

Construção de Compiladores

Período Especial

Aula 18: Análise Sintática Ascendente

Bruno Müller Junior

Departamento de Informática
UFPR

2020



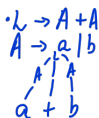
Introdução

- Esta aula baseia-se no artigo “LR Parsing”, A. V. AHO, S. C. JOHNSON, ACM Computing Surveys, Vol 6, No 2, June 1974.
- Sugerimos fortemente a leitura deste artigo. É muito bem escrito, muito didático.
- Outros exemplos usados aqui estão no livro do Tomasz.

Conceituação

$$L \rightarrow a$$

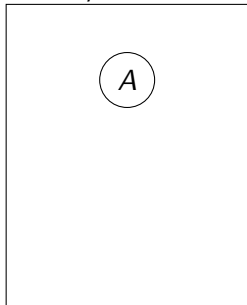
- Analisadores Sintáticos Ascendentes constroem a árvore de derivação da direita para a esquerda.
- Dentre os analisadores desta categoria, destacam-se os LR (*left to right parsing producing rightmost derivation*), que serão alvo do estudo.
- Uma das diferenças mais importantes para os descendentes (já estudados) é a forma de usar a produção para construir a árvore. Por exemplo, seja a produção $A \rightarrow b$:
 - um analisador descendente usa derivações.
 - um analisador ascendente usa reduções.



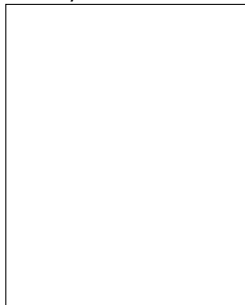
$$x = a + b;$$

Derivações e Reduções

Derivação $A \rightarrow b$

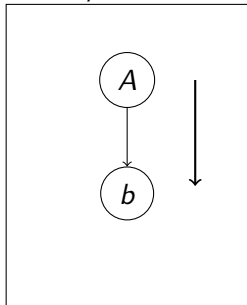


Redução $A \rightarrow b$

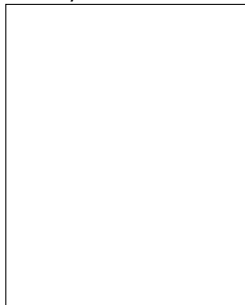


Conceituação

Derivação $A \rightarrow b$

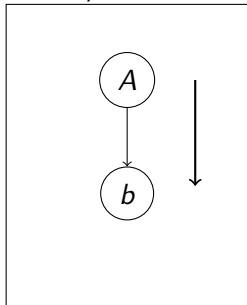


Redução $A \rightarrow b$

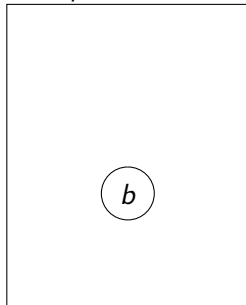


Conceituação

Derivação $A \rightarrow b$

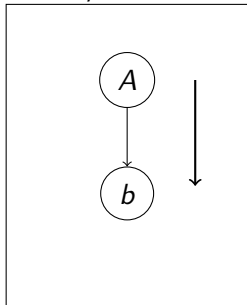


Redução $A \rightarrow b$

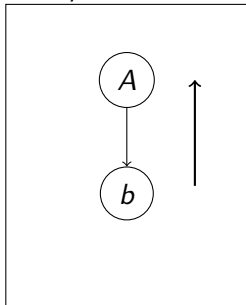


Conceituação

Derivação $A \rightarrow b$



Redução $A \rightarrow b$



Análises Ascendentes

- Existem vários analisadores sintáticos nesta categoria:
 - Análise de precedência simples
 - Análise de precedência de operadores
 - Análise LR, que também tem várias abordagens:
 - SLR(0)
 - SLR(1)
 - LALR(1)
 - LR(1)

- Listados do mais restrito para o mais geral:

$$L(SLR(0)) \subset L(SLR(1)) \subset L(LR(1)) = L(LALR(1))$$

- Iremos estudar somente o SLR(0) e o SLR(1), sugerindo como funcionam os demais.
- O bison usa o método LALR(1).



Parser LR

- Componentes

- Entrada contém α ;

- Parser código executável;

- Floresta estrutura de dados auxiliar;

- Tabela ação matriz obtida a partir de G ;

- Tabela desvios matriz obtida a partir de G ;

- Graficamente


 $\alpha =$

		...	
--	--	-----	--



Parser LR

Código Estático

Floresta LR

Tabelas de Ação/Desvio

Gramática

Tabela de Desvios

- Representação de um grafo com uma tabela.
- linhas: vértices;
- colunas: Variáveis e terminais da gramática.
- Exemplo: considere a gramática G abaixo e tabela de desvios obtida a partir dela:

$$\begin{aligned}
 G = \{ & L' \rightarrow L\# \\
 & L \rightarrow L, E \textcircled{1} \\
 & L \rightarrow E \textcircled{2} \\
 & E \rightarrow a \textcircled{3} | b \textcircled{4}
 \end{aligned}$$

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	3	4		
1					5	
2						
3						
4						
5		6	3	4		
6						

Tabela de Desvios

Tabela de Desvios						
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	3	4		
1						5
2						
3						
4						
5		6	3	4		
6						

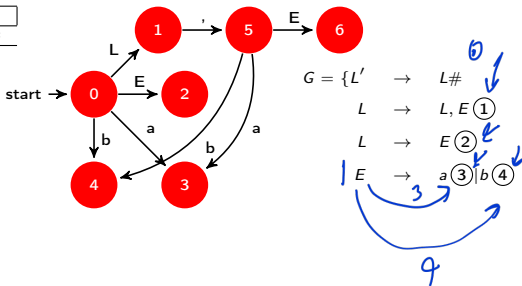


Tabela de Ações

- A tabela de ações indica o que deve ser feito em um vértice do grafo em função do token da entrada.

e (empilha)

R (Reduz)

A (Aceita)

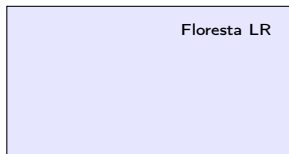
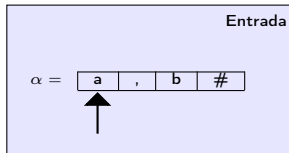
(erro)

		Tabela de Ações			
		a	b	,	#
0		e	e		
1				e	A
2				R ₂	R ₂
3				R ₃	R ₃
4				R ₄	R ₄
5		e	e		
6				R ₁	R ₁

Empilha

- cria um nova árvore com o token atual;
- consome o token;
- Exemplo: Ação(5,a)

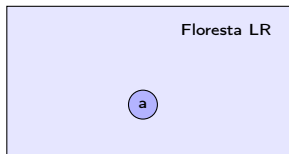
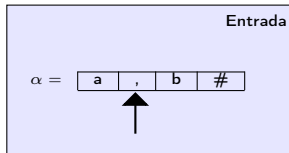
Tabela de Ações				
	a	b	,	#
0	e	e		
1			e	A
2			R_2	R_2
3			R_3	R_3
4			R_4	R_4
5	ⓔ	e		
6			R_1	R_1



Empilha

- cria um nova árvore com o token atual;
- consome o token;
- Exemplo: Ação(5,a)

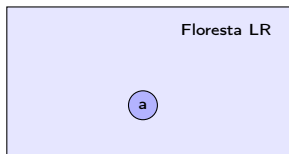
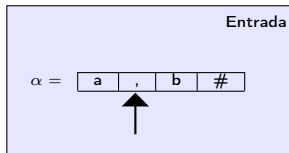
Tabela de Ações				
	a	b	,	#
0	e	e		
1			e	A
2			R_2	R_2
3			R_3	R_3
4			R_4	R_4
5	ⓔ	e		
6			R_1	R_1



Reduz

- executa a redução indicada;
- Exemplo: Ação(4, ",")
- $E \rightarrow a$ (3);

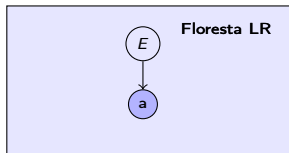
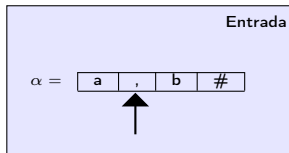
Tabela de Ações				
	a	b	,	#
0	e	e		
1			e	A
2			R_2	R_2
3			R_3	R_3
4			(R_4)	R_4
5	e	e		
6			R_1	R_1



Reduz

- executa a redução indicada;
- Exemplo: Ação(3, ",")
- $E \rightarrow a$ (3);

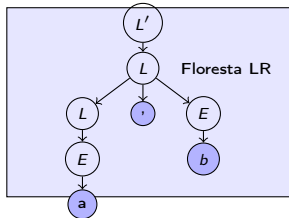
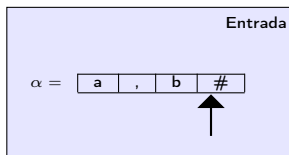
Tabela de Ações				
	a	b	,	#
0	e	e		
1			e	A
2			R_2	R_2
3			R_3	R_3
4			R_4	R_4
5	e	e		
6			R_1	R_1



Aceita

- Indica que a árvore foi construída

Tabela de Ações				
	a	b	,	#
0	e	e		
1			e	(A)
2			R ₂	R ₂
3			R ₃	R ₃
4			R ₄	R ₄
5	e	e		
6			R ₁	R ₁



- As tabelas são obtidas a partir da gramática.
- Se mudar a gramática, mudam as tabelas.
- Estudaremos:
 - Como funciona o algoritmo com tabelas dadas (G). ✓
 - Como construir as tabelas SLR(0) - a mais restrita; ✓
 - Como criar tabelas para classes mais amplas de gramáticas com SLR(1); ✓
 - Sugerir como estender ainda mais (LR(1), LALR(1)). ✓

Fusão das tabelas

- Para ocupar menos espaço, é comum combinar as tabelas em uma só.

Tabela de Ações				
	a	b	,	#
0	e	e		
1			e	A
2			R_2	R_2
3			R_3	R_3
4			R_4	R_4
5	e	e		
6			R_1	R_1

$G_1 = \{L' \rightarrow L\#$
 $L \rightarrow L, E \textcircled{1}$
 $L \rightarrow E \textcircled{2}$
 $L \rightarrow a \textcircled{3}$
 $L \rightarrow b \textcircled{4}$

Tabela de Desvios						
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	3	4		
1					5	
2						
3						
4						
5		6	3	4		
6						

Fusão das tabelas

- vermelho: tabela de ações;
- azul: tabela de desvios;

$$G_1 = \{L' \rightarrow L\#$$

$$L \rightarrow L, E \textcircled{1}$$

$$L \rightarrow E \textcircled{2}$$

$$L \rightarrow a \textcircled{3}$$

$$L \rightarrow b \textcircled{4}$$

Tabela de Ação e Desvios

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁



Execução

- Cada passo do parser usa como parâmetros:
 - o token de entrada;
 - a floresta de sub-árvores;
 - os estados, que podem ser visto como:
 - uma linha das tabelas;
 - o estado indicado no topo de cada árvore (cada árvore tem que ter um estado no topo);
- Aqui será visto uma descrição informal do algoritmo.
- A descrição formal pode ser encontrada no artigo usado como referência.

$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

Parser LR

Código Estático

Floresta LR

Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

G=

L'	→	L#	(1)
L	→	L, E	(2)
L	→	E	(3)
E	→	a	(4)
E	→	b	(4)

 $\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

Parser LR

Código Estático

- 1. lê token
- 2. coloca estado inicial na floresta

Tabelas de Ação/Desvio

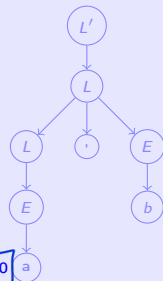
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

G=

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	⑤

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---



Parser LR

Código Estático

- Tabela[0,a]: empilha e vai para estado 3
- empilha token atual (cria árvore na floresta)
 - coloca novo estado no topo desta árvore

Tabelas de Ação/Desvio

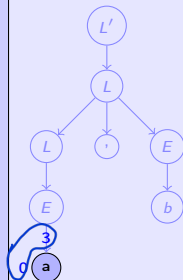
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

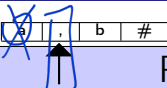
Gramática

G=

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	⑤

Floresta LR



$\alpha =$ 

Parser LR

Tabela[3, ",", "#]: R_3

Código Estático

1. Aplica a redução número 3 ($E \rightarrow a$)
2. Observe que a árvore ficou sem estado.
3. TODA ARVORE PRECISA DE UM ESTADO
4. Aplica Estado da árvore anterior com topo da árvore $[0, E]=2$



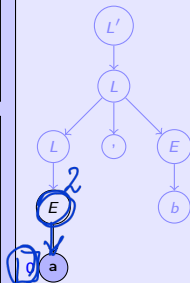
Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	R_1
2					R_2	R_2
3					R_3	R_3
4					R_4	R_4
5		6	e3	e4		
6					R_1	R_1

Gramática

$G =$ $L' \rightarrow L\#$ (1)
 $L \rightarrow L, E$ (2)
 $L \rightarrow E$ (2)
 $E \rightarrow a$ (3)
 $E \rightarrow b$ (4)

Floresta LR



$\alpha =$

a , b #



Parser LR

Código Estático

- coloca estado no topo da árvore: Tabela[0,E]=2

Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R2	R2
3					R3	R3
4					R4	R4
5		6	e3	e4		
6					R1	R1

Gramática

G=

$L' \rightarrow L\#$ (1)

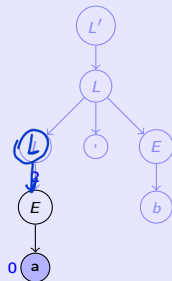
$L \rightarrow L, E$ (2)

$L \rightarrow E$ (3)

$E \rightarrow a$ (4)

$E \rightarrow b$ (5)

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---



Parser LR

Código Estático

1. Todas árvores com estado: prossegue na tabela
2. Tabela[2, ","] = R_2
3. Aplica a redução número 2 ($L \rightarrow E$)

Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	R_1
2					R_2	R_2
3					R_3	R_3
4					R_4	R_4
5		6	e3	e4		
6					R_1	R_1

Gramática

$G =$

 $L' \rightarrow L\#$

 $L \rightarrow L, E$

 $L \rightarrow E$

 $E \rightarrow a$

 $E \rightarrow b$

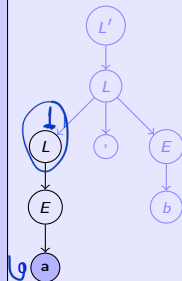
①

②

③

④

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---



Parser LR

Código Estático

1. Árvore sem estado
2. TODA ÁRVORE PRECISA DE UM ESTADO
3. Aplica Estado da árvore anterior com topo da árvore Tabela[0,L]=1

Tabelas de Ação/Desvio

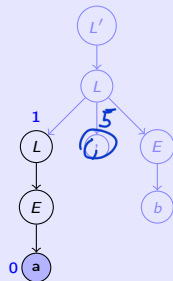
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

G=

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

Floresta LR



$\alpha =$

a b #



Parser LR

Código Estático

1. Tabela[1, ", "] = e5
2. Empilha ", " e coloca estado 5 na árvore

Tabelas de Ação/Desvio

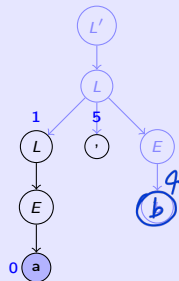
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

G =

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

↑ Parser LR

Código Estático

1. Tabela[5,"b"]= $e4$
2. Empilha "b" e coloca estado 4 na árvore

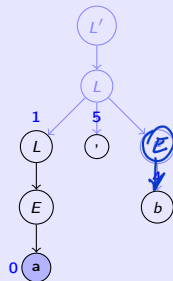
Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	$e3$	$e4$		
1					$e5$	R_1
2					R_2	R_2
3					R_3	R_3
4					R_4	R_4
5		6	$e3$	$e4$		
6					R_1	R_1

Gramática

$$G = \begin{array}{l} L' \rightarrow L\# \\ L \rightarrow L, E \\ L \rightarrow E \\ E \rightarrow a \\ E \rightarrow b \end{array} \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array}$$

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

↑ Parser LR

Código Estático

1. Tabela[4, ","] = R4

Tabelas de Ação/Desvio

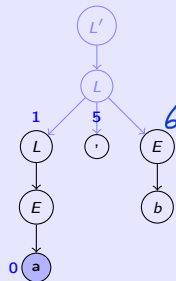
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5			e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

 $G =$

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

↑ Parser LR

Código Estático

1. Coloca Estado Tabela[5,E]=6

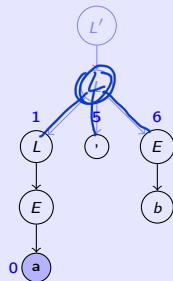
Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

$$G = \begin{array}{l} L' \rightarrow L\# \\ L \rightarrow L, E \\ L \rightarrow E \\ E \rightarrow a \\ E \rightarrow b \end{array} \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array}$$

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

↑ Parser LR

Código Estático

1. Tabela[5,#]=R1 ($L \rightarrow L, E$)

Tabelas de Ação/Desvio

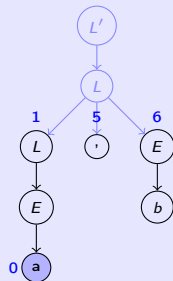
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

Gramática

 $G =$

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

↑ Parser LR

Código Estático

1. Tabela[5,#]=R1 ($L \rightarrow L, E$)

Tabelas de Ação/Desvio

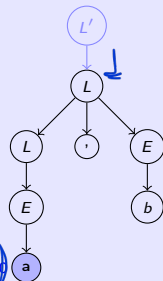
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R2	R2
3					R3	R3
4					R4	R4
5		6	e3	e4		
6					R1	R1

Gramática

 $G =$

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

Floresta LR



$\alpha =$

a , b #

↑ Parser LR

Código Estático

1. Coloca Estado Tabela[0,E] = 1

Tabelas de Ação/Desvio

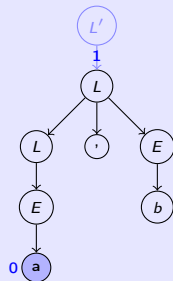
	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4	e5	A
1					R2	R2
2					R3	R3
3					R4	R4
4						
5		6	e3	e4		
6					R1	R1

Gramática

G=

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

Floresta LR



$\alpha =$

a	,	b	#
---	---	---	---

↑ Parser LR

Código Estático

1. Tabela[1,#]=Aceita

Tabelas de Ação/Desvio

	L	E	a	b	,	#
0	1	2	e3	e4		
1					e5	A
2					R ₂	R ₂
3					R ₃	R ₃
4					R ₄	R ₄
5		6	e3	e4		
6					R ₁	R ₁

 $\alpha = (a, b, a)$

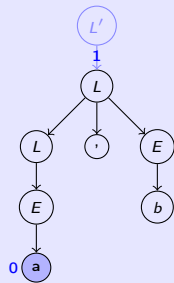
Gramática

 $G =$

$L' \rightarrow L\#$	①
$L \rightarrow L, E$	②
$L \rightarrow E$	③
$E \rightarrow a$	④
$E \rightarrow b$	④

 $\alpha = ab$

Floresta LR

 $\alpha = a,b,a$

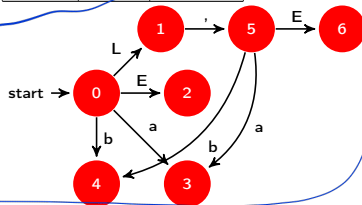
Implementação

- A demonstração de funcionamento do algoritmo usando a floresta é didática, mas não é prática.
- Uma implementação prática usa uma pilha, que representa os estados de todas as árvores da floresta.

Implementação

Floresta LR

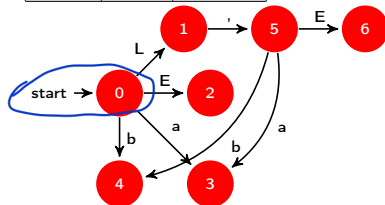
Passo	Pilha	Entrada
Início		a,b#
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		



Implementação



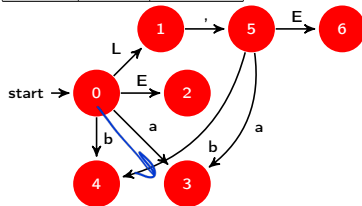
Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a,b#



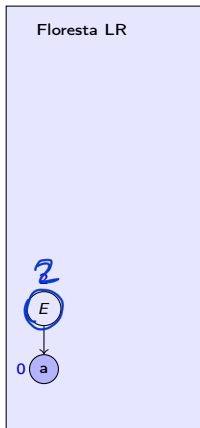
Implementação



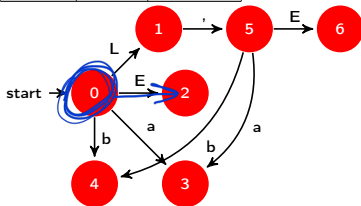
Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a, b#
1	0(3)	, b#



Implementação

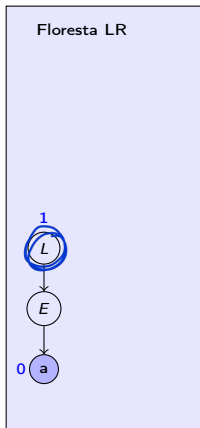


Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a, b#
1	0 1	, b#
2	0 1 2	, b#

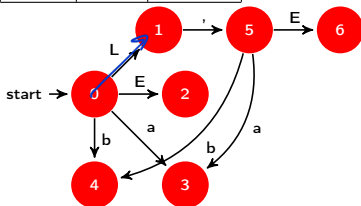


Implementação

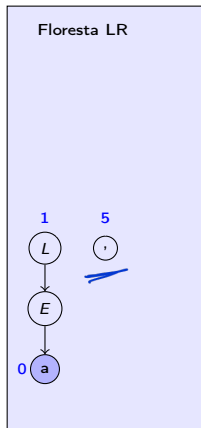
Floresta LR



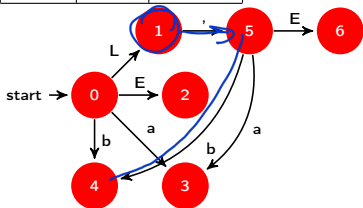
Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a, b#
1	0 3	, b#
2	0 3	, b#
3	0 1	, b#



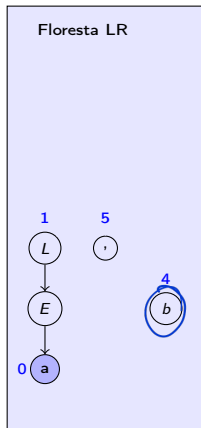
Implementação



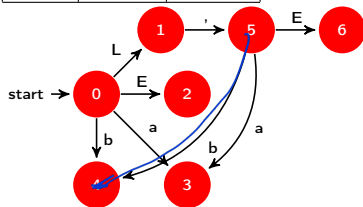
Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a, b#
1	0 3	, b#
2	0 2	, b#
3	0 1	b#
4	0 1 5	b#



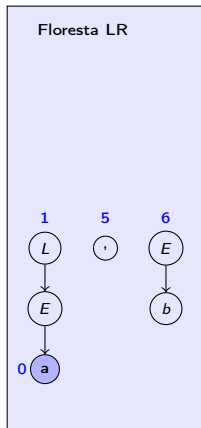
Implementação



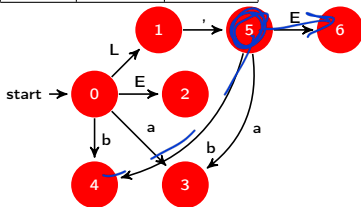
Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a,b#
1	0 3	,b#
2	0 2	,b#
3	0 1	,b#
4	0 1 5	b#
5	0 1 5 4	#



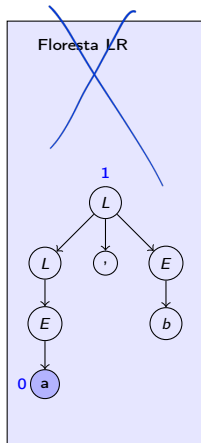
Implementação



Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a, b#
1	0 3	, b#
2	0 2	, b#
3	0 1	, b#
4	0 1 5	b#
5	0 1 5 4	#
6	0 1 5 b	#

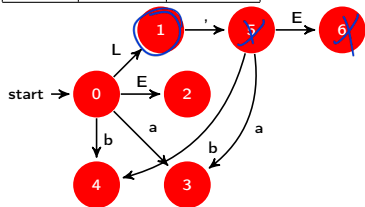


Implementação




Passo	Pilha	Entrada
Início	0	a, b#
1	0 3	, b#
2	0 2	, b#
3	0 1	, b#
4	0 1 5	b#
5	0 1 5 4	#
6	0 1 5 6	#
7	0 1	#

12 EOF



Exercícios

- Use a mesma gramática para verificar as seguintes entradas:



- $\alpha_1 = a\#$

- $\alpha_2 = a,\#$

- $\alpha_3 = ab\#$

- $\alpha_4 = a,b,a\#$

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);
- Para cada gramática, o bison gera "tabelas" diferentes.

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);
- Para cada gramática, o bison gera “tabelas” diferentes.
- Veja o autômato a pilha em `compilador.output`

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);
- Para cada gramática, o bison gera "tabelas" diferentes.
- Veja o autômato a pilha em `compilador.output`
- Próximas aulas: como construir as tabelas para esta gramática;

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);
- Para cada gramática, o bison gera “tabelas” diferentes.
- Veja o autômato a pilha em `compilador.output`
- Próximas aulas: como construir as tabelas para esta gramática;
 - ① tabelas SLR(0);

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);
- Para cada gramática, o bison gera “tabelas” diferentes.
- Veja o autômato a pilha em `compilador.output`
- Próximas aulas: como construir as tabelas para esta gramática;
 - ① tabelas SLR(0);
 - ② tabelas SLR(1);

- O algoritmo descrito nesta aula é quase todo estático;
- O bison gera um arquivo ".c" contendo o código fonte do parser (`compilador.tab.c`);
- Para cada gramática, o bison gera “tabelas” diferentes.
- Veja o autômato a pilha em `compilador.output`
- Próximas aulas: como construir as tabelas para esta gramática;
 - ① tabelas SLR(0);
 - ② tabelas SLR(1);
 - ③ tabelas LR(1) e LALR(1);



- Página para anotações

Licença

- Slides desenvolvidos somente com software livre:
 - \LaTeX usando beamer;
 - Inkscape.
- Licença:
 - Creative Commons Atribuição-Use Não-Comercial-Vedada a Criação de Obras Derivadas 2.5 Brasil License. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/br/>