

Análise Léxica

Noemi Pereira Scherer¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Campo Mourão – PR – Brasil

{noemischerer13}@gmail.com

Abstract. *This meta-article describes the procedures and results of developing a lexical and syntactic parser. The first one is responsible for verifying the input of character lines from a source code written T++, producing a sequence of lexical symbols. The second parses the source code in T++ and returns an abstract tree. For the creation of these analyzers, a Python language library called PLY and YACC was used.*

Resumo. *Este meta-artigo descreve os procedimentos e resultados do desenvolvimento de um analisador léxico e sintática. O primeiro é responsável por verificar as entradas de linhas de caracteres de um código fonte escrito T++, produzindo uma sequência de símbolos léxicos. O segundo análise o código fonte em T++ e retorna uma árvore abstrata. Para a criação desses analisares, foi utilizado uma biblioteca da linguagem Python denominado PLY e YACC.*

1. Introdução

Um compilador é responsável pela tradução de um programa descrito em uma linguagem de alto nível para um programa equivalente em código de máquina. De forma geral, um compilador não produz diretamente um código de máquina e sim um programa em linguagem simbólica (*assembly*) semanticamente equivalente ao código em linguagem de alto nível. Por meio de montadores, esse programa em linguagem simbólica é traduzida em uma linguagem de máquina [Ivan L. M. Ricarte 2014].

Um compilador executa dois tipos de atividade, para desempenhar suas tarefas. A primeira é a análise do código fonte, no qual a estrutura e significado do programa de alto nível são reconhecidos. A segunda é a síntese do programa equivalente em linguagem simbólica [Ivan L. M. Ricarte 2014].

Para exemplificar essas duas atividades, considere a Figura 1 na qual descreve um código na linguagem C, que para um compilador é uma sequência de caracteres em um arquivo texto. O primeiro passo é reconhecer que agrupamentos de caracteres têm significado para o programa, por exemplo, saber que `int` é uma palavra-chave da linguagem e que `a` e `b` são variáveis neste programa. Posteriormente, o compilador deve reconhecer que a sequência `int a` corresponde a uma declaração de uma variável inteira cujo identificador recebeu o nome `a`.

Figura 1. Exemplo de código na linguagem C

```
int a, b, valor;  
a = 10;  
b = 20;  
valor = a*(b+20)
```

A primeira análise é a léxica, que é um processo que analisa a entrada de linhas de caracteres (código fonte de um programa) e produz uma sequência de símbolos léxicos denominados *tokens*, sendo facilmente manipulado por um *parser* (leitor de saída) [Wikibooks 2018].

O analisador léxico lê cada caractere do programa fonte e, traduz em uma saída os *tokens*. Dessa forma, é possível reconhecer as palavras reservadas, constantes, identificadores e outras palavras que pertencem a linguagem de programação analisada. O analisador também pode executar outras tarefas como o tratamento de espaços, eliminação de comentários e contagem do número de linhas que o programa possui [Wikibooks 2018].

O analisador léxico funciona de duas maneiras o primeiro e segundo estado da análise. O primeiro é responsável por ler a entrada de caracteres mudando o estado em que esses se encontram. Quando o analisador encontra um caractere o qual ele não considera como correto, ele volta à última análise que foi aceita. No segundo são repassados os caracteres encontrados para produzir um valor. O tipo do léxico é combinado com seu valor constituindo um símbolo, que pode ser denominado parser.

A implementação de um analisador léxico requer uma descrição do autômato que reconhece as sentenças da gramática ou expressão regular de cada *token* que possui os seguintes procedimentos [Wikibooks 2018]:

- Estado inicial, que recebe como argumento a referência para o autômato e retorna o seu estado inicial;
- Estado final, que recebe como argumentos a referência para o autômato e a referência para o estado corrente. O procedimento retorna verdadeiro se o estado especificado é elemento do conjunto de estados finais do autômato, ou falso caso contrário; e
- Próximo estado, que recebe como argumento a referência para o autômato, para o estado corrente e para o símbolo sendo analisado. O procedimento consulta a tabela de transições e retorna o próximo estado do autômato, ou o valor nulo se não houver transição possível.

A segunda análise é a sintática (*parser*) que determina a estrutura gramatical dos *tokens* segundo uma determinada gramática formal. Ou seja, ela é um processo que determina se uma cadeia de símbolos léxicos pode ser gerada por uma gramática [Wikibooks 2013].

Nesta análise o compilador deve reconhecer que a sequência de *tokens* corresponde a comandos relacionados à linguagem [Ivan L. M. Ricarte 2014], como o código da Figura 1, o primeiro comando é a declaração de variáveis e os três outros são comandos de atribuições.

A análise sintática transforma um texto na entrada em uma estrutura de dados, como uma árvore. Por meio dessa análise obtêm-se um grupo de *tokens*, para que o analisador use um conjunto de regras para construir uma árvore sintática da estrutura [Wikibooks 2018].

Essa análise aceita linguagens livre de contexto, e existem duas formas de determinar se a entrada de dados pode ser derivada de um símbolo inicial com as regras de uma gramática formal [Wikibooks 2013]:

Descendente (*top-down*): um analisador pode iniciar com o símbolo inicial e transformá-lo na entrada de dados. O analisador inicia dos maiores elementos e os quebra em partes menores, como exemplo, analisador sintático LL.

Ascendente (*bottom-up*): um analisador pode iniciar com um entrada de dados e tentar reescrevê-la até o símbolo inicial. O analisador tenta localizar os elementos mais básicos, e então os maiores que contêm os elementos mais básicos, e assim por diante, como por exemplo, analisador sintático LR.

1.1. Objetivo

O objetivo desse trabalho é desenvolver um programa capaz de realizar a análise léxica e sintática de códigos fontes escrito na Linguagem T++, retornando uma árvore sintática abstrata da linguagem.

2. A Linguagem T++

A linguagem T++ foi desenvolvida especialmente para ser utilizada na disciplina de compiladores. Ela é uma linguagem simples, contendo algumas palavras reservadas, símbolos e arranjos uni e bidimensionais. A Tabela ?? mostra todas as palavras reservadas e símbolos que a linguagem T++ permite.

Tabela 1: *Tokens* permitidos pela Linguagem T++

Lista de tokens	
Palavras Reservadas	Símbolos
se	+ soma
então	- subtração
senão	* multiplicação
fim	/ divisão
repita	= igualdade
flutuante	, vírgula
retorna	:= atribuição
até	< menor
leia	> maior
escreve	<= menor-igual
inteiro	>= maior-igual
notação científica	<>= diferença
	() abre e fecha parênteses
	: dois pontos
	[] abre e fecha colchetes
	{ } comentário

Continuação lista de tokens	
Palavras Reservadas	Símbolos
	ou-lógico && e-lógico ! negação
Fim lista de tokens	

A construção do código dessa linguagem é inteiramente em Português. Os números podem ser inteiros, flutuantes (notação científica ou não), e as declarações de variáveis devem obrigatoriamente começar com letras precedente de várias letras e/ou números.

Apesar de T++ ser uma linguagem simples, ela permite a execução de algoritmos complexos, como de ordenação. A Figura 2 demonstra o algoritmo de busca soma vetor na linguagem t++.

Figura 2. Exemplo do código BubbleSort na linguagem T++

```

inteiro: T
T:= 4
inteiro: V1[T]
inteiro somavet(inteiro: vet[], inteiro: tam)
    inteiro: result
    result := 0
    inteiro: i
    i := 0
    repita
        result := result + vet[i]
        i := i + 1
    até i = tam - 1
    retorna(result)
fim
inteiro principal ()
    inteiro: x
    x := somavet(V1,T)
    retorna(0)
fim

```

3. Análise léxica

3.1. Expressões Regulares e Autômatos

Uma expressão regular é responsável por identificar cadeia de caracteres de uma determinada linguagem, como palavras ou padrões. Elas são escritas numa linguagem formal que pode ser interpretada por um processador de expressão regular [AHO 2008].

Essa expressão pode ser associada com a aritmética, entretanto ao invés dela denotar um número (como 2+2), a expressão regular denota uma linguagem regular. Por

exemplo: $a0^+$, que resultará em $\{ "a0", "a00", "a000", \dots \}$ [AHO 2008].

As expressões regulares são utilizadas para a especificação léxica de uma determinada linguagem. Para sua demonstração são utilizados autômatos finitos determinísticos.

Um autômato finito é um modelo computacional composto de uma fita de entrada dividida em células, nas quais contém os símbolos das cadeia. A principal parte do modelo é um controle finito, o qual indica em qual estado o autômato se encontra [USP 2012].

O modelo do autômato apresenta um estado inicial e um conjunto de estados finais. O estado inicial refere-se ao início de funcionamento do modelo, dependendo do símbolo presente na fita o próximo estado será escolhido, enquanto que os estados finais indicam o término do processo com sucesso, ou seja, se a cadeia presente na fita de entrada tiver sido completamente lida e o modelo não se encontrar em um estado final, considera-se a cadeia não aceita, ou caso contrário, como aceita [USP 2012].

Para cada *token* permitido na Linguagem T++ é criada uma expressão regular, o qual tem como objetivo analisar uma cadeia de caracteres no código. As expressões regulares utilizadas nesse trabalho estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Expressões regulares de cada token

Tokens	Expressão regulares
Soma	$\backslash +$
Subtração	$-$
Multiplicação	$\backslash *$
Divisão	$\backslash /$
Igual	$\backslash =$
Vírgula	$,$
Atribuição	$\backslash := +$
Menor	$\backslash i$
Maior	$\backslash i$
Menor Igual	$\backslash i =$
Maior igual	$\backslash i =$
Abre parênteses	$\backslash ($
Fecha parênteses	$\backslash)$
Abre colchetes	$\backslash [$
Fecha Colchetes	$\backslash]$
Dois pontos	$:$
E lógico	$\&\&$
OU lógico	$ $
Negação	$!$
ID	$[a-zA-Z\grave{a}\acute{u}\grave{A}\acute{U}][_0-9a-zA-Z\grave{a}\acute{u}\grave{A}\acute{U}]^*$
Notação Científica	$[0-9](\backslash .[0-9]^+)(e E)(\backslash + \backslash -)^*[0-9](\backslash .[0-9])^*$
Flutuante	$[0-9](\backslash .[0-9]^+)(e(\backslash + \backslash -)?(d+))?$
Inteiro	$[0-9]^+$
Comentário	$\{ [\backslash \{ \backslash \}] \}$
Nova Linha	$\backslash n^+$

A ordem de execução de cada expressão regular é representada em forma de autômatos. Os autômatos mais simples são dos operadores (soma, subtração, divisão, multiplicação, abre e fecha parênteses e colchetes, atribuição, igualdade, vírgula, dois pontos, ou e e-lógico e negação) que são representados na Figura 3.

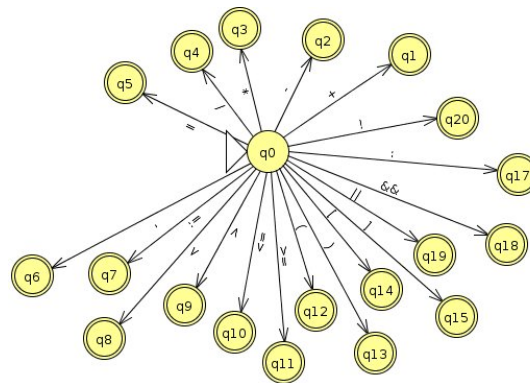


Figura 3. Autômatos dos operadores.

Os autômatos da expressão regular do ID (identificador) estão representados de duas formas, uma resumida (Figura 4), e outro detalhada (Figura 5). O seu objetivo é identificar qualquer palavra ou letra presente no código, podendo ser letras maiúsculas, minúsculas, com ou sem assento.

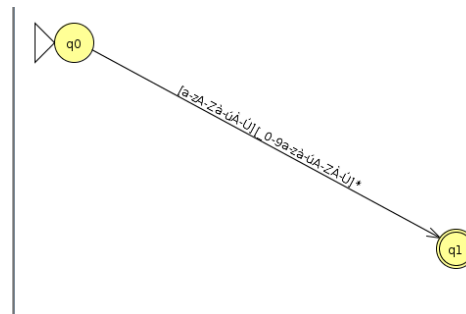


Figura 4. Autômato resumido da expressão regular do identificador (ID).

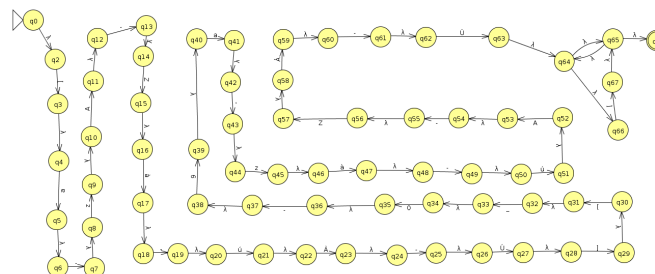


Figura 5. Autômato completo da expressão regular do identificador (ID).

O autômato da expressão regular dos números inteiros recebe qualquer número de zero a nove uma ou várias vezes até chegar em seu estado final. Ele está representado na Figura 6.

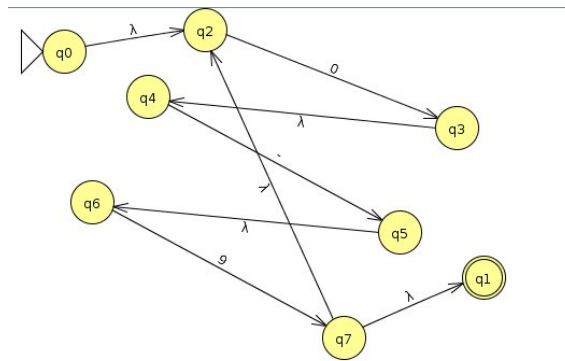


Figura 6. Autômato dos números inteiros.

O autômato da expressão regular dos números flutuantes está representado na Figura 7. Seu objetivo é identificar qualquer número que esteja separado por ponto no código, como 22.5 ou 0.22.

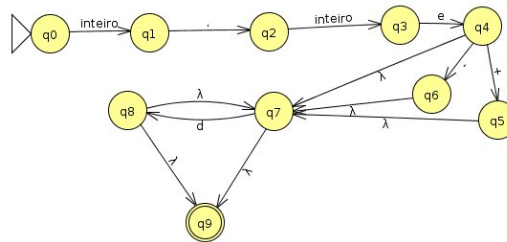


Figura 7. Autômato dos números flutuantes.

O autômato da expressão regular dos números flutuantes em notação científica está representado na Figura 8. Seu objetivo é identificar valor que possuem expoente no código, como 10E20 ou 10e-20.

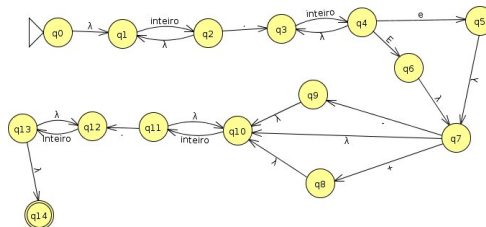


Figura 8. Autômato dos números flutuantes em notação científica.

Os autômatos da expressão regular dos comentários estão representados de duas formas, uma resumida (Figura 9) e outra detalhada (Figura 10). Os comentários na linguagem T++ são representadas por qualquer palavra que esteja entre '}', como exemplo: {Esse é um comentário }.

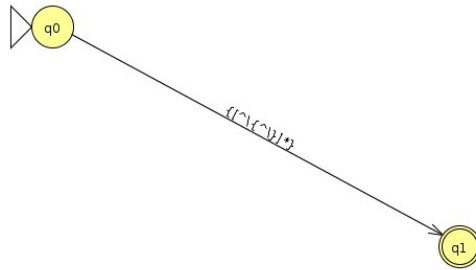


Figura 9. Autômato resumido do comentário.

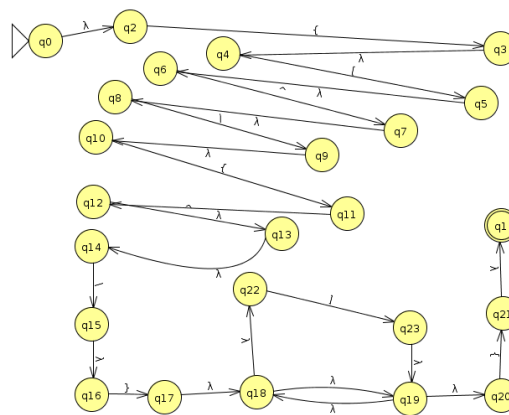


Figura 10. Autômato completo do comentário.

Por fim, o autômato da expressão regular da nova linha está representado representado na Figura 11. Seu objetivo é encontrar qualquer linha no código denotado por $\backslash n$.

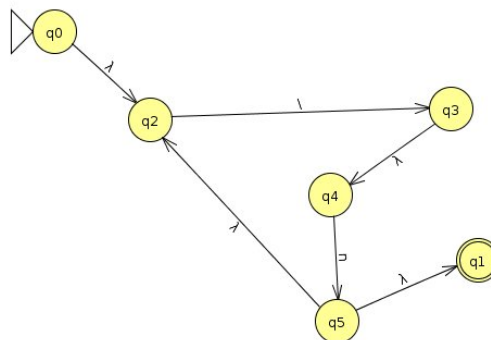


Figura 11. Autômato da nova linha.

4. Análise sintática

4.1. Descrição da gramática BNF

A *Backus-Naur Form* (BNF) é uma forma matemática de descrever uma linguagem, de modo que defina a gramática da linguagem sem ambiguidade ou divergência

[Lucas Thomaz 2009].

Primeiramente é definido um símbolo inicial para a gramática (programa) e depois são criadas regras (produções) para substituição desse símbolo por outro [Lucas Thomaz 2009].

A produção de uma regra segue a lógica de que o símbolo da esquerda do ':=’ pode ser substituído por um símbolo a direita. As alternativas são separadas por — (ou).

As produções criadas e utilizadas para o desenvolvimento da análise sintática estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Produções BNF.

Descrição BNF	
programa :=	lista_declaracoes
lista_declaracoes :=	lista_declaracoes declaracao declaracao error
declaracao:=	declaracao_variaveis inicializacao_variaveis declaracao_funcao
declaracao_variaveis :=	tipo DOIS_PONTOS lista_variaveis
declaracao_variaveis :=	tipo DOIS_PONTOS error
inicializacao_variaveis :=	atribuicao
lista_variaveis :=	lista_variaveis VIRGULA var var
var :=	ID ID indice
indice :=	indice ABRE_COL expressao FECHA_COL ABRE_COL expressao FECHA_COL
indice :=	indice ABRE_COL error FECHA_COL ABRE_COL error FECHA_COL error FECHA_COL ABRE_COL error indice error FECHA_COL indice ABRE_COL error
tipo :=	INTEIRO FLUTUANTE
declaracao_funcao :=	tipo cabecalho cabecalho
cabecalho :=	ID ABRE_PAR lista_parametros FECHA_PAR corpo FIM
cabecalho :=	ID ABRE_PAR lista_parametros FECHA_PAR corpo error
lista_parametros :=	lista_parametros VIRGULA parametro parametro vazio
parametro :=	tipo DOIS_PONTOS ID parametro ABRE_COL FECHA_COL
corpo :=	corpo acao

Continuação descrição BNF	
	vazio
acao :=	expressao declaracao_variaveis se repita leia escreva retorna
se :=	SE expressao ENTAO corpo FIM SE expressao ENTAO corpo SENAO corpo FIM
se_error :=	SE expressao error corpo FIM error SENAO corpo FIM
repita :=	REPITA corpo ATE expressao
repita_error :=	REPITA corpo error
atribuicao :=	var ATRIBUT expressao
leia :=	LEIA ABRE_PAR var FECHA_PAR
escreva :=	ESCREVA ABRE_PAR expressao FECHA_PAR
retorna :=	RETORNA ABRE_PAR expressao FECHA_PAR
expressao :=	expressao_logica atribuicao
expressao_logica :=	expressao_simples expressao_logica operador_logico expressao_simples
expressao_simples :=	expressao_aditiva expressao_simples operador_relacional expressao_aditiva
expressao_aditiva :=	expressao_multiplicativa expressao_aditiva operador_soma expressao_multiplicativa
expressao_multiplicativa :=	expressao_unaria expressao_multiplicativa operador_multiplicacao expressao_unaria
expressao_unaria :=	fator operador_soma fator operador_negacao fator
operador_relacional :=	MENOR MAIOR IGUAL DIFERENCA MENOR_IGUAL MAIOR_IGUAL
operador_soma :=	SOMA SUB
operador_negacao :=	NEGACAO
operador_logico :=	E_LOGICO

Continuação descrição BNF	
	OU_LOGICO
operador_multiplicacao :=	MULT DIVISAO
fator :=	ABRE_COL expressao FECHA_COL var chamada_funcao numero
numero :=	INTEIRO FLUTUANTE NOTACAO_CIENTIFICA
chamada_funcao :=	ID ABRE_PAR lista_argumentos FECHA_PAR
lista_argumentos :=	lista_argumentos VIRGULA expressao expressao vazio

5. PLY - Python Lex Yacc

O PLY é uma ferramenta da linguagem Python para construção de compiladores populares lex e yacc. O principal objetivo do PLY é permanecer fiel ao modo como as ferramentas lex/yacc tradicionais funcionam. Isso inclui fornecer validação extensiva de entradas, relatórios de erros e diagnósticos [David M. Beazley 2011].

Como o PLY foi desenvolvido principalmente como uma ferramenta de instrução, é possível notar a exigência em sua especificação de regras de *token* e gramática. Em parte, isso acontece para detectar erros comuns de programação feitos por usuários iniciantes.

O PLY consiste em dois módulos separados; lex.py e yacc.py, ambos encontrados em um pacote do Python chamado ply. O módulo lex.py é usado para dividir o texto de entrada em uma coleção de *tokens* especificados por uma coleção de regras de expressão regular. O yacc.py é usado para reconhecer a sintaxe da linguagem que foi especificada na forma de uma gramática livre de contexto [David M. Beazley 2011].

As duas ferramentas são destinadas a trabalhar juntas. O lex.py fornece uma interface externa na forma de uma função `token()` que retorna o próximo *token* válido no fluxo de entrada. Já a yacc.py chama isso repetidamente para recuperar *tokens* e invocar regras gramaticais. A saída de yacc.py é geralmente uma *Abstract Syntax Tree* (AST) [David M. Beazley 2011].

5.1. PLY para análise léxica

Para o desenvolvimento da análise léxica, foi utilizado apenas o módulo lex.py. Para isso, o primeiro passo foi instalar o ply no ambiente linux utilizando o seguinte comando:

```
pipe3 install ply
```

É importante ressaltar que a versão do python deve ser acima de 3, para aceitar caracteres com acento, pois na linguagem T++ existem palavras reservadas que obrigatoriamente possuem acentos, como então e senão.

Para utilizar a ferramenta no código fonte deve-se importar o ply por meio do seguinte comando:

```
import ply.lex as lex
```

No código fonte da análise léxica é necessário descrever quais são as palavras reservadas e os *tokens* da linguagem, como demonstra na Figura 12.

```
4 # Palavras reservadas
5 reservadas = {
6     'se': 'SE',
7     'então': 'ENTÃO',
8     'senão': 'SENAO',
9     'fim': 'FIM',
10    'repita': 'REPITA',
11    'vazio': 'VAZIO',
12    'até': 'ATE',
13    'leia': 'LEIA',
14    'escreva': 'ESCREVA',
15    'retorna': 'RETORNA',
16    'principal': 'PRINCIPAL',
17    'inteiro': 'INTEIRO',
18    'flutuante': 'FLUTUANTE'
19 }
20
21 # Lista de tokens
22 tokens = ['SOMA', 'SUB', 'MULT', 'DIVISAO', 'IGUAL', 'VIRGULA',
23          'ATRIBUICAO', 'MENOR', 'MAIOR', 'MENOR IGUAL', 'MAIOR IGUAL',
24          'ABRE PAR', 'FECHA PAR', 'DOIS PONTOS', 'ABRE COL', 'FECHA COL',
25          'E LOGICO', 'OU LOGICO', 'NEGACAO', 'ID', 'NOVA LINHA', 'COMENTARIO',
26          'NOTACAO_CIENTIFICA'] + \
27     list(reservadas.values())
```

Figura 12. Palavras reservadas e *tokens* no código fonte da análise léxica.

Para o reconhecimento das palavras reservadas e *tokens*, são definidas as expressões regulares de cada uma no código fonte por meio de regras e funções (Figura 13). As expressões regulares já foram definidas na Tabela 2.

```
25 # Regras de expressões regulares
26 t_SOMA = r'\+'
27 t_SUB = r'\-'
28 t_MULT = r'\*'
29 t_DIVISAO = r'\/'
30 t_IGUAL = r'\='
31 t_VIRGULA = r'\,'
32 t_ATRIBUICAO = r'\:='
33 t_MENOR = r'\<'
34 t_MAIOR = r'\>'
35 t_MENOR_IGUAL = r'\<='
36 t_MAIOR_IGUAL = r'\>='
37 t_ABRE_PAR = r'\('
38 t_FECHA_PAR = r'\)'
39 t_ABRE_COL = r'\['
40 t_FECHA_COL = r'\]'
41 t_DOIS_PONTOS = r'\:'
42 t_E_LOGICO = r'&&'
43 t_OU_LOGICO = r'\|\|'
44 t_NEGACAO = r'!'
45
46
47 def t_ID(t):
48     r'[a-zA-Zâ-úÁ-Ú][ 0-9a-zA-Zâ-úÁ-Ú]*'
49     t.type = reservadas.get(t.value, 'ID')
50     return t
51
52 def t_NOTACAO_CIENTIFICA(t):
53     r'[0-9]+(\.[0-9]+)*(e|E)(\+|\-)?[0-9]+(\.[0-9]+)*'
54     t.type = "NOTACAO_CIENTIFICA"
55     return t
```

Figura 13. Expressões regulares das palavras reservadas e *tokens* no código fonte da análise léxica.

5.2. PLY para análise sintática

Utiliza-se o `yacc.py` para analisar a sintaxe da linguagem. Ele utiliza uma técnica conhecida como analisador LR ou *shift-reduce parsing LR*. Essa análise LR é uma técnica *bottom up* que tenta reconhecer o lado direito de várias regras gramaticais.

Sempre que um lado direito válido é encontrado na entrada, os símbolos de gramática são substituídos pelo símbolo de gramática no lado esquerdo [David M. Beazley 2011].

A implementação do analisador LR é responsável por deslocar símbolos da gramática para uma pilha, analisando a pilha e o próximo *token* de entrada para padrões que correspondam a uma das regras gramaticais [David M. Beazley 2011]. Como exemplo, considere a expressão $3 + 5 * (10 - 20)$ e a gramática definida na Figura 14, a saída utilizando o analisador é demonstrada na Figura 15.

```

expression : expression + term
           | expression - term
           | term

term       : term * factor
           | term / factor
           | factor

factor     : NUMBER
           | ( expression )

```

Figura 14. Exemplo de regras gramaticais.

Step	Symbol Stack	Input Tokens	Action
1		3 + 5 * (10 - 20)\$	Shift 3
2	3	+ 5 * (10 - 20)\$	Reduce factor : NUMBER
3	factor	+ 5 * (10 - 20)\$	Reduce term : factor
4	term	+ 5 * (10 - 20)\$	Reduce expr : term
5	expr	+ 5 * (10 - 20)\$	Shift +
6	expr +	5 * (10 - 20)\$	Shift 5
7	expr + 5	* (10 - 20)\$	Reduce factor : NUMBER
8	expr + factor	* (10 - 20)\$	Reduce term : factor
9	expr + term	* (10 - 20)\$	Shift *
10	expr + term *	(10 - 20)\$	Shift (
11	expr + term * (10 - 20)\$	Shift 10
12	expr + term * (10	- 20)\$	Reduce factor : NUMBER
13	expr + term * (factor	- 20)\$	Reduce term : factor
14	expr + term * (term	- 20)\$	Reduce expr : term
15	expr + term * (expr	- 20)\$	Shift -
16	expr + term * (expr -	20)\$	Shift 20
17	expr + term * (expr - 20)\$	Reduce factor : NUMBER
18	expr + term * (expr - factor)\$	Reduce term : factor
19	expr + term * (expr - term)\$	Reduce expr : expr - term
20	expr + term * (expr)\$	Shift)
21	expr + term * (expr)	\$	Reduce factor : (expr)
22	expr + term * factor	\$	Reduce term : term * factor
23	expr + term	\$	Reduce expr : expr + term
24	expr	\$	Reduce expr
25		\$	Success!

Figura 15. Exemplo do analisador LR.

De acordo com a Figura 15, uma máquina de estado subjacente e o *token* de entrada atual determinam o passo seguinte. Se o próximo *token* estiver descrito em uma regra gramatical válida, ele é transferido para a pilha. Se a parte superior da pilha conti-

ver um lado direito válido de uma regra gramatical, ela é "reduzida" e os símbolos substituídos pelo símbolo à esquerda. Se o *token* de entrada não puder ser deslocado e o topo da pilha não corresponder a nenhuma regra gramatical, ocorre um erro de sintaxe. Uma análise é considerada bem-sucedida quando o analisador atinge um estado em que a pilha de símbolos esteja vazia e não exista mais *tokens* de entrada.

5.2.1. A implementação utilizando YACC

Para o desenvolvimento da análise sintática, foi utilizado o módulo `ply.yacc` e os *tokens* obtidos da análise léxica. Para isso, foi necessário realizar duas importações no código:

```
import ply.yacc as yacc
from lexer import Lexica
```

Cada regra gramatical é definida por uma função Python, no qual cada uma contém a especificação gramatical livre de contexto apropriada. As instruções que compõem o corpo da função implementam as ações responsáveis por adicionar valores na árvore abstrata, como mostra parte do código na Figura 16.

```
def p_programa(self, p):
    """
    programa : lista_declaracoes
    """
    p[0] = Tree('programa', [p[1]])

def p_lista_declaracoes(self, p):
    """
    lista_declaracoes : lista_declaracoes declaracao
                      | declaracao
                      | error
    """
    if (len(p) == 3):
        p[0] = Tree('lista_declaracoes', [p[1], p[2]])
    elif (p.slice[1] == 'declaracao'):
        p[0] = Tree('lista_declaracoes', [p[1]])
    elif (p.slice[1] == 'error'):
        print( "Erro: declaração incompleta! \n")

def p_declaracao(self, p):
    """
    declaracao : declaracao_variaveis
              | inicializacao_variaveis
              | declaracao_funcao
    """
    p[0] = Tree('declaracao', [p[1]])
```

Figura 16. Regras gramaticais representadas por meio de funções na linguagem Python.

Cada função aceita um único argumento *p* que é uma sequência contendo os valores de cada símbolo gramatical na regra correspondente. Os valores de *p[i]* são mapeados para símbolos de gramática, como o exemplo ***p[0] = Tree('declaracao'), [p[1]]***, no qual é adicionada na árvore o valor *p[1]*, que pode ser: *declaracao_variaveis*, *inicializacao_variaveis* ou *declaracao_funcao*.

A primeira regra definida na especificação *yacc* determina o símbolo de gramática inicial. Sempre que a regra inicial for reduzida pelo analisador e não houver mais entrada disponível, a análise será interrompida uma árvore abstrata contendo a gramática e valores será retornada.

A estrutura da árvore abstrata é criada em uma classe denominada *Tree* (Figura 17). Os símbolos encontrados pelo analisador sintático são adicionados nessa árvore, que é imprime todos seus nós ao final da análise por meio de uma função chamada *prinTree* (Figura 18).

```
class Tree:
    def __init__(self, type_node, child=[], value=''):
        self.type = type_node
        self.child = child
        self.value = value

    def __str__(self):
        return self.type
```

Figura 17. Estrutura da classe *Tree* em Python.

```
def prinTree(node, level=" "):
    if node != None and node.child != None:
        print("%s %s %s" % (level, node.type, node.value))
        for son in node.child:
            if (node.child != None):
                prinTree(son, level + " ")
```

Figura 18. Função responsável por imprimir a árvore abstrata em python.

Para capturar os erros de sintaxe encontrados, existe um denominada *p_error* que retorna a linha e a coluna do código onde ocorreu o erro, como demonstra a Figura 19.

```
def p_error(self, p):
    print(p)
    if p:
        print("Erro sintático: '%s', linha %d" % (p.value, p.lineno))
        p.lexer.skip(1)
        #exit(1)

    else:
        yacc.restart()
        print('Erro sintático: definições incompletas!')
        p.lexer.skip(1)
        #exit(1)
```

Figura 19. Função *error* em Python.

Para construir o analisador, é necessário chamar a função *yacc.yacc()*, no

qual examina o módulo e tenta construir todas as tabelas de análise de LR para a gramática especificada.

6. Resultados análise léxica

Com o código fonte da análise léxica pronto, é possível executá-lo de forma que receba um arquivo contendo o código na linguagem T++, leia cada *token* do mesmo, e retorne um arquivo de saída identificando cada *token* encontrado, bem como sua linha e coluna.

Para executar o código pelo terminal utiliza-se o seguinte comando:

```
python3 lexer.py nomeDoArquivo.tpp
```

Considere a Figura 20 que demonstra um código feito em T++ responsável por calcular o fatorial de um número.

Figura 20. Fatorial em T++.

```
inteiro: n
inteiro fatorial(inteiro: n)
    inteiro: fat
    se n > 0 então {não calcula se n > 0}
        fat := 1
        repita
            fat := fat * n
            n := n - 1
        até n = 0
        retorna(fat) {retorna o valor do fatorial de n}
    senão
        retorna(0)
    fim
fim
inteiro principal()
    leia(n)
    escreva(fatorial(n))
    retorna(0)
fim
```

Ao executar a análise léxica o código fatorial (Figura 20), tem-se a seguinte saída:

```
LexToken(INTEIRO, 'inteiro', 1, 0)
LexToken(DOIS_PONTOS, ':', 1, 7)
LexToken(ID, 'n', 1, 9)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n\n', 1, 10)
LexToken(INTEIRO, 'inteiro', 3, 12)
LexToken(ID, 'fatorial', 3, 20)
LexToken(ABRE_PAR, '(', 3, 28)
LexToken(INTEIRO, 'inteiro', 3, 29)
```



```

LexToken(DOIS_PONTOS, ':' ,3,36)
LexToken(ID, 'n' ,3,38)
LexToken(FECHA_PAR, ') ' ,3,39)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,3,40)
LexToken(INTEIRO, ' inteiro ' ,4,45)
LexToken(DOIS_PONTOS, ':' ,4,52)
LexToken(ID, ' fat ' ,4,54)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,4,57)
LexToken(SE, ' se ' ,5,62)
LexToken(ID, ' n ' ,5,65)
LexToken(MAIOR, '>' ,5,67)
LexToken(INTEIRO, ' 0 ' ,5,69)
LexToken(ENTAO, ' então ' ,5,71)
LexToken(COMENTARIO, '{ não calcula se n > 0 } ' ,5,77)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,5,99)
LexToken(ID, ' fat ' ,6,108)
LexToken(ATRIBUICAO, ':=' ,6,112)
LexToken(INTEIRO, ' 1 ' ,6,115)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,6,116)
LexToken(REPITA, ' repita ' ,7,125)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,7,131)
LexToken(ID, ' fat ' ,8,144)
LexToken(ATRIBUICAO, ':=' ,8,148)
LexToken(ID, ' fat ' ,8,151)
LexToken(MULT, '*' ,8,155)
LexToken(ID, ' n ' ,8,157)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,8,158)
LexToken(ID, ' n ' ,9,171)
LexToken(ATRIBUICAO, ':=' ,9,173)
LexToken(ID, ' n ' ,9,176)
LexToken(SUB, '-' ,9,178)
LexToken(INTEIRO, ' 1 ' ,9,180)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,9,181)
LexToken(ATE, ' até ' ,10,190)
LexToken(ID, ' n ' ,10,194)
LexToken(IGUAL, '=' ,10,196)
LexToken(INTEIRO, ' 0 ' ,10,198)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,10,199)
LexToken(RETORNA, ' retorna ' ,11,208)
LexToken(ABRE_PAR, '(' ,11,215)
LexToken(ID, ' fat ' ,11,216)
LexToken(FECHA_PAR, ') ' ,11,219)
LexToken(COMENTARIO, '{ retorna ... } ' ,11,221)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,11,255)
LexToken(SENAO, ' senão ' ,12,260)
LexToken(NOVA_LINHA, '\n' ,12,265)
LexToken(RETORNA, ' retorna ' ,13,274)

```

```
LexToken(ABRE_PAR, ' ( ',13,281)
LexToken(INTEIRO, ' 0 ',13,282)
LexToken(FECHA_PAR, ' ) ',13,283)
LexToken(NOVA_LINHA, ' \n ',13,284)
LexToken(FIM, ' fim ',14,289)
```

É possível notar que o código da análise léxica avaliou cada palavra do código em T++, o classificou e retornou seu valor em um arquivo de saída. Isso é exatamente o objetivo da análise léxica, retornar todos os *tokens* que um determinado código possui.

7. Resultados análise sintática

O código da análise sintática recebe um arquivo contendo o código na linguagem T++. Ele chama a análise léxica para obter os *tokens* e analisar se esses correspondem a gramática descrita.

```
1 inteiro: a[1024]
2
3 inteiro func(inteiro: a[])
4     retorna(0)
5 fim
6
7 inteiro principal()
8     inteiro: i,b
9     i:= 1
10
11     retorna(0)
12 fim
```

Figura 21. Código em T++.

Considere o código fatorial da Figura 21, a saída obtida quando executado a análise sintática desse código é uma árvore abstrata:

```
programa
  lista_declaracoes
  lista_declaracoes
  declaracao
  declaracao_funcao
  tipo inteiro
  cabecalho func
  lista_parametros
  corpo
  corpo
  acao
  retorna
  expressao
```

```

        expressao_logica
        expressao_simples
        expressao_aditiva
        expressao_multiplicativa
        expressao_unaria
        fator
        numero 0
declaracao
declaracao_funcao
    tipo inteiro
cabecalho_principal
    lista_parametros
corpo
    corpo
    corpo
    corpo
    acao
        declaracao_variaveis :
            tipo inteiro
            lista_variaveis
            lista_variaveis
            var i
            var b
    acao
        expressao
        atribuicao
        var i
        expressao
            expressao_logica
            expressao_simples
            expressao_aditiva
            expressao_multiplicativa
            expressao_unaria
            fator
            numero 1
    acao
        retorna
        expressao
            expressao_logica
            expressao_simples
            expressao_aditiva
            expressao_multiplicativa
            expressao_unaria
            fator
            numero 0

```

Referências

- AHO, A. V. (2008). *Compuladores: Princípios, técnicas e ferramentas*. SP: Pearson Addison-Wesley, 2nd edition.
- David M. Beazley (2011). Ply (python lex-yacc). <http://www.eng.utah.edu/~cs3100/lectures/l14/ply-3.4/doc/ply.html>. Acessado em 26-03-2018.
- Ivan L. M. Ricarte (2014). Compiladores). <http://www.dca.fee.unicamp.br/cursos/EA876/apostila/HTML/node37.html>. Acessado em 14-05-2018.
- Lucas Thomaz (2009). Compiladores: Bnf e ebnf). <https://lucasrthomaz.wordpress.com/2009/03/10/compiladores-bnf-e-ebnf/>. Acessado em 14-05-2018.
- USP (2012). Autômatos finito determinísticos. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4159708/mod_resource/content/1/De_representacao_de_linguagens_ate_Automato_Finito_-_2012.pdf. Acessado em 27-03-2018.
- Wikibooks (2013). Construção de compiladores/análise sintática). https://pt.wikibooks.org/wiki/Constru%C3%A7%C3%A3o_de_compiladores/An%C3%A1lise_sint%C3%A1tica. Acessado em 14-05-2018.
- Wikibooks (2018). Construção de compiladores: Análise léxica. https://pt.wikibooks.org/wiki/Constru%C3%A7%C3%A3o_de_compiladores/An%C3%A1lise_l%C3%A9xica. Acessado em 25-03-2018.