



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais

PCS 2056 – Linguagens e Compiladores

Relatório Final

09/12/2011

Bruno Pezzolo dos Santos	5948816
Carla Guillen Gomes	5691366

Sumário

1. Introdução	3
2. Definição da Linguagem	4
2.1. Descrição Informal.....	4
Funções.....	4
Repetição Condicional	5
Decisão.....	5
Entrada.....	5
Saída.....	5
2.2. Descrição Formal	5
Notação BNF	5
Notação Wirth	7
2.3. Descrição Reduzida	9
3. Análise Léxica	11
3.1. Autômatos	12
3.2. Implementação.....	15
4. Análise Sintática	18
4.1. Submáquinas do Autômato de Pilha Estruturado (APE)	18
4.2. Implementação.....	23
5. Características da MVN	25
5.1. Instruções da linguagem de saída	25
5.2. Pseudoinstruções da linguagem de saída.....	26
5.3. Características gerais	26
Chamada de subrotina.....	28
Retorno de subrotina.....	28
6. Tradução de Comandos.....	29
6.1. Controle de fluxo	29
6.2. Comandos imperativos	30
6.3. Exemplo de programa traduzido	34
7. Análise Semântica.....	36
7.1. Tabela de símbolos com suporte a escopo.....	36

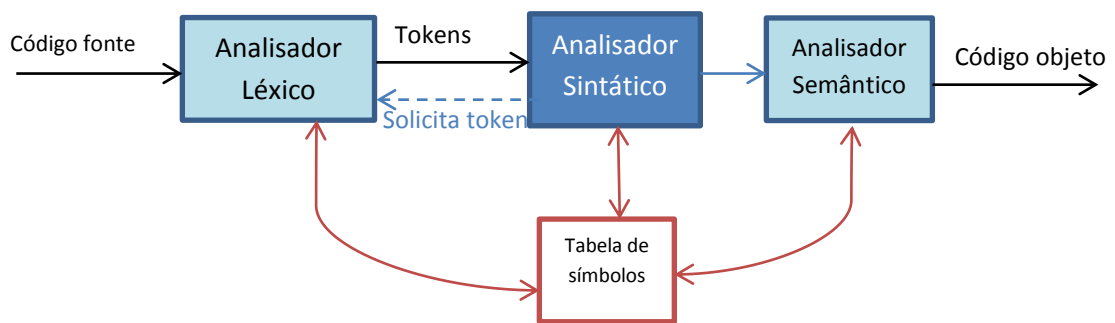
7.2. Principais ações semânticas.....	37
Rótulos.....	37
Submáquina Programa	38
Submáquina Comando	38
Submáquina Expressão	40
7.3. Ambiente de execução	40
7.4. Registro de ativação	Erro! Indicador não definido.
8. Testes.....	41
Teste 1: input, output, if e while aninhados.....	41
Teste 2: operações aritméticas.....	42
Teste 3: operações lógicas	43
Teste 4: chamada de sub-rotina	Erro! Indicador não definido.
9. Conclusão	45

1. Introdução

Este documento descreve o compilador desenvolvido pelos alunos Bruno Pezzolo dos Santos e Carla Guillen Gomes na disciplina PCS2056 – Linguagens e Compiladores. O compilador foi desenvolvido com fins didáticos, sendo desconsideradas características como otimização de código-fonte e desempenho.

O compilador foi escrito na linguagem C e gera código objeto em linguagem simbólica composta por mnemônicos, aceita pela MVN fornecida. A MVN (Máquina de von Neumann) simula o Modelo de von Neumann como um processador simples rodando na máquina virtual Java (JVM).

A arquitetura do compilador é orientada à sintaxe, ou seja, o módulo de análise sintática gerencia as atividades através de requisições aos outros módulos, conforme representação a seguir:



As fases do desenvolvimento do compilador (definição da linguagem, análise léxica, análise sintática, definição do ambiente de execução e análise semântica) serão descritas nos próximos capítulos.

2. Definição da Linguagem

A linguagem de alto nível criada é baseada na linguagem C. Os programas são formados por sequências de comandos separados por ponto e vírgula. Os programas se iniciam com a palavra **program**, seguida pelas definições de structs, declarações de variáveis, structs e/ou vetores e funções. Por fim, a estrutura **main** {<declarações> <comandos>} contém o programa principal a ser executado.

Um exemplo de programa está representado a seguir:

```
program

function int fatorial_iterativo(int n) {

    declare int fatorial;
    fatorial = 1;
    while (n > 0) {
        fatorial = fatorial * n;
        n = n - 1;
    }
    return fatorial;
}

main {
    declare int fat;
    fat = fatorial_iterativo(10);
    output fat;
}
```

2.1. Descrição Informal

A seguir, apresenta-se a representação informal das principais funcionalidades definidas para a linguagem

Funções

```
function tipo identificador ( parâmetro_1, ..., parâmetro_n ) {
    declaração_1;
    ...
    declaração_n;

    comando_1;
    ...
    comando_n;
}
```

Repetição Condicional

```
while (condição) {
    comando_1;
    ...
    comando_n;
}
```

Decisão

```
if (condição) {
    comando_1;
    ...
    comando_n;
}
if (condição) {
    comando_1;
    ...
    comando_n;
} else {
    comando_1;
    ...
    comando_n;
}
```

Entrada

```
input identificador ;
```

Saída

```
output identificador ;
```

2.2. Descrição Formal

Para formalização da sintaxe definida, foram usadas as notações BNF e Wirth. A descrição formal da gramática nas duas notações encontra-se a seguir.

Notação BNF

```
<programa> ::= program <definições> <declarações> <funções> main {
<declarações> <comandos> }

<definições> ::= <definição> <definições> | ε

<definição> ::= typedef struct <nome_da_estrutura> { <declarações> }

<nome_da_estrutura> ::= <identificador>
```

```

<declarações> ::= <declarações_variáveis> | <declarações_vetores> |
<declarações_structs> | <declarações> <declarações> | ε

<declarações_variáveis> ::= declare <declaração_variável> ; | declare
<declaração_variável>, <declarações_variáveis>

<declaração_variável> ::= <tipo> <identificador>

<declarações_vetores> ::= declare <declaração_vetor> ; | declare
<declaração_vetor>, <declarações_vetores>

<declaração_vetor> ::= <tipo> <identificador>[<número>]

<declarações_structs> ::= declare <declaração_struct> ; | declare
<declaração_struct>, <declarações_structs>

<declaração_struct> ::= struct <nome_da_estrutura> <identificador>

<funções> ::= function <tipo> <identificador> ( <parâmetros> ) {
<declarações> <comandos> }

<parâmetros> ::= <declaração_variável> | <declaração_variável>,
<parâmetros> | ε

<comandos> ::= <comando_atribuição> | <comando_condicional> |
<comando_iterativo> | <comando_entrada> | <comando_saída> |
<comando_chamada> | <comando_retorno> | <comandos> <comandos> | ε

<comando_atribuição> ::= <atribuição_variável> |
<atribuição_agregados> | <atribuição_vetor>

<atribuição_variável> ::= <identificador> = <expressão> ;
<atribuição_vetor> ::= <identificador>[<número>] = <expressão> ;

<atribuição_agregados> ::= <identificador> = { <expressões> } ;

<comando_condicional> ::= if ( <expressão> ) { <comandos> } | if (
<expressão> ) { <comandos> } else { <comandos> }

<comando_iterativo> ::= while ( <expressão> ) { <comandos> }

<comando_entrada> ::= input <identificador> ;

<comando_saída> ::= output <identificador> ;

<comando_chamada> ::= <identificador> ( <argumentos> ) ;

<comando_retorno> = return <expressão> ;

```

```

<expressões> ::= <expressão> | <expressão>, <expressões>

<expressão> ::= <expressão_lógica> | <expressão_aritmética> |
<identificador> | <elemento_do_vetor> | <elemento_struct> |
<chamada_função>

<expressão_lógica> ::= <booleano> | <expressão> <operador_lógico>
<expressão> | not <expressão_lógica>

<expressão_aritmética> ::= <número> | <expressão>
<operador_aritmético> <expressão>

<elemento_do_vetor> ::= <identificador>[<número>]

<elemento_struct> ::= <identificador>.<identificador>

<chamada_função> ::= <identificador> ( <argumentos> )

<argumentos> ::= <expressões>

<tipo> ::= int | boolean

<identificador> ::= <letra> | <letra><letra_digito>

<letra_digito> ::= <letra> | <dígito>

<letra> ::= A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O
| P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | a | b | c | d | e | f |
g | h | i | j | k | l | m | n | o | p | q | r | s | t | u | v | w | x
| y | z | _

<dígito> ::= 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9

<booleano> ::= true | false

<operador_lógico> ::= > | < | == | and | or

<operador_aritmético> ::= + | - | * | /

```

Notação Wirth

```

programa = "program" {definicao} {declaracao} {funcao} "main" "{"
{declaracao} {comando} "}" .

definicao = "typedef" "struct" nome_estrutura "{" {declaracao} "}" .

declaracao = declaracao_variaveis | declaracao_vetores |
declaracao_structs .

```



```

declaracao_variaveis = "declare" declaracao_variavel{","
declaracao_variavel  } ";"

declaracao_variavel = tipo_identificador .

declaracao_vetores = "declare" declaracao_vetor {""," declaracao_vetor
} ";" .

declaracao_vetor = tipo_identificador "[" numero "]" .

declaracao_structs = "declare" declaracao_struct {"","
declaracao_struct } ";" .

declaracao_struct = "struct" nome_estrutura identificador ";"

funcao = "function" tipo_identificador "(" [parametros] ")" "{"
{declaracao}{comando} "}" .

parametros = declaracao_variavel {""," declaracao_variavel} .

comando = comando_atribuicao | comando_condicional |
comando_iterativo | comando_entrada | comando_saida | comando_chamada
| comando_retorno .

comando_atribuicao = atribuicao_variavel | atribuicao_vetor
| atribuicao_agregado .

atribuicao_variavel = identificador "=" expressao ";" .

atribuicao_vetor = identificador "[" numero "]" "=" expressao ";" .

atribuicao_agregado = identificador "=" "{" expressao{"," expressao}
"};" .

comando_condicional = "if" "(" expressao ")" "{" {comando} "}" ["else"
{" {comando}"}] .

comando_iterativo = "while" "(" expressao ")" "{" {comando}"}" .

comando_entrada = "input" identificador ";" .

comando_saida = "output" identificador ";" .

comando_chamada = identificador "(" [argumentos] ")" ";" .

comando_retorno = "return" expressao ";" .

expressao = expressao_logica | expressao_aritmetica | identificador |
elemento_do_vetor | elemento_struct | chamada_funcao .

expressao_logica = booleano | "not" expressao_logica | expressao

```

```

operador_logico expressao .

expressao_aritmetica = numero | expressao operador_aritmetico
expressao .

elemento_do_vetor = identificador "[" numero "]" .

elemento_struct = identificador "." identificador .

chamada_funcao = identificador "(" [argumentos] ")" .

argumentos = expressao {"," expressao} .

booleano = "true" | "false" .

tipo = "int" | "boolean" .

nome_estrutura = identificador .

identificador = letra{letra|digito} .

letra = "a" | "b" | "c" | "d" | "e" | "f" | "g" | "h" | "i" | "j" |
"k" | "l" | "m" | "n" | "o" | "p" | "q" | "r" | "s" | "t" | "u" | "v"
| "w" | "x" | "y" | "z" | "A" | "B" | "C" | "D" | "E" | "F" | "G" |
"H" | "I" | "J" | "K" | "L" | "M" | "N" | "O" | "P" | "Q" | "R" | "S"
| "T" | "U" | "V" | "W" | "X" | "Y" | "Z" | "_".

digito = "0" | "1" | "2" | "3" | "4" | "5" | "6" | "7" | "8" | "9" .
numero = digito{digito} .

operador_logico = ">" | "<" | "==" | "and" | "or" .

operador_aritmetico = "+" | "-" | "*" | "/" .

```

2.3. Descrição Reduzida

Para que a análise sintática fosse implementada usando um autômato de pilha estruturado, a descrição em notação de Wirth foi reduzida através do agrupamento de não-terminais. Além disso, as recursões à esquerda foram eliminadas. O resultado da redução é mostrado a seguir.

```

programa = "program" { "typedef" "struct" identificador "{" {
"declare" ( ( "int" | "boolean" ) identificador [ "[" numero "]" ]
{""," ( "int" | "boolean" ) identificador [ "[" numero "]" ] } |
"struct" identificador identificador {""," "struct" identificador
identificador } ) ";" } } { "declare" ( ( "int" | "boolean" )
identificador [ "[" numero "]" ] {""," ( "int" | "boolean" )
identificador [ "[" numero "]" ] } | "struct" identificador
identificador {""," "struct" identificador identificador } ) ";" } {
"function" ( "int" | "boolean" ) identificador "(" [ ( "int" |

```

```

"boolean" ) identificador [ "[" numero "]" ] {"," ( "int" | "boolean"
) identificador [ "[" numero "]" ] } )" "{" { "declare" ( ( "int"
| "boolean" ) identificador [ "[" numero "]" ] {"," ( "int" |
"boolean" ) identificador [ "[" numero "]" ] } | "struct"
identificador identificador {"," "struct" identificador identificador
} ) ";" } {comando} ")" } "main" "{" { "declare" ( ( "int" |
"boolean" ) identificador [ "[" numero "]" ] {"," ( "int" | "boolean"
) identificador [ "[" numero "]" ] } | "struct" identificador
identificador {"," "struct" identificador identificador } ) ";" }
{comando} ")" .

```

```

comando = identificador ( "=" ( expressao | "{" expressao{","
expressao} ")" ) | "[" numero "]" "=" expressao | "(" [ expressao
{"," expressao} ] ")" ) ";" | "if" "(" expressao ")" "{" {comando}
}" ["else" "{" {comando}"}"] | "while" "(" expressao ")" "{"
{comando}"}" | "input" identificador ";" | "output" identificador ";"
| "return" expressao ";" .

```

```

expressao = ( "true" | "false" | "not" expressao | numero |
identificador [ "[" numero "]" | "." identificador | "(" [ expressao
{"," expressao} ] ")" ] ) [ ( ">" | "<" | "==" | "and" | "or" | "+" |
"-" | "*" | "/" ) expressao ] .

```

```

identificador = letra{letra|digito} .

```

```

letra = "a" | "b" | "c" | "d" | "e" | "f" | "g" | "h" | "i" | "j" |
"k" | "l" | "m" | "n" | "o" | "p" | "q" | "r" | "s" | "t" | "u" | "v"
| "w" | "x" | "y" | "z" | "A" | "B" | "C" | "D" | "E" | "F" | "G" |
"H" | "I" | "J" | "K" | "L" | "M" | "N" | "O" | "P" | "Q" | "R" | "S"
| "T" | "U" | "V" | "W" | "X" | "Y" | "Z" | "_".

```

```

digito = "0" | "1" | "2" | "3" | "4" | "5" | "6" | "7" | "8" | "9" .

```

```

numero = digito{digito} .

```

3. Análise Léxica

O módulo de análise léxica é responsável por converter o texto fonte em componentes chamados *tokens* ou átomos. Fornecendo, então, uma representação mais adequada para realização da análise e tradução pelos outros módulos do compilador.

Dessa maneira, o analisador léxico efetua a leitura do código fonte, e com o conhecimento das especificações da linguagem agrega os caracteres lidos do código em unidades que contenham um sentido completo para a linguagem, os *tokens*, descartando os caracteres que não possuem significado para a linguagem (por exemplo, caracteres de tabulação, na linguagem C).

Porém, mais informações são necessárias para as análises subsequentes, como o tipo de informação que está sendo representada pelo *token* (como, por exemplo, a classificação do átomo como um "identificador", "palavra reservada" ou "número"), além disso, um valor para o *token* também é necessário em outras etapas da compilação, esse valor pode ser um valor numérico do *token*, um índice em uma tabela de símbolos ou o próprio texto. Sendo também papel do analisador léxico realizar essas tarefas.

A tabela abaixo mostra os tipos de átomos reconhecidos pelo analisador léxico, definidos através de expressões regulares.

Classe do átomo	Expressão regular
Identificador	[letra][letra dígito]*
Palavra reservada	if else int boolean string false true while main void return def and or not
Caractere especial	+ - * / ; < > = == () " { }
Número	[dígito][dígito]*
String	["][qualquer_caractere_ascii]"
Espaçador	space \n \t
Comentário	[#][qualquer_caractere_ascii]*[\n]

O analisador léxico implementado realiza uma simples detecção de erros, retornando *tokens* inválidos quando o conjunto de caracteres lidos não corresponde a nenhuma das expressões representadas acima.

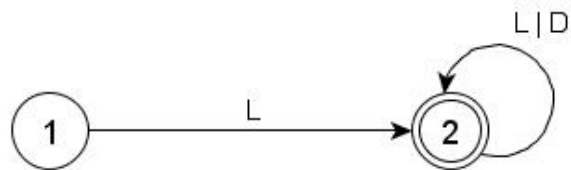
3.1. Autômatos

Para facilitar a representação do reconhecimento dos *tokens* pelo analisador léxico, as expressões regulares foram convertidas em autômatos finitos equivalentes, representados a seguir, onde:

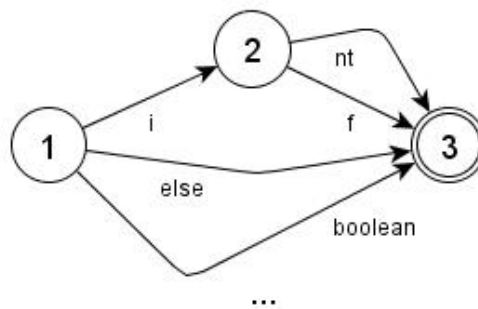
$L = A \mid B \mid \dots \mid Z \mid a \mid \dots \mid z$

$D = 0 \mid 1 \mid \dots \mid 9$

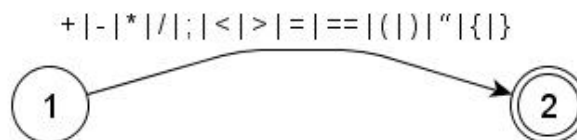
Identificador



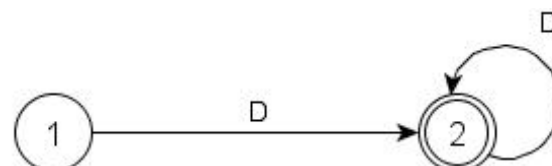
Palavra reservada



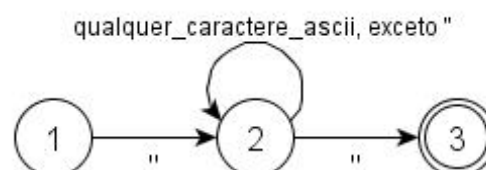
Caractere especial

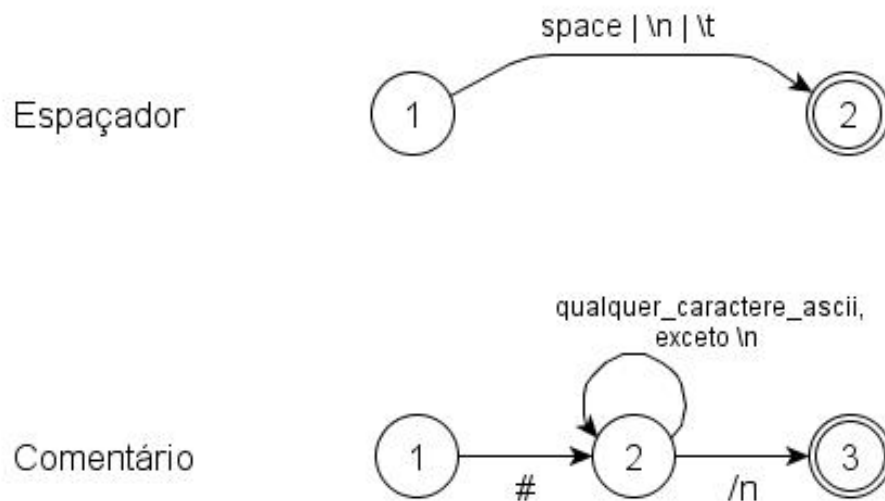


Número

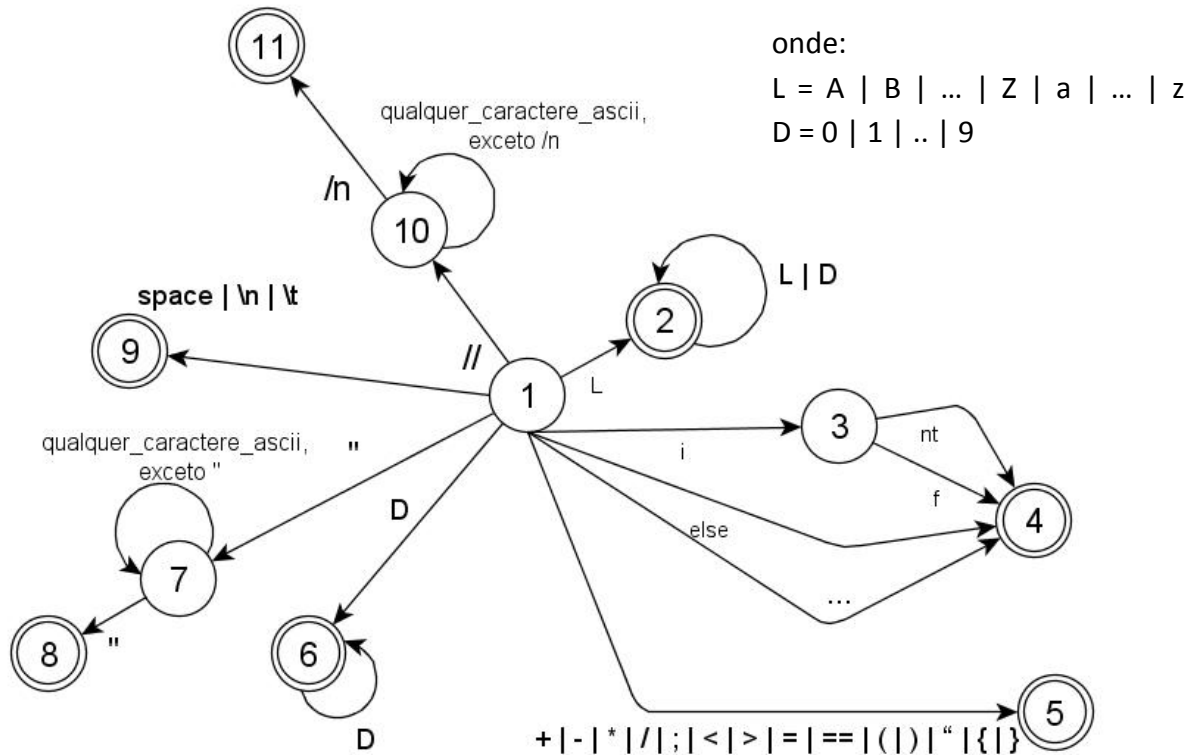


String

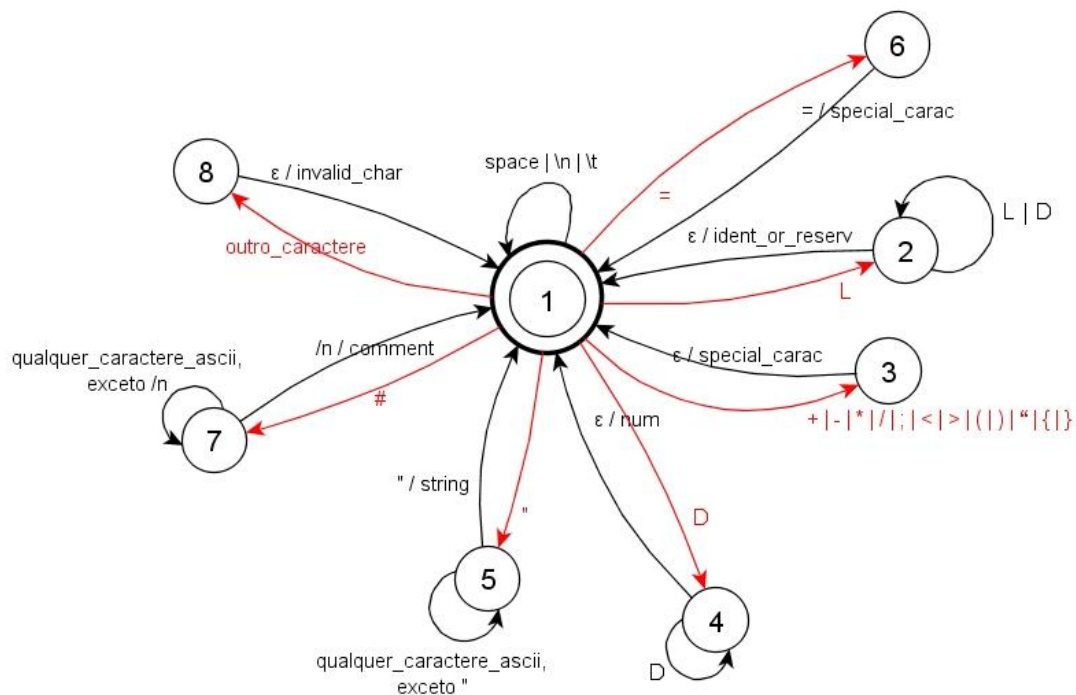




Estes autômatos reconhecem as correspondentes linguagens por eles definidas. Um autômato que reconhece todas essas linguagens, partindo de um mesmo estado inicial, mas apresentando um estado diferenciado para cada tipo de átomo é mostrado a seguir.



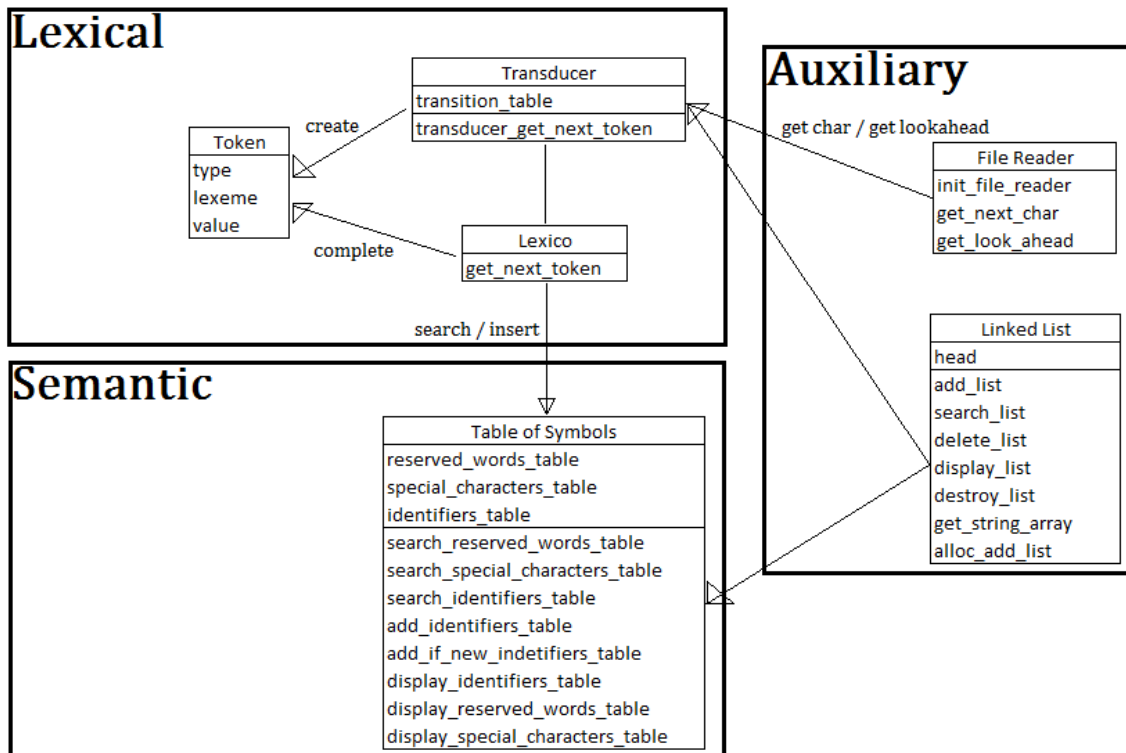
Por fim, o autômato foi convertido em transdutor, que emite como saída o átomo encontrado ao abandonar cada um dos estados finais para iniciar o reconhecimento de mais um átomo do texto.



A partir deste transdutor é possível observar uma simplificação realizada: o átomo **ident_or_reserv** representa um átomo que começa com uma letra seguida por letras ou dígitos. Este átomo pode ser do tipo **identificador** ou **palavra_reservada**, porém o transdutor indefere estes dois tipos, deixando esta tarefa para uma rotina posterior, ainda no analisador léxico. Maiores detalhes da implementação são expostos na próxima seção.

3.2. Implementação

O analisador léxico foi implementado como uma sub-rotina que é chamada pelo analisador sintático sempre que um novo *token* for necessário. A arquitetura básica da implementação do analisador léxico é a que segue:



Os arquivos `token.h` e `token.c` representam um *token* na linguagem, contendo seu tipo, lexema (ou seja, o texto que representa o *token*) e seu valor. Neles são definidos todos os tipos possíveis de tokens existentes na linguagem. Vale observar que para alguns tipos (*string*, *comment*, ...) o atributo *lexeme* é utilizado no lugar do *value*.

Os arquivos `lexico.h` e `lexico.c` representam o analisador léxico. Na implementação realizada, o analisador léxico faz requisições de tokens para o transdutor, que retorna um token com um tipo inicial (não necessariamente válido para a linguagem). É então, papel do analisador léxico completar o token retornado com o restante dos dados necessários, ou seja, calcular o valor dos tokens, bem como os tipos exatos de cada um, retornando o valor para quem fez a requisição. Além disso, o analisador também é responsável pelas inserções nas tabelas de identificadores, verificando a existência, ou não, de um identificador, e inserindo apropriadamente.

Os arquivos `table_of_symbols.h` e `table_of_symbols.c` representam as tabelas de símbolos existentes no compilador. Três tabelas de símbolos são utilizadas, a de palavras reservadas, a de caracteres especiais e a de identificadores. Por terem tamanho fixo, as tabelas de palavras reservadas e caracteres especiais foram implementadas através de matrizes, inicializadas com todos os lexemas possíveis. Já a tabela de identificadores, que apresenta tamanho variável, foi implementada através

de uma lista ligada. Todas as tabelas apresentam funções de busca, e a tabela de identificadores apresenta também funções para inserção.

Os arquivos `file_reader.c` e `file_reader.h` implementam rotinas auxiliares de leitura. Dado um arquivo de entrada há funções para acesso ao caractere sendo lido e ao próximo caractere a ser lido, essas funções são `get_next_char()` e `get_look_ahead()`. O arquivo de entrada é determinado ao inicializar o `file_reader` através da função `void init_file_reader(char *path)`. Esta inicialização é feita na função *main*.

Os arquivos `transducer.c` e `transducer.h` implementam o transdutor mostrado no Capítulo 3.1. Para isto, existe uma matriz de transição (denominada `transition_table`) onde as linhas representam os estados atuais e, dado um caractere de entrada (representado pelas colunas), o valor da célula correspondente indica o próximo estado. Os estados são representados por números inteiros e correspondem aos estados da figura do transdutor.

A função `transducer_get_next_token()` percorre o arquivo de entrada (através de funções auxiliares) e, a cada caractere lido, atualiza seu estado. Quando o transdutor volta para o estado 1 (inicial), ele atualiza uma variável global `token` preenchendo seu *type* e *lexeme* (o preenchimento do campo *value* e eventual atualização do seu tipo é feito posteriormente por rotinas do léxico). Para possibilitar as transições vazias do transdutor é usado o caractere `look_ahead`. Quando, usando o `lookahead`, é observado que o token incompleto se tornaria inválido, o token é atualizado e o transdutor volta ao estado inicial.

Um teste foi realizado comprovando o correto funcionamento do analisador léxico. A entrada e saída correspondente são mostradas a seguir.

Entrada_teste.txt		
<pre>int a = 1; int b=2; string s = "olá!?" ; # comentário qualquer int a = 2,2; 123 # \$ {typedef}</pre>		
Saída	Tabelas de símbolos	
<pre>int TTYPE_RESERVED_WORD <2> a TTYPE_IDENTIFIER <0> = TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <7> 1 TTYPE_NUM <1> ; TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <13> int TTYPE_RESERVED_WORD <2> b TTYPE_IDENTIFIER <1> = TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <7> 2 TTYPE_NUM <2> ; TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <13> string TTYPE_RESERVED_WORD <3> s TTYPE_IDENTIFIER <2> = TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <7> ol !?!? TTYPE_STRING <7> ; TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <13> # coment TTYPE_COMMENT <13> rio qualquer int TTYPE_RESERVED_WORD <2> a TTYPE_IDENTIFIER <0> = TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <7> 2 TTYPE_NUM <2> , TTYPE_INVALID <2> 2 TTYPE_NUM <2> ; TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <13> 123 TTYPE_NUM <123> # TTYPE_COMMENT <123> \$ TTYPE_INVALID <123> { TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <11> typedef TTYPE_IDENTIFIER <3> } TTYPE_SPECIAL_CHARACTER <12> TTYPE_END_OF_FILE <12></pre>	<pre>Reserved words table 0 void 1 boolean 2 int 3 string 4 main 5 def 6 if 7 else 8 while 9 return 10 true 11 false 12 and 13 or 14 not Special characters table 0 + 1 - 2 * 3 / 4 > 5 < 6 == 7 = 8 < 9 > 10 " 11 { 12 } 13 ; Identifiers table 0 a 1 b 2 s 3 typedef</pre>	
tokens reconhecidos no formato: lexeme TYPE (value)		

4. Análise Sintática

A análise sintática é responsável por verificar se o código a ser analisado corresponde à gramática da linguagem-fonte.

Em compiladores orientados por sintaxe, como é o caso do compilador desenvolvido, o analisador sintático é responsável por controlar as atividades do compilador, sendo responsável por efetuar chamadas de funções léxicas para o recebimento de *tokens* conforme os mesmos são consumidos.

A partir dos *tokens* gerados pelo analisador léxico, o analisador sintático analisa a sequência de recebimentos dos *tokens* e monta a árvore sintática.

4.1. Submáquinas do Autômato de Pilha Estruturado (APE)

A implementação do analisador sintático do compilador desenvolvido foi baseada no autômato de pilha estruturado (APE) tornando-se necessária a tradução dos três terminais essenciais (PROGRAMA, COMANDO e EXPRESSAO) em autômatos.

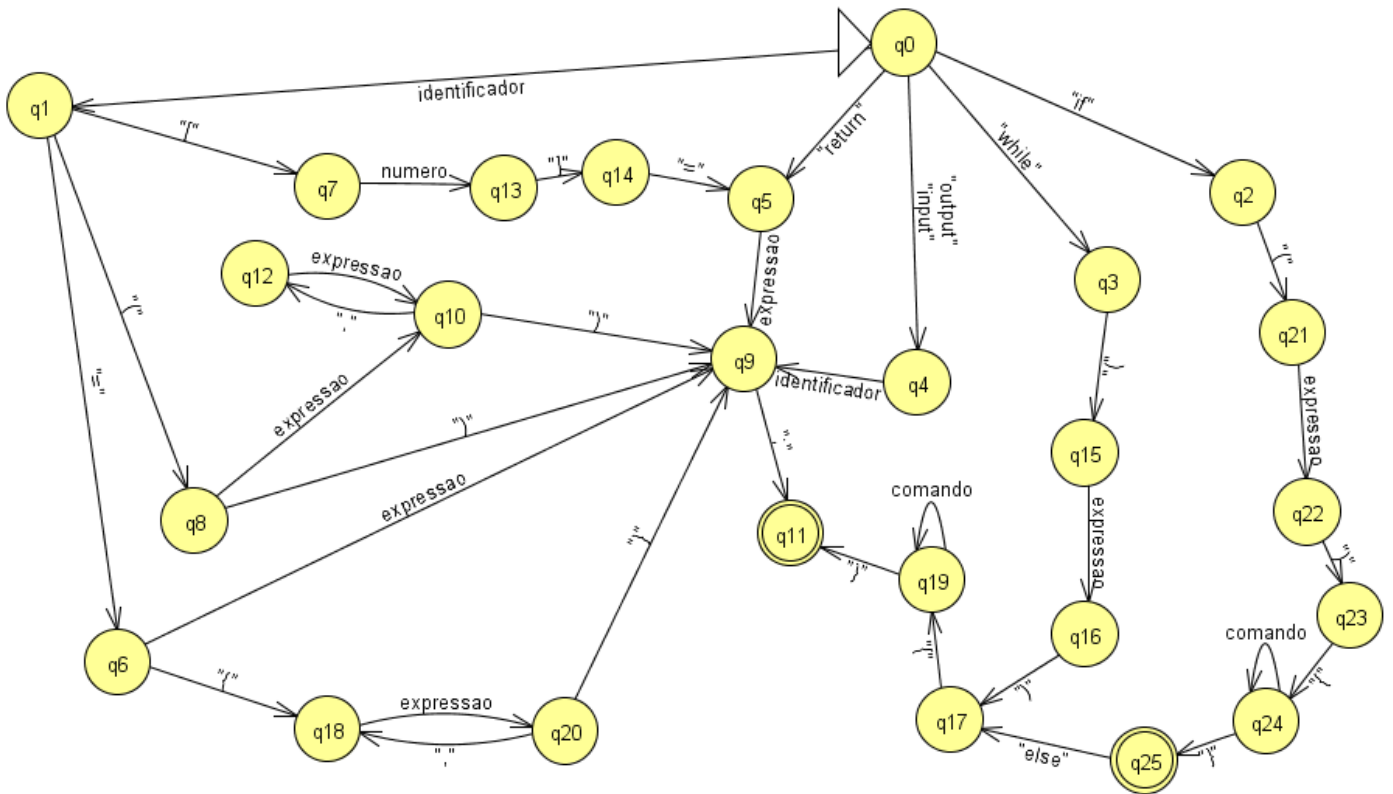
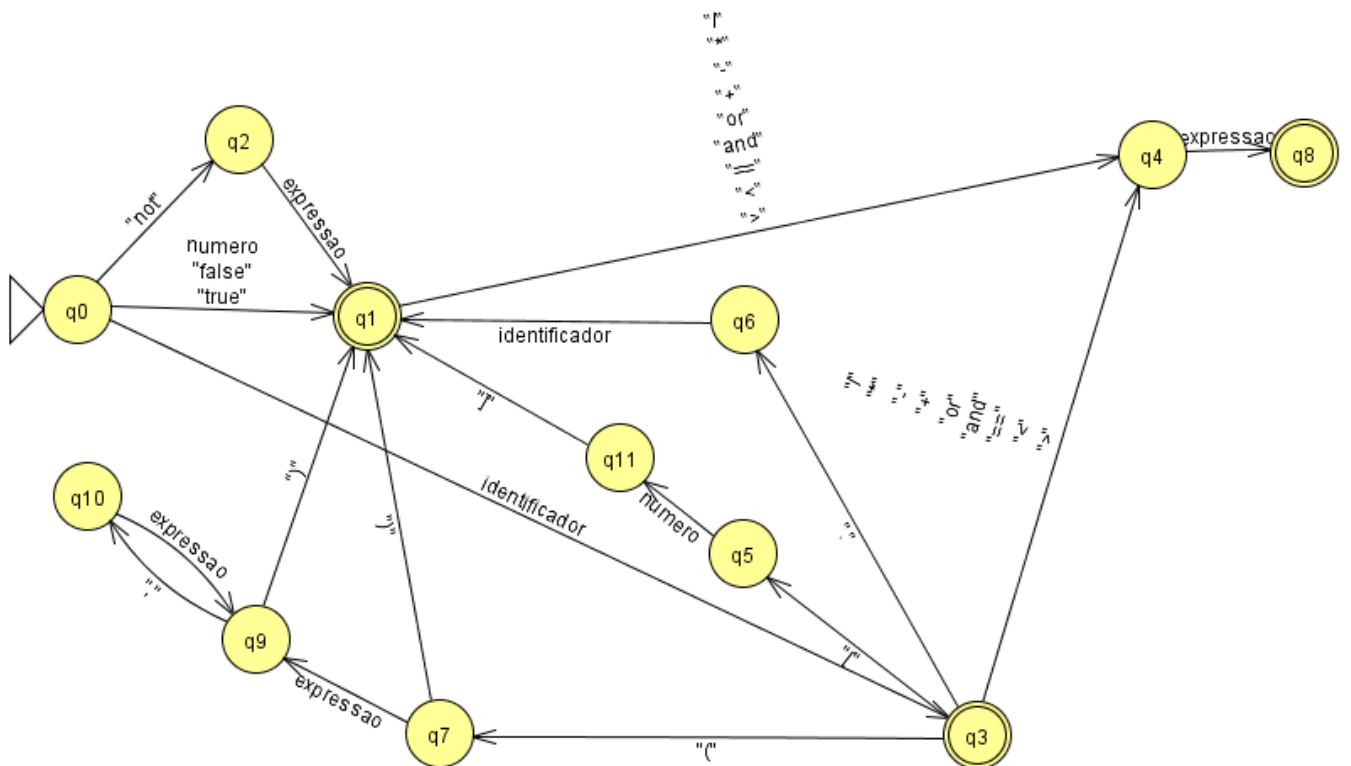
Para esta tradução, foi utilizado o gerador de autômatos disponível em: <http://radiant-fire-72.herokuapp.com/>. Ao inserir descrição reduzida da linguagem na notação Wirth, mostrada no Capítulo 2.3, obteve-se as seguintes listas de transições:

PROGRAMA	COMANDO	EXPRESSAO
initial: 0 final: 10 (0, "program") -> 1 (1, "typedef") -> 2 (1, "declare") -> 3 (1, "function") -> 4 (1, "main") -> 5 (2, "struct") -> 6 (3, "struct") -> 35 (3, "int") -> 36 (3, "boolean") -> 36 (4, "int") -> 34 (4, "boolean") -> 34 (5, "{") -> 7 (6, identificador) -> 8 (7, "declare") -> 9 (7, "{") -> 10 (7, comando) -> 11 (8, "{") -> 12 (9, "struct") -> 14 (9, "int") -> 15 (9, "boolean") -> 15 (11, "{") -> 10 (11, comando) -> 11 (12, "declare") -> 13 (12, "{") -> 1 (13, "struct") -> 16 (13, "int") -> 17	initial: 0 final: 11, 25 (0, identificador) -> 1 (0, "if") -> 2 (0, "while") -> 3 (0, "input") -> 4 (0, "output") -> 4 (0, "return") -> 5 (1, "=") -> 6 (1, "[") -> 7 (1, "(") -> 8 (2, "(") -> 21 (3, "(") -> 15 (4, identificador) -> 9 (5, expressao) -> 9 (6, expressao) -> 9 (6, "{") -> 18 (7, numero) -> 13 (8, expressao) -> 10 (8, ")") -> 9 (9, ";") -> 11 (10, ",") -> 12 (10, ")") -> 9 (12, expressao) -> 10 (13, "]") -> 14 (14, "=") -> 5 (15, expressao) -> 16	initial: 0 final: 1, 3, 8 (0, "true") -> 1 (0, "false") -> 1 (0, "not") -> 2 (0, numero) -> 1 (0, identificador) -> 3 (1, ">") -> 4 (1, "<") -> 4 (1, "==") -> 4 (1, "and") -> 4 (1, "or") -> 4 (1, "+") -> 4 (1, "-") -> 4 (1, "*") -> 4 (1, "/") -> 4 (2, expressao) -> 1 (3, "[") -> 5 (3, ".") -> 6 (3, "(") -> 7 (3, ">") -> 4 (3, "<") -> 4 (3, "==") -> 4 (3, "and") -> 4 (3, "or") -> 4 (3, "+") -> 4 (3, "-") -> 4

<pre> (13, "boolean") -> 17 (14, identificador) -> 28 (15, identificador) -> 18 (16, identificador) -> 29 (17, identificador) -> 19 (18, "[") -> 20 (18, ",") -> 21 (18, ";") -> 7 (19, "[") -> 22 (19, ",") -> 23 (19, ";") -> 12 (20, numero) -> 24 (21, "int") -> 15 (21, "boolean") -> 15 (22, numero) -> 25 (23, "int") -> 17 (23, "boolean") -> 17 (24, "]") -> 26 (25, "]") -> 27 (26, ",") -> 21 (26, ";") -> 7 (27, ",") -> 23 (27, ";") -> 12 (28, identificador) -> 30 (29, identificador) -> 31 (30, ",") -> 32 (30, ";") -> 7 (31, ",") -> 33 (31, ";") -> 12 (32, "struct") -> 14 (33, "struct") -> 16 (34, identificador) -> 37 (35, identificador) -> 57 (36, identificador) -> 38 (37, "(") -> 39 (38, "[") -> 40 (38, ",") -> 41 (38, ";") -> 42 (39, "int") -> 43 (39, "boolean") -> 43 (39, ")") -> 44 (40, numero) -> 49 (41, "int") -> 36 (41, "boolean") -> 36 (42, "declare") -> 3 (42, "function") -> 4 (42, "main") -> 5 (43, identificador) -> 62 (44, "{") -> 45 (45, "declare") -> 46 (45, "}") -> 47 (45, comando) -> 48 (46, "struct") -> 50 (46, "int") -> 51 (46, "boolean") -> 51 (47, "function") -> 4 (47, "main") -> 5 (48, "}") -> 47 (48, comando) -> 48 (49, "]") -> 52 (50, identificador) -> 61 </pre>	<pre> (16, ")") -> 17 (17, "{") -> 19 (18, expressao) -> 20 (19, "}") -> 11 (19, comando) -> 19 (20, ",") -> 18 (20, "}") -> 9 (21, expressao) -> 22 (22, ")") -> 23 (23, "{") -> 24 (24, "}") -> 25 (24, comando) -> 24 (25, "else") -> 17 </pre>	<pre> (3, "*") -> 4 (3, "/") -> 4 (4, expressao) -> 8 (5, numero) -> 11 (6, identificador) -> 1 (7, expressao) -> 9 (7, ")") -> 1 (9, ",") -> 10 (9, ")") -> 1 (10, expressao) -> 9 (11, "]") -> 1 </pre>
---	---	--

<pre> (51, identificador) -> 53 (52, ",") -> 41 (52, ";") -> 42 (53, "[") -> 54 (53, ",") -> 55 (53, ";") -> 45 (54, numero) -> 56 (55, "int") -> 51 (55, "boolean") -> 51 (56, "]") -> 58 (57, identificador) -> 59 (58, ",") -> 55 (58, ";") -> 45 (59, ",") -> 60 (59, ";") -> 42 (60, "struct") -> 35 (61, identificador) -> 63 (62, "[") -> 64 (62, ",") -> 65 (62, ")") -> 44 (63, ",") -> 66 (63, ";") -> 45 (64, numero) -> 67 (65, "int") -> 43 (65, "boolean") -> 43 (66, "struct") -> 50 (67, "]") -> 68 (68, ",") -> 65 (68, ")") -> 44 </pre>		
---	--	--

Para uma melhor visualização dos autômatos, foi utilizado o programa JFLAP, obtendo-se as representações a seguir, onde cada figura representa uma submáquina.

COMANDO**EXPRESSAO**

4.2. Implementação

O analisador sintático foi implementado como uma rotina do programa principal. A princípio, são inicializados todos os recursos utilizados pela análise sintática (o analisador léxico, tabela de transição e o autômato de pilha estruturado).

Então, a rotina pede o próximo *token* ao analisador léxico e, enquanto não terminar de ler o arquivo ou encontrar um erro na análise sintática, o analisador executa um passo do seu autômato de pilha estruturado. O passo do APE é sua principal função, ilustrada abaixo:

```
int spa_step() {
    int machine_token_type = spa_convert_token_to_machine_type();
    if (machine_token_type == MTTYPE_INVALID) return 0;
    return transition_current_machine_with_token(machine_token_type);
}
```

O autômato de pilha estruturado (APE) utiliza autômatos finitos que representam os três não terminais da linguagem (PROGRAMA, COMANDO, EXPRESSAO). Primeiramente ele converte o *token* retornado pelo analisador sintático, para que ele seja reconhecido nas transições dos autômatos finitos da linguagem.

Então, o passo do APE realiza uma transição da máquina atual com o *token* convertido. Essa transição possui três possibilidades. O primeiro caso consiste na existência de uma transição na máquina corrente do estado atual com o *token* recebido. Esse caso é tratado na função “transition_to_next_state(int next_state)”:

```
void transition_to_next_state (int next_state) {
    actions_on_state_transition[current_machine.machine_id]
        [current_machine.current_state]
        [spa_convert_token_to_machine_type()](token);
    current_machine.current_state = next_state;}
}
```

Nesse caso, o mais simples deles, apenas ocorre uma mudança de estado da máquina atual. Além disso, a transição também desencadeia uma ação semântica, com uma de chamada de função guardada na matriz `actions_on_state_transition`. As ações semânticas serão descritas com maiores detalhes no capítulo referente à análise semântica.

O segundo caso, é quando a transição de estado é uma chamada de submáquina. Esse caso é tratado na seguinte função:


```

void call_machine(int machine_type) {
    actions_on_machine_transition[current_machine.machine_id]
                                [current_machine.current_state]
                                [machine_type](token);

    current_machine.current_state = current_machine.machine_calls
                                [current_machine.current_state]
                                [machine_type];

    spa_stack_push(current_machine, spa_stack);
    current_machine = machines_array[machine_type];
    current_machine.current_state = 0;
}

```

Para que seja possível o correto funcionamento do APE, é necessário guardar, em uma pilha, a máquina atual e o estado no qual ela se encontrará após o retorno da máquina chamada. Para isso, foi implementada uma pilha em “*spa_stack.h*” e “*spa_stack.c*”, utilizada pelo APE para empilhar a máquina corrente antes de transicionar para a próxima. Além disso, a transição também desencadeia uma ação semântica.

O último caso existente é aquele em que o autômato chegou ao seu estado final, mas ainda existem máquinas empilhadas. Nesse caso, o que ocorre é um retorno à máquina anterior, pela função:

```

void return_machine() {
    actions_on_machine_return[current_machine.machine_id]
                            [current_machine.current_state](token);
    current_machine = spa_stack_pop(spa_stack); }

```

Nesse caso, é desencadeada uma ação semântica, e, além disso, retorna-se a máquina que se encontra no topo da pilha, para continuar a execução do APE de maneira adequada.

Todas as informações das máquinas utilizadas pelo APE se encontram nos arquivos “*machines.h*” e “*machines.c*”. Sendo estes modelos das máquinas, com suas tabelas de transição de estados, estados finais e transições que representam chamadas de máquinas.

5. Características da MVN

O ambiente em questão consiste da arquitetura do computador-alvo que é, neste caso, a MVN disponibilizada. A MVN (Máquina de von Neumann) simula o Modelo de von Neumann como um processador simples composto pelos seguintes elementos: Memória, Acumulador e Registradores Auxiliares.

Também faz parte do ambiente de execução o Montador disponibilizado. Portanto, a linguagem de saída do compilador desenvolvido não é a linguagem de máquina da MVN, mas sim, uma linguagem simbólica composta por mnemônicos e que lida com rótulos, operandos e sub-rotinas para endereçamento dentro de um programa.

Esta linguagem simbólica será descrita nos itens a seguir.

5.1. Instruções da linguagem de saída

Operação	Mnemônico	Operando	Descrição
Jump	JP	Endereço/Rótulo de desvio	Desvio incondicional
Jump if Zero	JZ	Endereço/Rótulo de desvio	Desvio se valor no acumulador é zero
Jump if Negative	JN	Endereço/Rótulo de desvio	Desvio se valor no acumulador é negativo
Load Value	LV	Constante de 12 bits	Deposita uma constante no acumulador
Add	+	Endereço/Rótulo do operando	Soma o conteúdo do acumulador com o operando
Subtract	-	Endereço/Rótulo do subtraendo	Subtração do conteúdo do acumulador com o subtraendo
Multiply	*	Endereço/Rótulo do multiplicador	Multiplicação do conteúdo do acumulador com o multiplicador
Divide	/	Endereço/Rótulo do divisor	Divisão do conteúdo do acumulador com o divisor
Load	LD	Endereço/Rótulo do dado	Copia valor contido no endereço de memória para acumulador
Move to Memory	MM	Endereço/Rótulo de destino do dado	Copia valor do acumulador para a memória
Subroutine Call	SC	Endereço/Rótulo do subprograma	Desvio para subprograma
Return from Subroutine	RS	Endereço/Rótulo de retorno	Retorno de subprograma
Halt Machine	HM	Endereço/Rótulo do	Parada

		desvio	
Get Data	GD	Dispositivo de E/S	Entrada
Put Data	PD	Dispositivo de E/S	Saída
Operating System	OS	Constante	Chamada de supervisor

5.2. Pseudoinstruções da linguagem de saída

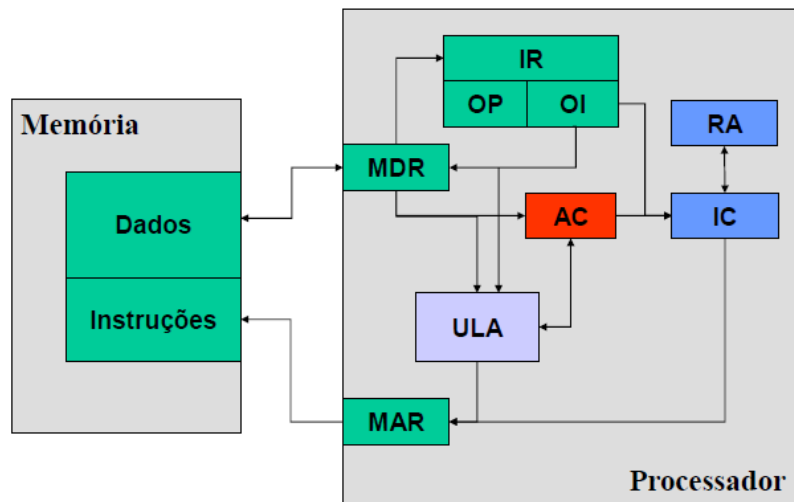
Pseudoinstrução	Descrição
@	Recebe um operando numérico, define o endereço da instrução seguinte, uma origem absoluta para o código a ser gerado
K	Define área preenchida por uma constante, o operando numérico tem o valor da constante de 2 bytes (em hexadecimal)
\$	Define um bloco de memória com número especificado de bytes, o operando numérico define o tamanho da área a ser reservada (em bytes)
#	Define o fim físico do texto fonte
&	Define uma origem relocável para o código a ser gerado, o operando é o endereço em que o próximo código se localizará (relativo à origem do código corrente)
>	Define endereço simbólico de entrada (Entry Point)
<	Define um endereço simbólico que referencia um entry-point externo

5.3. Características gerais

O ambiente de execução é composto pela simulação de um processador muito simples. Esse simulador apresenta um conjunto de elementos de armazenamento e dados, são eles: memória principal, acumulador e registradores auxiliares.

Primeiramente, na memória principal são armazenados as instruções dos programas e os dados utilizados por eles. Já o acumulador é um registrador especial que é utilizado para a realização das operações aritméticas e lógicas, por exemplo, a realização da instrução “+ VALOR” pode ser interpretada como “some o conteúdo indicado pelo rótulo ‘VALOR’ ao acumulador”.

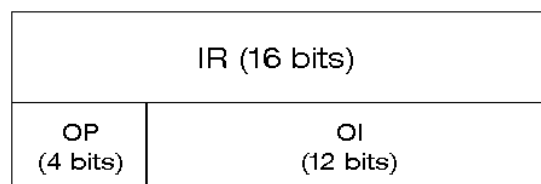
Por fim, os registradores auxiliares são utilizados em operações intermediárias. A tabela abaixo apresenta uma relação dos registradores auxiliares da MVN e suas funções. A arquitetura do simulador de MVN utilizado como ambiente de execução está representada na figura a seguir.



Por fim, os registradores auxiliares são utilizados em operações intermediárias. A tabela abaixo apresenta uma relação dos registradores auxiliares da MVN e suas funções.

Registrador Auxiliar	Utilização
Registrador de Dados da Memória (MDR)	Utilizado para tráfego de dados entre a memória e outros elementos da MVN
Registrador de Endereço de Memória (MAR)	Contém a origem ou destino dos dados que se encontram no MDR
Registrador de Endereço de Instrução (IC)	Armazena a próxima instrução a ser executada pela máquina
Registrador de Instrução (IR)	Representa a instrução em execução, é composto de duas parcelas: o código de operação (OP) e o operando da instrução (OI).

O registrador de Instrução (IR) da MVN armazena a instrução em execução corrente. A parcela OP é composta por 4 bits que codificam a instrução já a parcela OI complementa a instrução com o dado ou endereço parâmetro da instrução.



A memória possui capacidade de 4K de armazenamento e endereços de 12 bits. O acesso a variáveis é feito diretamente pelo endereço de memória, aleatoriamente. E a codificação numérica é feita em complemento de dois, com o bit mais significativo sendo indicador de sinal.

Duas instruções serão descritas em maiores detalhes para entender melhor o funcionamento do simulador, a de chamada de subrotina e de retorno de subrotina.

Chamada de subrotina

Para realização da chamada de (ou desvio para) subrotina é necessário armazenar o endereço da próxima instrução que seria executada antes do desvio, a fim de manter a ordem de execução do programa.

Dessa forma o conteúdo do registrador de instrução (IC) é armazenado no endereço de memória passado como operando da instrução de chamada de subrotina, salvando a posição de retorno da subrotina.

Então, é colocado no IC o endereço apontado pelo operando da instrução incrementado de um. Fazendo assim o desvio de execução do programa para o início da execução da subrotina.

Retorno de subrotina

Devido ao método como foi implementada na MVN a chamada de subrotina, o retorno da subrotina se dá simplesmente trocando o conteúdo do registrador de instrução (IC) com o conteúdo da posição de memória apontada pelo operando da instrução.

6. Tradução de Comandos

Antes da implementação do analisador semântico, traduções de algumas estruturas e comandos foram feitas de forma a definir um padrão e auxiliar o desenvolvimento das ações semânticas. Tais traduções serão expostas neste capítulo.

6.1. Controle de fluxo

If-then

Linguagem de entrada	Linguagem de montagem
if (<expressão>) { <acoes> }	<expressão> JN endif; JZ endif; <acoes> endif
if (a < b) { }	LD zero ; - a ; + b ; JN endif; JZ endif; endif

If-then-else

Linguagem de entrada	Linguagem de montagem
if (<expressão>) { <comandos> } else { <comandos> }	<expressão> JN endif; JZ endif; <comandos> JP endelse ; endif <comandos> endelse
if (a < b) { } else { }	LD zero ; - a ; + b ; JN endif ; JZ endif ; JP endelse ; endif endelse

While

Linguagem de entrada	Linguagem de montagem
while (<expressao>) { <comandos> }	while <expressao> JN endwhile ; JZ endwhile ; <comandos> JP while ; endwhile
while (a < b) { }	while LD zero ; - a ; + b ; JN endwhile ; JZ endwhile ; JP while ; endwhile

6.2. Comandos imperativos

Atribuição de valor

Linguagem de entrada	Linguagem de montagem
a = <expressao>;	<expressao> MM a ;
a = b	LD b ; MM a ;

Impressão (saída)

Linguagem de entrada	Linguagem de montagem
output a;	LD a ; MM output_number ; SC output ;
Subrotina de Output	
output_number	K =0 ; Número para ser impresso
FFFF	K /FFFF ; Base da representação
minus_sign	K =45 ; Sinal de menos em ASCII
ascii_offset	K =48 ; Offset para o código de um número na tabela ASCII
o_temp1	K =0 ; Guarda o valor da última dezena
o_temp2	K =1 ; Indicador da dezena
output	JP /0000 ;
	LD ten ; Inicialização
	MM o_temp2 ;
	LD output_number ;
	JN o_negative ; Número negativo
	JP o_start ; Número positivo
o_negative	LD minus_sign ; Caso contrário imprime "-"

	PD	/0100	;
	LD	FFFF	; E inverte o número
	-	output_number	;
	+	one	;
	MM	output_number	;
o_start	MM	o_temp1	;
o_loop	LD	output_number	; Carrega o número
	/	o_temp2	;
	JZ	o_print	; Imprime se é o número mais a esquerda.
	MM	o_temp1	; Se não, guarda o número
	LD	o_temp2	; Aumenta a casa decimal
	*	ten	;
	MM	o_temp2	;
	JP	o_loop	; E volta para o loop
o_print	LD	o_temp1	; Impressão do número
	+	ascii_offset	;
	PD	/0100	;
	LD	o_temp2	; Verifica se é o último número
	/	ten	;
	MM	o_temp2	;
	-	one	;
	JZ	o_end	; Vai para o final, se imprimiu tudo
	LD	o_temp1	;
	*	o_temp2	;
	MM	o_temp1	;
	LD	output_number	; Atualiza o número para impressão
	-	o_temp1	;
	MM	output_number	;
	MM	o_temp1	;
	LD	ten	;
	MM	o_temp2	;
	JP	o_loop	; Imprime o próximo caractere
o_end	RS	output	; Final da rotina

Leitura (entrada)

Linguagem de entrada		Linguagem de montagem	
input a;		SC input ;	
		MM a ;	
Subrotina de Input			
input_number	K	=0	; Variável de retorno da rotina
i_negative	K	=0	; Número digitado é negativo
i_temp	K	=0	; Variáveis temporárias
i_temp2	K	=0	;
input	JP	/0000	;
	LD	zero	; Inicialização
	MM	input_number	;
	MM	i_negative	;
	MM	i_temp	;


```

MM    i_temp2          ;
GD    /0000            ; Leitura de número negativo
MM    i_temp           ; Guarda caracteres lidos em i_temp
/     sixteen          ; Obtém o primeiro caracter
/     sixteen          ;
MM    i_temp2          ;
-     ascii_minus      ; Verifica se número digitado é negativo
JZ    set_i_negative   ;
JP    1st_char         ; Não é negativo, lê como número
set_i_negative
LD    one              ; Carrega o i_negative com FFFF
MM    i_negative       ;
JP    2nd_char         ; Lê o segundo caracter
i_loop GD    /0000      ; Loop de leitura
MM    i_temp           ; Guarda caracteres lidos em i_temp
/     sixteen          ; Obtém o primeiro caracter
/     sixteen          ;
MM    i_temp2          ;
1st_char - ascii_cr    ; Verifica se é o fim (ascii \d ou \a)
JZ    i_end            ;
LD    i_temp2          ;
-     ascii_lf         ;
JZ    i_end            ;
LD    input_number     ; Não é o último caracter
*     ten              ; Aumenta uma dezena no resultado
MM    input_number     ;
LD    i_temp2          ; Converte caracter lido em número
-     ascii_offset     ;
+     input_number     ; Soma no resultado de retorno
MM    input_number     ; Atualiza o resultado de retorno
2nd_char
LD    i_temp2          ; Obtém o segundo caracter
*     sixteen          ;
*     sixteen          ;
MM    i_temp2          ;
LD    i_temp           ;
-     i_temp2          ;
MM    i_temp2          ;
-     ascii_cr         ; Verifica se é o fim (ascii \d ou \a)
JZ    i_end            ;
LD    i_temp2          ;
-     ascii_lf         ;
JZ    i_end            ;
LD    input_number     ; Não é o último caracter
*     ten              ; Aumenta uma dezena no resultado
MM    input_number     ;
LD    i_temp2          ; Converte caracter lido em número
-     ascii_offset     ;
+     input_number     ; Soma no resultado de retorno
MM    input_number     ; Atualiza o resultado de retorno
JP    i_loop           ; Lê o proximo caracter
i_end LD    i_negative  ; Transforma em negativo se negativo
JZ    i_return         ;
LD    zero             ;

```

	-	input_number	;
	MM	input_number	;
i_return			
	LD	input_number	;
	RS	input	;

Chamada de subrotina

Linguagem de entrada		Linguagem de montagem	
funcao(a);		LD tam_func ; Carrega o tamanho do R.A. MM tam_registro_ativacao LD end_retorno ; Carrega o endereço de retorno do R.A. MM end_registro_ativacao SC cria_registro_ativacao ; Cria R.A. LD 1 ; Carrega parâmetro da função MM pos_param_1 SC store_ra_pos SC função ; Executa a função	
Subrotina do ambiente de execução			
load_inst	LD	/0000	; Instrução para o acesso indireto
store_inst	MM	/0000	; Instrução para store indireto
pos_param	K	=0	; Posição do parâmetro da função
load_ra_pos	JP	/0000	; Ponto de entrada da subrotina
	LD	STOP	; Carrega topo da pilha do R.A.
	-	two	; Diminui um endereço na pilha do R.A.
	-	pos_param	; Accumulador com o endereço correto
	+	load_inst	; Here's the magic: Cria instrução nova!
	MM	hack	; Armazena como a PROXIMA INSTRUCAO!
hack	K	/0	; Reservado para guardar a instrução recém-montada
	RS	load_ra_pos	; Thanks to Débora for this piece of gold
store_ra_pos	JP	/0000	;
	LD	STOP	; Carrega topo da pilha do R.A.
	-	two	; Diminui um endereço na pilha do R.A.
	-	pos_param	; Accumulador com o endereço correto
	+	store_inst	; Here's the magic: Cria instrução nova!
	MM	hack2	; Armazena como a PROXIMA INSTRUCAO!
hack2	K	/0	; Reservado para guardar a instrução recém-montada
	RS	store_ra_pos	;
ra_tam	K	=0	;
ra_end	K	=0400	;
cria_ra	JP	/0000	;
	LD	STOP	;
	+	two	;
	MM	STOP	;
	LD	zero	;
	MM	pos_param	;
	LD	ra_end	;
	SC	store_ra_pos	;
	LD	STOP	;
	+	ra_tam	;

MM	STOP	;
RS	cria_ra	;

6.3. Exemplo de programa traduzido

```
program
```

```
main {
    declare int num, int fat;
    input num;
    output num;

    if(num < 0) {
        fat = 0;
    }
    else {
        fat = 1;
        while(num > 1) {
            fat = fat * num;
            num = num - 1;
        }
    }
    output fat;
}
```

```
; Rotinas do ambiente de execucao ;
```

```
; . ;
; . ;
; . ;
```

```
@ /0200
```

```
main      JP  /0000      ;
          SC  input      ; Comando de input
          MM  V0          ;
          LD  V0          ; Comando de output
          MM  output_number ;
          SC  output      ;
I0         LD  zero      ; Begin if case
          LD  K0          ; Comparacao X < Y
          -   V0          ;
          MM  T0          ;
          LD  T0          ;
          JN  _I0         ;
          JZ  _I0         ;
          LD  K1          ; Atribuicao de variavel
          MM  V1          ;
          JP  E0          ;
_I0        LD  zero      ; End if case/Begin else case
          LD  K2          ; Atribuicao de variavel
          MM  V1          ;
L0         LD  zero      ; Begin while loop
          LD  V0          ; Comparacao X > Y
          -   K2          ;
          MM  T1          ;
```

```

LD T1 ;
JN _L0 ;
JZ _L0 ;
LD V1 ;
* V0 ;
MM T2 ;
LD T2 ; Atribuicao de variavel
MM V1 ;
LD V0 ;
- K3 ;
MM T3 ;
LD T3 ; Atribuicao de variavel
MM V0 ;
JP L0 ;
_L0 LD zero ; End while loop
E0 LD zero ; End else case
LD V1 ; Comando de output
MM output_number ;
SC output ;
HM /00 ;
# P ;

@ /0A00
V0 K =0 ; Declaracao de variavel
K0 K =0 ; Declaracao de constante
T0 K =0 ; Declaracao de temporario
V1 K =0 ; Declaracao de variavel
K1 K =0 ; Declaracao de constante
K2 K =1 ; Declaracao de constante
T1 K =0 ; Declaracao de temporario
T2 K =0 ; Declaracao de temporario
K3 K =1 ; Declaracao de constante
T3 K =0 ; Declaracao de temporário

```

7. Análise Semântica

A análise semântica do compilador desenvolvido consiste nas ações semânticas desencadeadas pelas transições do APE. As ações semânticas são responsáveis por algumas tarefas como impressão de código objeto no arquivo de saída conforme os *tokens* são lidos e o APE é transicionado, além disso, porém nem toda ação semântica tem como resultado a geração de código, por vezes, sua função é apenas salvar o que foi lido em alguma estrutura de dados para executar geração de código posteriormente.

Para a escrita do código, foram criados dois *buffers* de armazenamento, um correspondente a área de código e outro correspondente a área de dados. Os *buffers* foram implementados através da criação de dois arquivos de texto separados. Ao fim da compilação, os dois arquivos são integrados, gerando um único arquivo de saída.

Além disso, para que fosse possível o gerenciamento de escopo, a tabela de símbolos foi modificada. Por fim, foi necessário um registro de ativação, utilizado nas chamadas de funções para que o ambiente de execução seja guardado, evitando conflitos e garantindo o correto funcionamento dos programas.

7.1. Tabela de símbolos com suporte a escopo

O gerenciamento de escopos foi implementado de forma que a cada novo escopo uma nova tabela de identificadores é criada. Além disso, cada tabela de identificadores possui um apontador para a tabela referente ao escopo "pai".

Quando se deseja criar um novo escopo a função abaixo, presente no arquivo `table_of_symbols`, é chamada.

```
void enter_new_scope() {
    List *newTable = empty_list();
    newTable->parent = identifiers_table;
    identifiers_table = newTable;
}
```

Ela cria uma nova lista ligada representando a nova tabela, associa esta nova tabela com a tabela atual e atualiza a variável global `identifiers_table` para que esta aponte para a tabela recém-criada.

De forma análoga, a função `exit_current_scope()` descarta a tabela de identificadores atual e aponta a variável global para a tabela pai.

```
void exit_current_scope() {
    List *current_table = identifiers_table;
    identifiers_table = current_table->parent;
    free(current_table);
}
```

A busca por identificador também foi modificada de forma que ele seja procurado não só na tabela atual, mas também nas tabelas relacionadas, conforme a rotina a seguir.

```
Node * get_identifier_for_data_on_all_tables(char * data, List *
identifiers_table) {
    if(identifiers_table == NULL) return NULL;
    int index = search_list(data, identifiers_table);
    if(index != INDEX_NOT_FOUND) {
        Node * identifier = get_node_at_index(index,
                                            identifiers_table);
        if(identifier->wasDeclared) return identifier;
    }
    return get_identifier_for_data_on_all_tables(data,
                                                identifiers_table->parent);
}
```

Com esta modificação, o compilador desenvolvido permite programas com variáveis de mesmo nome, desde que em escopos distintos.

7.2. Principais ações semânticas

Nesta seção serão descritas algumas das ações semânticas desenvolvidas. As mesmas se encontram no arquivo `semantic_actions.c` e são chamadas através de consultas às matrizes `actions_on_state_transition` (contendo as ações desencadeadas nas transições de estado), `actions_on_machine_transition` (contendo as ações desencadeadas nas chamadas de máquinas) e `actions_on_machine_return` (contendo as ações desencadeadas nos retornos de máquinas). Estas matrizes mapeiam as transições do APE com as ações semânticas correspondentes. O mapeamento, ou inicialização das tabelas, é feito com a chamada da função `init_semantic_actions`.

dummy_semantic_action

Esta ação semântica não gera código nem modifica variáveis. É uma ação executada em todas as transições do APE que não tem ações definidas, ou não devem executar qualquer ação.

Rótulos

get_X_label

As funções do tipo `get_X_label`, retornam um rótulo utilizado para uma determinada função no compilador. Por exemplo, a função `get_constant_label` retorna um rótulo para uma constante e incrementa o contador de constantes utilizado na geração destes rótulos.

Outras funções que apresentam essa mesma finalidade são: `get_temp_label`, `get_temp_label_label`, `get_variable_label`, `get_loop_label`, `get_if_label`, `get_else_label`, `get_func_label`.

Essas funções também são responsáveis por escrever no buffer de dados as declarações dessas variáveis, quando necessário.

Submáquina Programa

`print_main`

Ação disparada na transição da submáquina PROGRAMA, no estado 1 com o token do tipo "main". Imprime no buffer de código a inicialização da MVN, com o comando `JP \000` identificado pelo rótulo main.

`end_program`

Ação disparada nas transições que levam ao estado final da submáquina PROGRAMA. Imprime no buffer de código os comandos `HM /00 ;` e `# P ;`

`declare_variable`

Ação disparada nas transições da submáquina PROGRAMA ao receber um identificador estando nos estados 15, 17, 36 ou 51. Caso a variável já tenha sido declarada no escopo, lança a exceção semântica `ERR_VARIABLE_REDECLARED`. Caso contrário, marca seu identificador na tabela de símbolos como declarada.

`throw_boolean_exception`

Ação disparada ao receber o token "boolean", pois, apesar de previsto na linguagem definida, optou-se por não suportar o tipo de dados boolean no compilador desenvolvido.

Submáquina Comando

`push_control_command`

Esta ação permite rotinas de controle de fluxo aninhadas. Ela é disparada nos estados 0 e 25 da submáquina COMANDO ao receber *tokens* referentes aos comandos `if`, `else` e `while`. Além de solicitar um rótulo, a ação empilha o comando e seu rótulo nas pilhas `command_operator_stack` e `command_operand_stack`, respectivamente. Sua implementação está representada a seguir:

```
void push_control_command(Token *token) {
    char * command = token->lexeme;
    char * label;

    if(strcmp(command, "while") == 0) {
        label = get_loop_label();
        sprintf(buffer, "%s\t\t\tLD zero\t; Begin while loop\n",
label);
        write_to_code(buffer);
    } else if (strcmp(command, "if") == 0) {
        label = get_if_label();
        sprintf(buffer, "%s\t\t\tLD zero\t; Begin if case\n", label);
        write_to_code(buffer);
    } else if (strcmp(command, "else") == 0) {
```

```

        label = get_else_label();
    }

    stack_push(command_operator_stack, command);
    stack_push(command_operand_stack, label);
}

```

resolve_command

Esta ação é chamada no retorno da submáquina COMANDO e nos estados 17 e 23 ao receber o token MTTYPE_LEFT_CURLY_BRACKET. Ela desempilha o comando da pilha `command_operator_stack` e dispara diferentes ações, dependendo do comando desempilhado.

```

void resolve_command(Token *token) {
    char * command = stack_pop(command_operator_stack);

    if(strcmp(command, "=") == 0) resolve_assign();
    else if(strcmp(command, "output") == 0) resolve_output();
    else if(strcmp(command, "input") == 0) resolve_input();
    else if(strcmp(command, "while") == 0) resolve_while();
    else if(strcmp(command, "endwhile") == 0) resolve_end_while();
    else if(strcmp(command, "if") == 0) resolve_if();
    else if(strcmp(command, "endif") == 0) resolve_end_if();
    else if(strcmp(command, "else") == 0) resolve_else();
    else if(strcmp(command, "endelse") == 0) resolve_end_else();
}

```

resolve_while

Esta ação é responsável por criar um novo escopo e empilhar o comando "endwhile" na pilha `command_operator_stack`, além de escrever no buffer de código usando o rótulo presente no topo da pilha `command_operand_stack`.

resolve_end_while

Esta ação desempilha o rótulo do while em questão da pilha `command_operand_stack` e, usando este rótulo, escreve no buffer de código. Além disso, encerra o escopo corrente.

resolve_if

Esta ação é responsável por criar um novo escopo e empilhar o comando "endif" na pilha `command_operator_stack`, além disso, escrever o código em MVN da função condicional no buffer de código usando o rótulo presente no topo da pilha `command_operand_stack`.

resolve_end_if

Esta ação desempilha o rótulo do comando condicional em questão da pilha `command_operand_stack` e, usando este rótulo, escreve no buffer de código o código de término correspondente. Além disso, encerra o escopo corrente.

resolve_else

Esta ação é responsável por criar um novo escopo e empilhar o comando "endelse" na pilha `command_operator_stack`, além disso, escrever o código em MVN da função condicional no buffer de código usando o rótulo presente no topo da pilha `command_operand_stack`.

resolve_end_else

Esta ação desempilha o rótulo do else em questão da pilha `command_operand_stack` e, usando este rótulo, escreve no buffer de código. Além disso, encerra o escopo corrente.

Submáquina Expressão

push_identifier

Esta ação é disparada nas transições do APE a partir dos estados 0 da submáquina expressão ao receber um identificador. É feita uma verificação de declaração prévia do identificador e empilha-se o rótulo do identificador na pilha `operand_stack`.

push_operator

Esta ação é disparada nas transições do APE a partir dos estados 1 e 3 da submáquina expressão, ao receber um operador. Se a precedência do operador no topo da pilha `operator_stack` for maior que a precedência do operador recebido, a expressão é resolvida (através da ação `resolve_expression`) e a ação é repetida para o token recebido. Caso contrário, o operador é empilhado.

Nos casos em que o operador é o "and" ou "or", simplesmente chama-se a ação `resolve_expression`.

resolve_expression

Esta ação, similar à `resolve_command` desempilha o operador da pilha `operator_stack` e dispara diferentes ações, dependendo do comando desempilhado, conforme representado a seguir.

```
void resolve_expression() {
    char * o = stack_pop(operator_stack);
    if(strcmp(o, ">") == 0) resolve_compare_greater_than();
    else if(strcmp(o, "<") == 0) resolve_compare_less_than();
    else if(strcmp(o, "==") == 0) resolve_compare_equal_equal();
    else if(strcmp(o, "and") == 0) resolve_logic_and();
    else if(strcmp(o, "_and") == 0) end_logic_and();
    else if(strcmp(o, "or") == 0) resolve_logic_or();
    else if(strcmp(o, "_or") == 0) end_logic_or();
    else if(strcmp(o, "not") == 0) resolve_logic_not();
    else resolve_arithmetic(o);
}
```

resolve_compare_equal_equal

Esta ação, desempilha os dois operandos da pilha `operand_stack` (empilhados previamente na ação semântica `push_operand`) e, usando variáveis temporárias, escreve/imprime o código referente à comparação no buffer de código.

7.3. Ambiente de execução

Para as rotinas de input e output, além de ações semânticas, foram desenvolvidas subrotinas escritas na linguagem de montador da SVM, as subrotinas foram expostas no Capítulo 6.2.

Para suporte de chamadas de função, foram desenvolvidas rotinas para implementação do registro de ativação, que também foram expostas no Capítulo 6.2.

Todas as rotinas referentes ao ambiente de execução estão presentes no arquivo `execution_environment.asm`, cujo conteúdo é inteiramente copiado para o código objeto gerado pelo compilador. Desta forma, ao utilizar os rótulos (por exemplo, `output`) no código gerado pelas ações semânticas, as rotinas são acessadas na MVN.

8. Testes

Os testes representados a seguir mostram o correto funcionamento das diversas funcionalidades do compilador desenvolvido.

Teste 1: input, output, if e while aninhados

Código fonte	Código objeto gerado pelo compilador
<pre> program main { declare int a; declare int b; declare int c; input a; b = 5; c = 8; if (a == b) { output c; } else { while (a < b) { a = a+1; output a; if (a == b) { output c; } } } } </pre>	<pre> <código das sub-rotinas do ambiente de execução omitido> main JP /0000 ; SC input ; Comando de input MM V0 ; LD K0 ; Atribuicao de variavel MM V1 ; LD K1 ; Atribuicao de variavel MM V2 ; I0 LD zero ; Begin if case LD V0 ; Comparacao X == Y - V1 ; JZ TL0 ; LD zero ; Nao e igual JP TL1 ; LD one ; E igual MM T0 ; LD T0 ; JN _I0 ; JZ _I0 ; LD V2 ; Comando de output MM output_number ; SC output ; JP E0 ; LD zero ; End if case/Begin else case LD zero ; Begin while loop LD V1 ; Comparacao X < Y - V0 ; MM T1 ; LD T1 ; JN _L0 ; JZ _L0 ; LD V0 ; + K2 ; MM T2 ; LD T2 ; Atribuicao de variavel MM V0 ; LD V0 ; Comando de output MM output_number ; SC output ; LD zero ; Begin if case LD V0 ; Comparacao X == Y - V1 ; JZ TL2 ; LD zero ; Nao e igual JP TL3 ; LD one ; E igual MM T3 ; LD T3 ; </pre>

	<pre> JN _I1 ; JZ _I1 ; LD V2 ; Comando de output MM output_number ; SC output ; _I1 LD zero ; End if case JP L0 ; _L0 LD zero ; End while loop E0 LD zero ; End else case HM /00 ; # P ; @ /0A00 V0 K =0 ; Declaracao de variavel V1 K =0 ; Declaracao de variavel K0 K =5 ; Declaracao de constante V2 K =0 ; Declaracao de variavel K1 K =8 ; Declaracao de constante T0 K =0 ; Declaracao de temporario T1 K =0 ; Declaracao de temporario K2 K =1 ; Declaracao de constante T2 K =0 ; Declaracao de temporario T3 K =0 ; Declaracao de temporario </pre>
--	--

Execução na MVN

```

> r
Informe o endereco do IC [0000]:
Exibir valores dos registradores a cada passo do ciclo FDE <s/n>[s]: n
5
8
> r
Informe o endereco do IC [0000]:
Exibir valores dos registradores a cada passo do ciclo FDE <s/n>[s]: n
-3
- 2 - 1 0 1 2 3 4 5 8
>

```

Teste 2: operações aritméticas

Código fonte	Código objeto gerado pelo compilador
<pre> program main { declare int a; declare int b; declare int c; input a; input b; c = a + b; output c; c = a - b; output c; c = a * b; output c; c = a / b; output c; } </pre>	<pre> <código das sub-rotinas do ambiente de execução omitido> main JP /0000 ; SC input ; Comando de input MM V0 ; SC input ; Comando de input MM V1 ; LD V0 ; + V1 ; MM T0 ; LD T0 ; Atribuicao de variavel MM V2 ; LD V2 ; Comando de output MM output_number; SC output ; LD V0 ; - V1 ; MM T1 ; LD T1 ; Atribuicao de variavel MM V2 ; LD V2 ; Comando de output MM output_number; SC output ; LD V0 ; * V1 ; MM T2 ; </pre>

	<pre> LD T2 ; Atribuicao de variavel MM V2 ; LD V2 ; Comando de output MM output_number; SC output ; LD V0 ; / V1 ; MM T3 ; LD T3 ; Atribuicao de variavel MM V2 ; LD V2 ; Comando de output MM output_number; SC output ; HM /00 ; # P ; @ /0A00 V0 K =0 ; Declaracao de variavel V1 K =0 ; Declaracao de variavel V2 K =0 ; Declaracao de variavel T0 K =0 ; Declaracao de temporario T1 K =0 ; Declaracao de temporario T2 K =0 ; Declaracao de temporario T3 K =0 ; Declaracao de temporario </pre>
Execução na MVN	
	<pre> > r Informe o endereco do IC [0000]: Exibir valores dos registradores a cada passo do ciclo FDE (s/n)[sl: n 10 3 1 3 7 3 0 3 > </pre>

Teste 3: operações lógicas

Código fonte	Código objeto gerado pelo compilador
<pre> program main { declare int a; a = 1 and 1; output a; a = 1 and 0; output a; a = 0 and 0; output a; a = 1 or 0; output a; a = 0 or 0; output a; } </pre>	<pre> <código das sub-rotinas do ambiente de execução omitido> main JP /0000 ; LD K0 ; Comeco do and logico JZ TL0 ; Returns NO JN TL0 ; Returns NO LD K0 ; JZ TL0 ; Returns NO JN TL0 ; Returns NO LD one ; JP TL1 ; Returns YES TL0 LD zero; TL1 MM T0 ; Fim do and logico LD T0 ; Atribuicao de variavel MM V0 ; LD V0 ; Comando de output MM output_number ; SC output ; LD K0 ; Comeco do and logico JZ TL2 ; Returns NO JN TL2 ; Returns NO LD K1 ; JZ TL2 ; Returns NO JN TL2 ; Returns NO LD one ; JP TL3 ; Returns YES TL2 LD zero; TL3 MM T1 ; Fim do and logico LD T1 ; Atribuicao de variavel MM V0 ; </pre>

		LD V0 ; Comando de output
		MM output_number ;
		SC output ;
		LD K1 ; Comeco do and logico
		JZ TL4 ; Returns NO
		JN TL4 ; Returns NO
		LD K1 ;
		JZ TL4 ; Returns NO
		JN TL4 ; Returns NO
		LD one ;
		JP TL5 ; Returns YES
TL4		LD zero;
TL5		MM T2 ; Fim do and logico
		LD T2 ; Atribuicao de variavel
		MM V0 ;
		LD V0 ; Comando de output
		MM output_number ;
		SC output ;
		LD K0 ; Comeco do or logico
		JZ TL6 ;
		JN TL6 ;
		JP TL7 ; Returns YES
TL6		LD K1 ;
		JZ TL8 ;
		JN TL8 ;
		JP TL7 ; Returns YES
TL8		LD zero ;
		JP TL9 ; Returns NO
TL7		LD one ;
TL9		MM T3 ; Fim do or logico
		LD T3 ; Atribuicao de variavel
		MM V0 ;
		LD V0 ; Comando de output
		MM output_number ;
		SC output ;
		LD K1 ; Comeco do or logico
		JZ TL10 ;
		JN TL10 ;
		JP TL11 ; Returns YES
TL10		LD K1 ;
		JZ TL12 ;
		JN TL12 ;
		JP TL11 ; Returns YES
TL12		LD zero ;
		JP TL13 ; Returns NO
TL11		LD one ;
TL13		MM T4 ; Fim do or logico
		LD T4 ; Atribuicao de variavel
		MM V0 ;
		LD V0 ; Comando de output
		MM output_number ;
		SC output ;
		HM /00 ;
		# P ;
		0A00
V0	K =0	; Declaracao de variavel
K0	K =1	; Declaracao de constante
T0	K =0	; Declaracao de temporario
K1	K =0	; Declaracao de constante
T1	K =0	; Declaracao de temporario
T2	K =0	; Declaracao de temporario
T3	K =0	; Declaracao de temporario
T4	K =0	; Declaracao de temporário

```
> r
Informe o endereço do IC [0000]:
Exibir valores dos registradores a cada passo do ciclo FDE <s/n>[s]: n
1 0 0 1 0
```

9. Conclusão

Os objetivos foram alcançados com sucesso, conforme demonstram os testes do capítulo anterior. O compilador cumpre os seguintes requisitos:

- Permite rotinas do tipo:
 - If-then
 - If-then-else
 - While
- Permite atribuição de valor à variáveis previamente declaradas
- Fornece rotinas para leitura (entrada) e impressão (saída)
- Realiza as operações aritméticas de soma, subtração, divisão e multiplicação
- Realiza operações lógicas and, or e not

O compilador desenvolvido permite construção e chamada de sub-rotinas, com passagem de parâmetros, com criação de registro de ativação e métodos para carregar e armazenar variáveis no registro de ativação. Porém, o funcionamento não é completo, dada a forma em que as ações semânticas foram implementadas.

Os únicos requisitos solicitados que não foram implementados foram estruturas do tipo vetor e *struct*. Porém, com o conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento percebe-se que a implementação é simples e só não foi realizada pela limitação de tempo. Entretanto, o desenvolvimento deste compilador permitiu consolidar os conceitos vistos em sala de aula.

Uma observação a ser feita é sobre a MVN disponibilizada que apresenta comportamentos distintos quando executada muda-se o parâmetro "passo a passo". Aparentemente, a partir dos testes realizados, o input é interpretado de maneiras diferentes, devido ao buffer de leitura da MVN. Esta característica foi extremamente negativa ao desenvolvimento, custando um grande esforço para identificá-la e prejudicando os testes realizados.