Esta tabela está sendo usada como uma variável global *extern* para facilitar o uso dessa tabela no arquivo **newcParser.y**.

4 Descrição da Análise Semântica

Para realizar a análise semântica do código, foi feito um analisador de passagem única e são utilizadas um conjunto de variáveis e estruturas de dados. A tabela de símbolos, implementada ainda na fase de análise sintática, agora possui dois

novos campos, esses sendo o escopo da função, variável ou parâmetro encontrado, e, no caso de funções, quantos parâmetros são passados para essa função específica. Foi implementada também uma pilha com o auxílio da biblioteca **uts-tack** [6] para a validação dos escopos. Seu funcionamento é da seguinte forma, a cada função, *if*, *else*, *for* e *forall* aberto, uma variável **scope** é incrementada e adicionada na pilha; e a cada uma dessas funções fechadas, desempilhamos o primeiro elemento da pilha, removendo assim o escopo anterior. Quando um **ID** é lido, ele verifica para todos os elementos da pilha, se existe algum símbolo na tabela de símbolos com aquele escopo, dessa forma conseguimos avaliar cada escopo "pai" do escopo atual e se um deles contém a variável a ser buscada. Se algum ID já estiver presente na tabela de símbolos e estiver sendo declarado no mesmo escopo, um erro semântico será lançado. Existe também uma função de validação do número de parâmetros, aonde cada parâmetro acrescentado na declaração da função incrementamos seu atributo *parameters* na tabela de símbolos. No arquivo **newcParser.y**, algumas outras variáveis utilizadas são **errors**, aonde ficam guardados o número de erros encontrados, **semanticErrors**, que guarda a quantidade de erros semânticos, que no caso são interpretados como avisos, **args_params**, que guarda o número de parâmetros passados como argumento para uma função. Por fim, existe também uma variável denominada de **has_main**, que guarda o número de ocorrências da função **main**, se não houver exatamente uma ocorrência, um erro semântico será lançado. Existe também a checagem de retorno de funções. Caso uma função exija um retorno e este não seja passado, ou vice-versa, o analisador semântico irá produzir uma mensagem de erro, isso também acontecerá caso seja passado um retorno de tipo inválido. Foi feita também uma análise de tipo de operações aritméticas, operações de set e de atribuições. Caso o tipo esteja diferente, será feita uma coerção, se possível. As coerções podem ocorrer em operações aritméticas e atribuições. Em operações aritméticas, se os operadores forem do tipo "int" e "float", a coerção será feita para o tipo "float". Já em atribuições, o tipo será o mesmo da variável, a menos que um dos valores seja do tipo "set" ou "elem": o primeiro caso não será permitido; no segundo caso, a variável receberá o valor atribuído a ela. Os tipos na árvore anotada são 'i' para inteiro, 'f' para float, 's' para set, 'u' para valor indefinido e 'x' para vazio. O valor 'u' é utilizado caso tente ser feita operação de set usando algum valor que não seja um set e o valor 'x' foi usado principalmente para avaliação do retorno de funções.

5 Descrição da Geração de Código Intermediário

Para a fase de geração de código intermediário, foi escolhido que a linguagem seria compilável, portanto essa gera um arquivo .tac, que então, pode ser executado pelo interpretador TAC [2]. Para ocorrer a geração do código TAC, não devem haver nenhum erro léxico ou sintático no código passado para o compilador. Uma biblioteca **codegen.h** foi criada para implementar as funções que são utilizadas para a criação dos comandos. A escrita do arquivo .tac é feito da seguinte maneira:

- Um arquivo novo é criado a partir do nome do arquivo com o código que foi passado para o compilador
- Enquanto a análise é feita, uma linha ou mais linhas de código TAC são acrescentadas em uma lista, de acordo com a regra que foi lida
- Ao fim da análise, é escrito primeiramente a linha ".table", seguida de ".code", e por fim, cada linha que estava presente na lista gerada

Para a implementação da fase de geração do código intermediário, foram usadas as bibliotecas **utlist** [7] e **utstring** [8], pois essas facilitam alguns processos necessários, como por exemplo a concatenação de strings e números para a atribuição em uma variável. A tabela de símbolo sofreu uma nova modificação, pois um campo novo foi adicionado a ela para que o registro da variável a ser utilizada seja guardado, portanto, quando uma variável for chamada em uma atribuição, irá ocorrer uma busca na tabela de símbolos retornando a variável encontrada e o registrador o qual essa é representada. Além disso, a árvore também foi modificada para essa etapa, agora esta contendo um novo campo chamado "saved", este sendo passado para nós superiores da árvore e informando qual registrador ou valor o nó representa, isso permite a criação de expressões aritméticas e lógicas. A parte de código .table será utilizada apenas para elementos do tipo string e char, pois são utilizados apenas registradores para números e resultados de expressões. Tipos booleanos são representados apenas por 0, para falso, e 1, para verdadeiro.

6 Descrição dos Arquivos de Teste

Existem oito arquivos de teste implementados, todos estes se encontram na pasta **tests**. Os arquivos **test1.nc** e **test2.nc** devem passar pelo analisador léxico, sintático e semântico sem encontrar erros e com isso, gerar o código que será passado para o interpretador TAC, pois estes contêm apenas lexemas identificáveis, fazem parte da gramática definida e não contêm erros semânticos.

Os arquivos **test3.nc** e **test4.nc** devem apresentar apenas erros semânticos, indicando qual erro ocorreu e sua posição no código. O arquivo **test3.nc** deve apresentar erro de variável não declarada na linha 2 coluna 11 e na linha 3 coluna 14, função não declarada na linha 3 coluna 15, função com retorno de tipo errado na linha 7 coluna 4, variável recebendo valor de tipo errado na linha 10 coluna 15, função sendo invocada com número de parâmetros inválidos na linha 12 coluna 15, operação de set com tipo errado na linha 14 coluna 17 e na linha 15 coluna 17, função sem retorno esperado na linha 34 coluna 1 e função main não encontrada. Já o arquivo de teste **test4.nc**, deverá apresentar variáveis não declaradas na linha 4 coluna 13, linha 11 coluna 11, linha 13 coluna 10, linha 14 coluna 12 e linha 14 coluna 16, função main com retorno inesperado na linha 21 coluna 4 e mais de uma função main encontrada.

Os arquivos de teste **test5.nc** e **test6.nc** devem apresentar erros na fase de análise sintática, apresentando apenas a tabela de símbolos e indicando as linhas e colunas. No arquivo **test5.nc**, deverão ser apontados dois erros, um na linha 10 coluna 15 por comando READ inválido e outro na linha 14 coluna 5,

porém o erro ocorre na linha 12, devido a falta de um ponto-vírgula. O arquivo **test6.nc** deverá apresentar três erros, um na linha 6 coluna 9, por um READ sem ID dentro, e os outros dois na linha 8, colunas 9 e 14 respectivamente, pois ambos o **if** e o **for** foram construídos de maneira errada.

Já os arquivos **test7.nc** e **test8.nc** devem apresentar erros, ainda na fase de análise léxica, indicando o que causou tal erro e sua localização no arquivo. O arquivo de teste **test7.nc** deve apresentar dois erros após a execução do analisador léxico: "`@ at line: 2, column: 7`" e "`@ at line: 4, column: 9`", isso também gera um erro sintático na linha 2. O arquivo de teste **test8.nc** também deve apresentar dois erros após a execução do analisador léxico: "`| atline : 3,column : 9`", "`\atline : 3,column : 11`" e "`e`" & "`@ at line: 4, column: 7`", consequentemente apresentando também erro sintático na linha 4. Vale resaltar que todos os arquivos que tiverem erros sintáticos não terá seu código intermediário gerado.

7 Instruções de Compilação e Execução

Antes de executar o programa, por favor verifique as versões do FLEX e do Bison instalados na máquina. As versão do flex utilizada durante o processo de implementação foi a 2.6.4, e para o bison, 3.7.4. Versão do GCC utilizada para compilação foi a 10.2.0. Esse programa foi desenvolvido em ambiente ubuntu 20.10.

Para a compilação do programa e execução dos arquivos de teste, foi criado um arquivo **makefile**, a fim de simplificar e acelerar esse processo. Para executar os arquivos de teste, basta entrar na pasta **src**, utilizando o comando **cd src** e, dentro dessa, executar o comando **make runtests**. Na pasta **results** serão criados os arquivos resultantes de cada caso de teste, e na pasta **tests**, serão criados os arquivos **.tac**, que serão passados para o interpretador TAC. Caso deseje executar cada comando de compilação separadamente, também dentro da pasta **src** execute, **flex newc.l**, seguido de **bison -d -v newcParser.y** e também **gcc lex.yy.c -g newcParser.tab.c -ll -g -Wall -o parser**, terminando então o processo de compilação; finalmente, para executar o programa: **./parser ../tests/<nome-do-arquivo-entrada>**, que o resultado aparecerá no terminal.

Referências

1. Aho, Alfred V., Lam, Monica S., Sethi, Ravi, Ullman, Jeffrey D.: Compiladores: Princípios, Técnicas e Ferramentas. 2nd edn. Pearson, (1999)
2. Nalon, Claudia, Santos, Luciano: the Three Address Code interpreter, <https://github.com/lhsantos/tac> (2014). Último acesso em: 17 de Maio de 2021
3. Paxson, Vern: Lexical Analysis With Flex, for Flex 2.6.2, <https://westes.github.io/flex/manual/> (2001). Último acesso em: 15 de Fevereiro de 2021
4. Free Software Foundation: GNU Bison - The Yacc-compatible Parser Generator, <https://www.gnu.org/software/bison/manual/> (2020). Último acesso em: 17 de Março de 2021

5. Hanson, Troy D.: uthash User Guide, <https://www.cs.bu.edu/~jappavoo/Resources/psml/apps/hashy/uthash/doc/userguide.html> (2021). Último acesso em: 17 de Março de 2021
6. Hanson, Troy D.: utstack User Guide, <https://www.cs.bu.edu/~jappavoo/Resources/psml/apps/hashy/utstack/doc/userguide.html> (2021). Último acesso em: 17 de Maio de 2021
7. Hanson, Troy D.: utlist User Guide, <https://www.cs.bu.edu/~jappavoo/Resources/psml/apps/hashy/utlist/doc/userguide.html> (2021). Último acesso em: 17 de Maio de 2021
8. Hanson, Troy D.: utsting User Guide, <https://www.cs.bu.edu/~jappavoo/Resources/psml/apps/hashy/utstring/doc/userguide.html> (2021). Último acesso em: 17 de Maio de 2021

A Gramática

A gramática da linguagem a ser implementada foi montada da seguinte maneira:

```

program → declarations_list
declarations_list → declarations_list declaration | declaration | error
declaration → var_dec | func_dec
var_dec → TYPE ID ;
func_dec → TYPE ID ( params_list ) { statement_list } |
           TYPE MAIN ( params_list ) { statement_list }
params_list → params_list , parameter | parameter | ε | error
parameter → TYPE ID
statement_list → statement_list statement | ε | error
statement → expression_statement | ret_st | var_dec | io_ops | basic_ops
expression_statement → expression ;
basic_ops → if_ops |
           for_statement { statement_list } |
           for_statement statement |
           forall_statement many_operations ; |
           forall_statement { statement_list }
for_statement → FOR ( for_body )
forall_statement → FORALL ( in_set )
for_body → expression_statement expression_statement expression |
          ; expression_statement expression |
          many_operations
if_ops → if_statement statement |
        if_statement statement else_statement
        if_statement { statement_list } |
        if_statement { statement_list } else_statement
if_statement → IF ( expression )
else_statement → ELSE statement
               ELSE { statement_list }
ret_st → RETURN expression ;

```

```

io_ops → READ ( ID ) ; |
        WRITE ( expression ) ; |
        WRITEFN ( expression ) ;
expression → many_operations | func_call | assign_value
term → math_term |
        str_term
math_term → ID | INTEGER | DECIMAL | ( expression )
str_term → CHAR | STRING | EMPTY
math_op → math_op ADD math_op_muldiv |
          math_op SUB math_op_muldiv |
          math_op_muldiv
math_op_muldiv → math_op_muldiv DIV math_term |
                 math_op_muldiv MULT math_term |
                 math_term
many_operations → ADDSET ( many_operations ) |
                 REMOVE ( many_operations ) |
                 EXISTS ( many_operations ) |
                 operation
operation → in_set |
          IS_TYPE ( expression ) |
          or_operation
or_operation → or_operation OR and_operation |
              and_operation
and_operation → and_operation AND equality_operation |
               equality_operation
equality_operation → equality_operation EQUALS relational_operation |
                    equality_operation DIFFERENT relational_operation |
                    relational_operation
relational_operation → relational_operation SMALLER negation_operation |
                      relational_operation GREATER negation_operation |
                      relational_operation SMALLEQ negation_operation |
                      relational_operation GREATEQ negation_operation |
                      negation_operation
negation_operation → NEG math_op |
                    math_op
func_call → ID ( args_list ) |
            str_term
in_set → term IN expression
args_list → args_list , expression |
            expression |
            ε
assign_value → ID = expression

letter → [a-zA-Z]
digit → [0-9]

```

ID \rightarrow letter(letter|digit|_|-)*
INTEGER \rightarrow {digit}+
DECIMAL \rightarrow {digit}*.{digit}+
CHAR \rightarrow {letter}
STRING \rightarrow \"(\\.|[^\"]\\)*\"
TYPE \rightarrow int | float | set | elem
DIV \rightarrow /
MULT \rightarrow *
ADD \rightarrow +
SUB \rightarrow -
EMPTY \rightarrow "EMPTY"
MAIN \rightarrow main
FOR \rightarrow for
FORALL \rightarrow forall
IF \rightarrow if
ELSE \rightarrow else
RETURN \rightarrow return
READ \rightarrow read
WRITE \rightarrow write
WRITELN \rightarrow writeln
ADD.SET \rightarrow add
REMOVE \rightarrow remove
EXISTS \rightarrow exists
IS_TYPE \rightarrow is_set
IN \rightarrow in
SMALLER \rightarrow <
GREATER \rightarrow >
SMALLEQ \rightarrow <=
GREATERQ \rightarrow >=
EQUALS \rightarrow ==
DIFFERENT \rightarrow !=
OR \rightarrow ||
AND \rightarrow &&
NEG \rightarrow !