

Análise Sintática Determinística

Uma apresentação comparada de
alguns métodos clássicos de análise

Aula 09: Parte 2 – Análise Ascendente

ANÁLISE SINTÁTICA ASCENDENTE

Analísadores Ascendentes

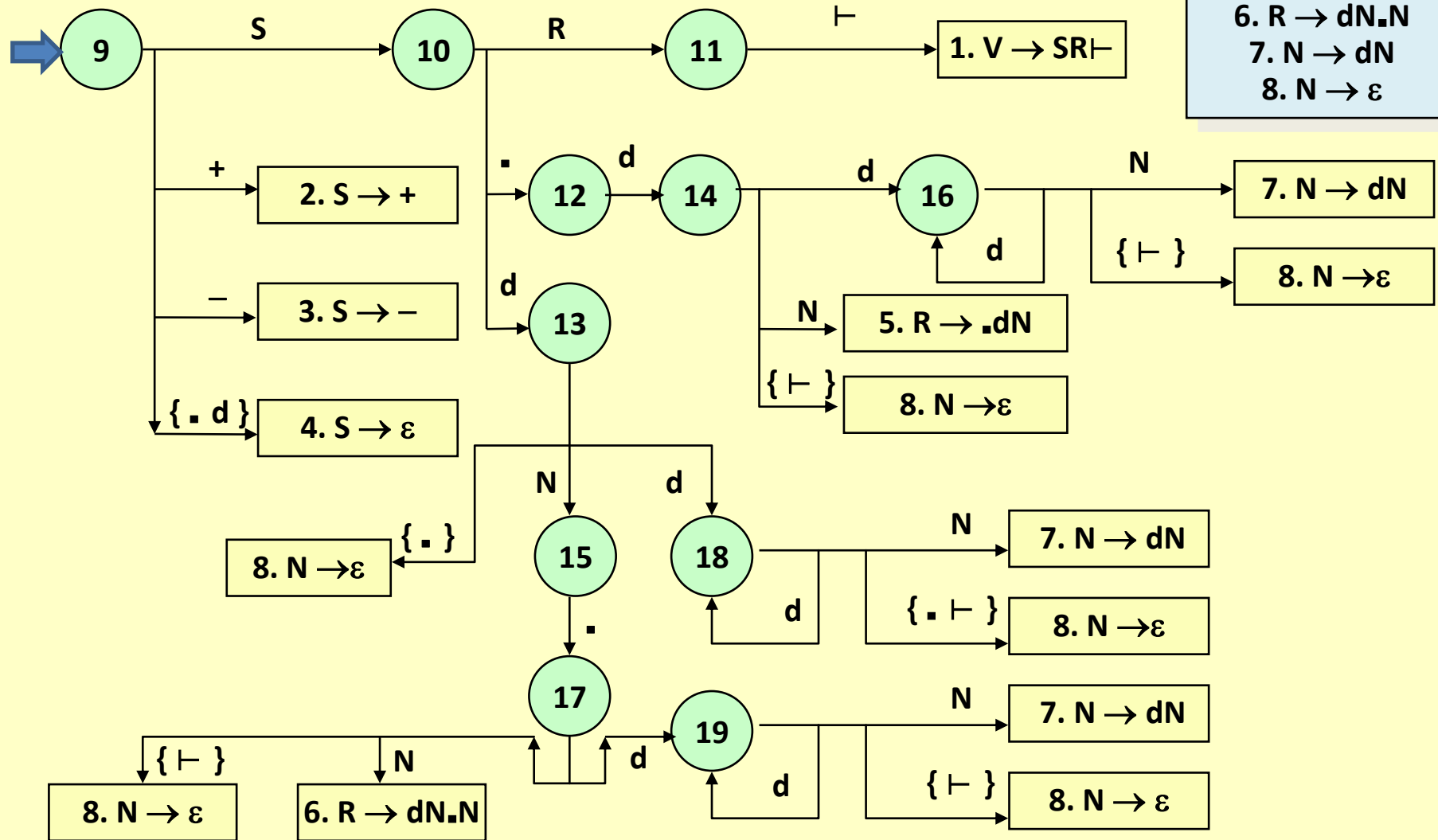
- LR(k) constitui a classe mais abrangente de gramáticas do tipo 2, compreendendo todas as linguagens que propiciam a elaboração de analisadores determinísticos (inclusive todas as LL(k))
- Logo, os analisadores ascendentes formam a classe mais ampla possível de analisadores determinísticos.
- Na sua operação,
 - em vez de derivações, empregam *reduções*
 - usam *tabelas de análise*, e uma *pilha*
- Empregam transições de três tipos:
 - **READ** (consumo de símbolo)
 - **LOOK AHEAD** (exame de símbolo, sem consumo)
 - **APPLY** (redução: **aplicação** de uma regra de produção)

Gramáticas LR(k)

- **LR(k) significa:**
 - **L** = *Left to right analysis*
 - **R** = *Rightmost derivation*
 - **k** = *k-symbol look-ahead*
- **Uma gramática é LR(k) quando:**
 - Para qualquer produção $A \rightarrow \alpha$ não houver outra produção na gramática que possa substituí-la em derivações da forma:
$$S \Rightarrow^* \beta A \gamma \Rightarrow^* \beta \alpha \gamma$$
 - A análise tem início nos átomos da sentença, em direção à raiz da gramática (feita de baixo para cima – *bottom-up*)
 - As reduções são relativas ao não-terminal mais à direita na forma sentencial (aplicam-se na ordem inversa da derivação)
 - Determina-se a produção a aplicar inspecionando-se α , β e, no máximo, **k** símbolos iniciais de γ (estes, todos terminais)

Um Analisador LR(1)

1. $V \rightarrow SR \mid -$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \epsilon$
5. $R \rightarrow \cdot dN$
6. $R \rightarrow dN \cdot N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \epsilon$



(Autômato de decisão LR(1))

Montagem do autômato de decisão (1)

Parte-se da gramática, em particular, da produção 1, que define sua raiz, marcada à esquerda:

Gramática

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

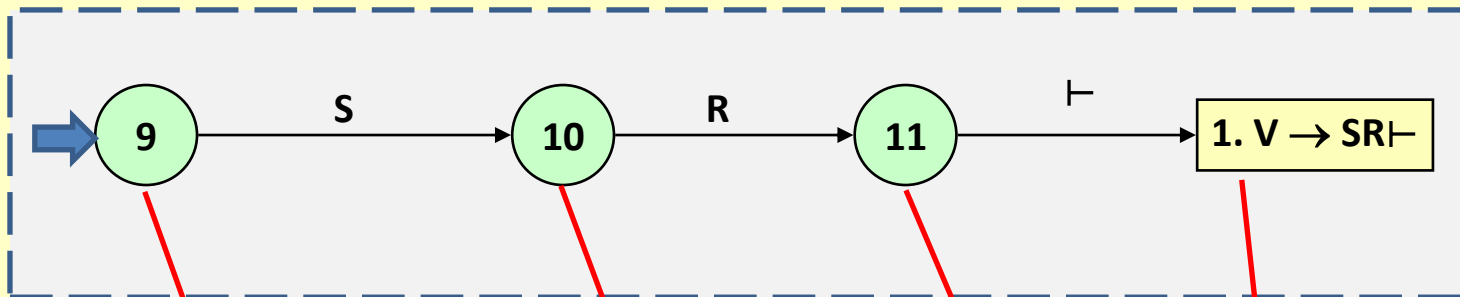
$V \rightarrow \bullet SR \vdash$

Montam-se para ela todos os itens LR(1), a cada qual fica associado um estado do autômato de decisão.

9. $[V \rightarrow \bullet SR \vdash]$
10. $[V \rightarrow S \bullet R \vdash]$
11. $[V \rightarrow SR \bullet \vdash]$
1. $[V \rightarrow SR \vdash \bullet]$

Em seguida, cada um desses itens deve ser trabalhado de forma análoga, para desenvolver os conjuntos de itens referentes aos eventuais não-terminais à direita das respectivas marcas.

Autômato em construção (1)



1. $V \rightarrow SR\vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

1. $[V \rightarrow SR\vdash \bullet]$

11. $[V \rightarrow SR\bullet\vdash]$

10. $[V \rightarrow S\bullet R\vdash]$

9. $[V \rightarrow \bullet SR\vdash]$

Montagem do autômato de decisão (2)

O item 9:

9. $[V \rightarrow \bullet SR \vdash]$

apresenta o marcador à esquerda de um não-terminal S. Isso exige a expansão de S segundo as regras 2, 3, 4, pela adição de estados associados a itens com marcadores à esquerda dos lados direitos dessas três regras:

Gramática

1. $V \rightarrow SR \vdash$

2. $S \rightarrow +$

3. $S \rightarrow -$

4. $S \rightarrow \varepsilon$

5. $R \rightarrow .dN$

6. $R \rightarrow dN.N$

7. $N \rightarrow dN$

8. $N \rightarrow \varepsilon$

9. $[S \rightarrow \bullet +]$

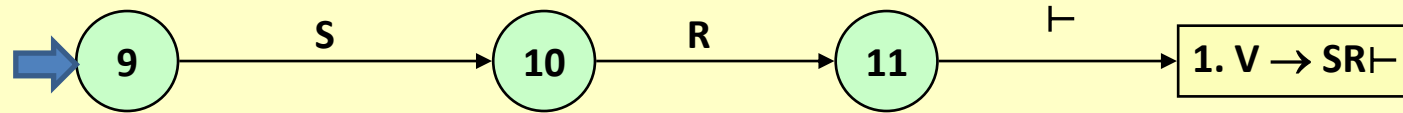
9. $[S \rightarrow \bullet -]$

4. $[S \rightarrow \bullet], \{. d\}$

Nesses itens, não há não-terminais à direita de marcadores, portanto novas expansões não são necessárias, completando-se assim o conjunto de itens LR(1) associados ao estado 9

Notar que, na regra 4 marcada, está indicado o conjunto $\text{follow}(S) = \text{first}(R) = \{. d\}$ devido ao ε

Autômato em construção (2)



9. $[V \rightarrow \bullet SR']$

9. $[S \rightarrow \bullet +]$

9. $[S \rightarrow \bullet -]$

4. $[S \rightarrow \bullet], \{. d\}$

1. $V \rightarrow SR'$

2. $S \rightarrow +$

3. $S \rightarrow -$

4. $S \rightarrow \epsilon$

5. $R \rightarrow .dN$

6. $R \rightarrow dN.N$

7. $N \rightarrow dN$

8. $N \rightarrow \epsilon$

Montagem do autômato de decisão (3)

Falta acrescentar os itens

2. $[S \rightarrow + \bullet]$

3. $[S \rightarrow - \bullet]$

Gramática

1. $V \rightarrow SR \mid$

2. $S \rightarrow +$

3. $S \rightarrow -$

4. $S \rightarrow \varepsilon$

5. $R \rightarrow .dN$

6. $R \rightarrow dN.N$

7. $N \rightarrow dN$

8. $N \rightarrow \varepsilon$

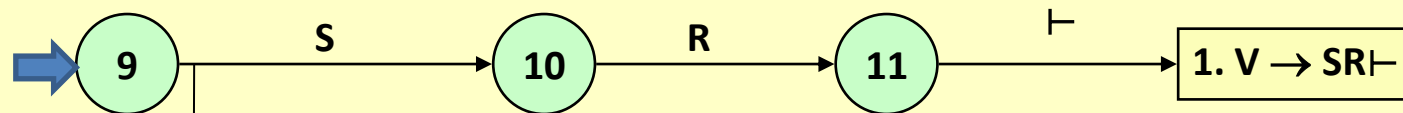
os quais completam as produções 2 e 3.

A produção 4, antes completada,

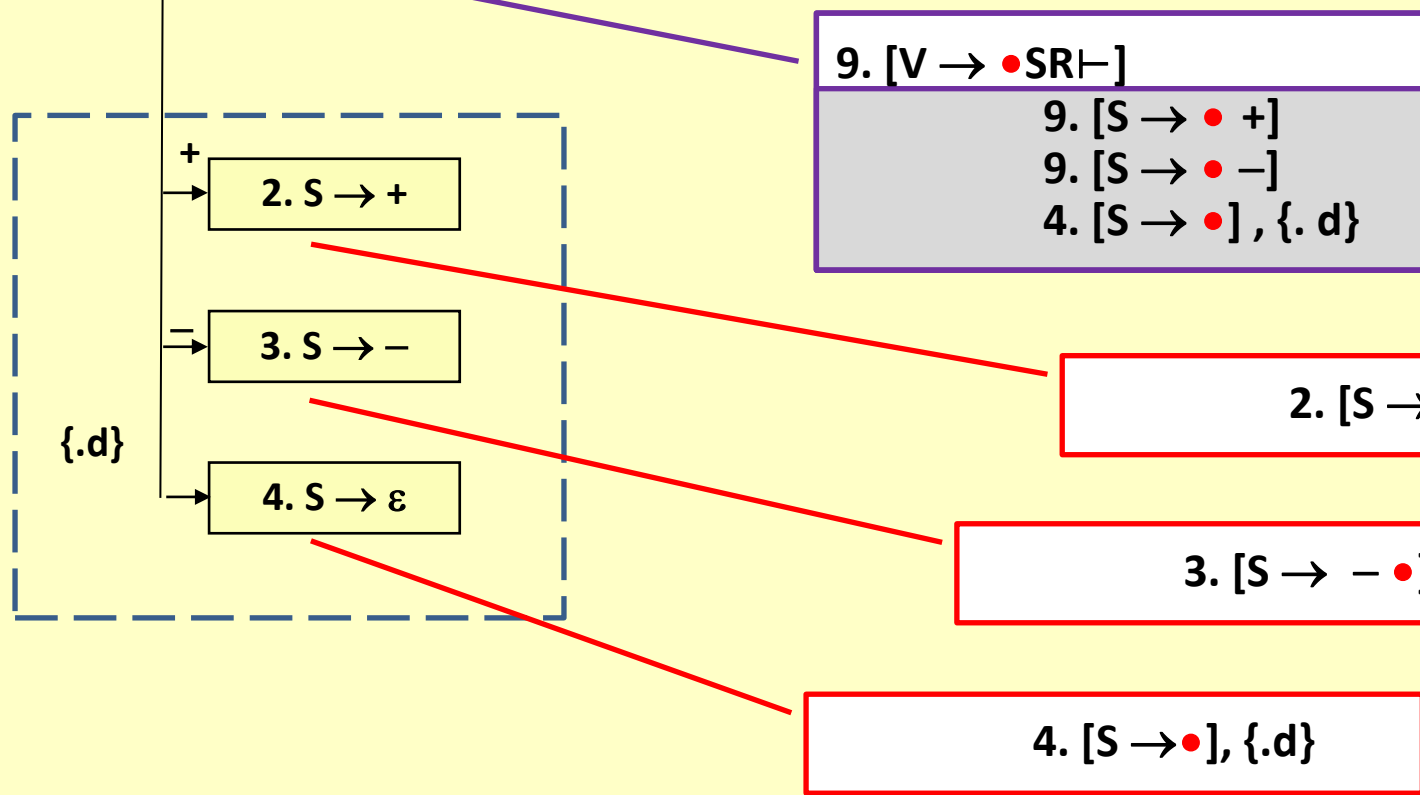
4. $[S \rightarrow \bullet], \{.d\}$

vem acompanhada de um conjunto de look-ahead, a ser testado no estado 9: os símbolos possíveis após S correspondem ao conjunto $\text{follow}(S) = \text{first}(R) = \{.d\}$

Autômato em construção (3)



1. $V \rightarrow SR\vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$



Montagem do autômato de decisão (4)

O item 10:

10. $[V \rightarrow S \cdot R \vdash]$

apresenta o marcador à esquerda do não-terminal R. Isso exige a expansão de R segundo as regras 5, 6, pela adição de estados associados a itens com marcadores à esquerda dos lados direitos dessas duas regras:

10. $[R \rightarrow \cdot dN]$

10. $[R \rightarrow \cdot dN.N]$

Nesses itens, não há não-terminais à direita de marcadores, portanto novas expansões não são necessárias, completando-se assim o conjunto de itens LR(1) relativos ao estado 10.

Gramática

1. $V \rightarrow SR \vdash$

2. $S \rightarrow +$

3. $S \rightarrow -$

4. $S \rightarrow \varepsilon$

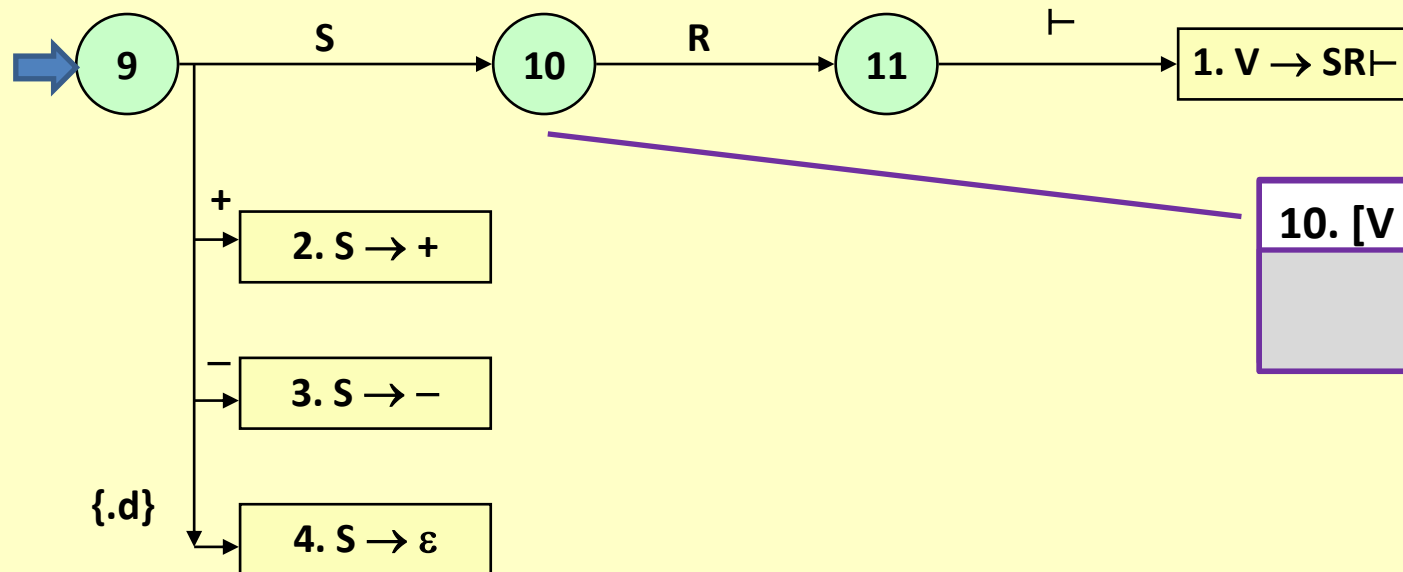
5. $R \rightarrow \cdot dN$

6. $R \rightarrow dN.N$

7. $N \rightarrow dN$

8. $N \rightarrow \varepsilon$

Autômato em construção (4)



1. $V \rightarrow SR\vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

10. $[V \rightarrow S \bullet R\vdash]$
10. $[R \rightarrow \bullet .dN]$
10. $[R \rightarrow \bullet dN.N]$

Montagem do autômato de decisão (5)

Prosseguindo, escrevem-se os outros itens associados ao não-terminal R, determinando os estados adicionais a serem incorporados ao autômato de decisão, relativos às regras 5 e 6 de R:

Gramática

1. $V \rightarrow SR \mid -$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

12. $[R \rightarrow .dN]$

13. $[R \rightarrow .d.N]$

5. $[R \rightarrow .dN.]$

14. $[R \rightarrow d.N.N]$

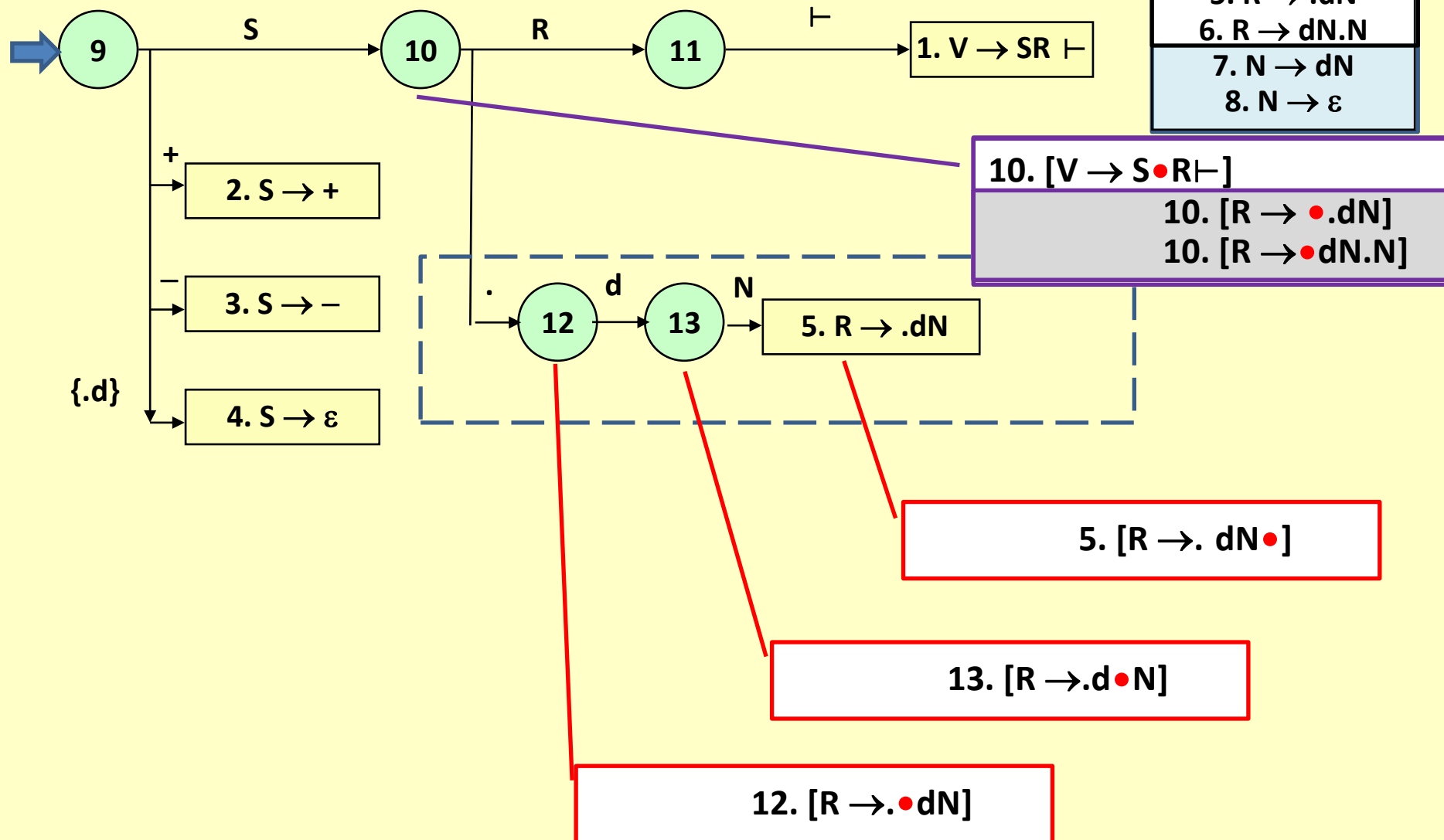
15. $[R \rightarrow dN.N]$

16. $[R \rightarrow dN.N.]$

6. $[R \rightarrow dN.N.]$

Desenvolvendo a parte relativa à regra 5:

Autômato em construção (5)



Montagem do autômato de decisão (6)

Gramática

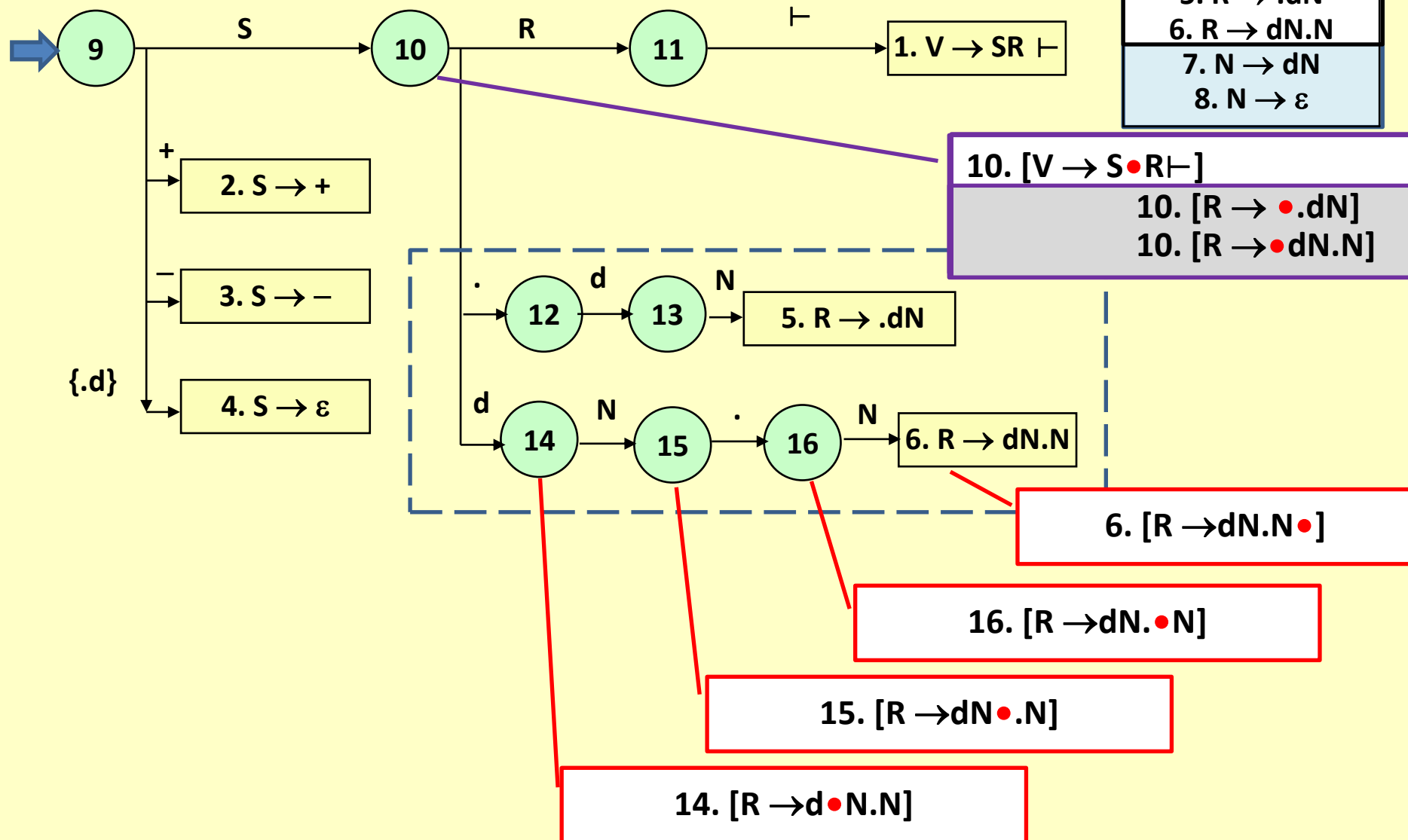
1. $V \rightarrow SR \mid$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

Desenvolvendo em seguida a parte relativa à regra 6:

14. $[R \rightarrow d \cdot N.N]$
15. $[R \rightarrow dN \cdot .N]$
16. $[R \rightarrow dN \cdot N]$
6. $[R \rightarrow dN.N \cdot]$

resulta:

Autômato em construção (6)



Montagem do autômato de decisão (7)

O item correspondente ao estado 11:

11. $[V \rightarrow SR \bullet \vdash]$

apresenta o marcador à esquerda do terminal $\vdash$, logo não exige expansão adicional.

Resta expandir três instâncias do não-terminal N: do estado 13 para 5, do estado 14 para 15 e do estado 16 para 6:

Gramática

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

13. $[R \rightarrow .d \bullet N]$

5. $[R \rightarrow .dN \bullet]$

14. $[R \rightarrow d \bullet N.N]$

15. $[R \rightarrow dN \bullet .N]$

16. $[R \rightarrow dN \bullet .N]$

6. $[R \rightarrow dN. N \bullet]$

Montagem do autômato de decisão (8)

Gramática

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

Iniciando pela instância que leva do estado 13 para o estado 5:

13. $[R \rightarrow .d.N]$

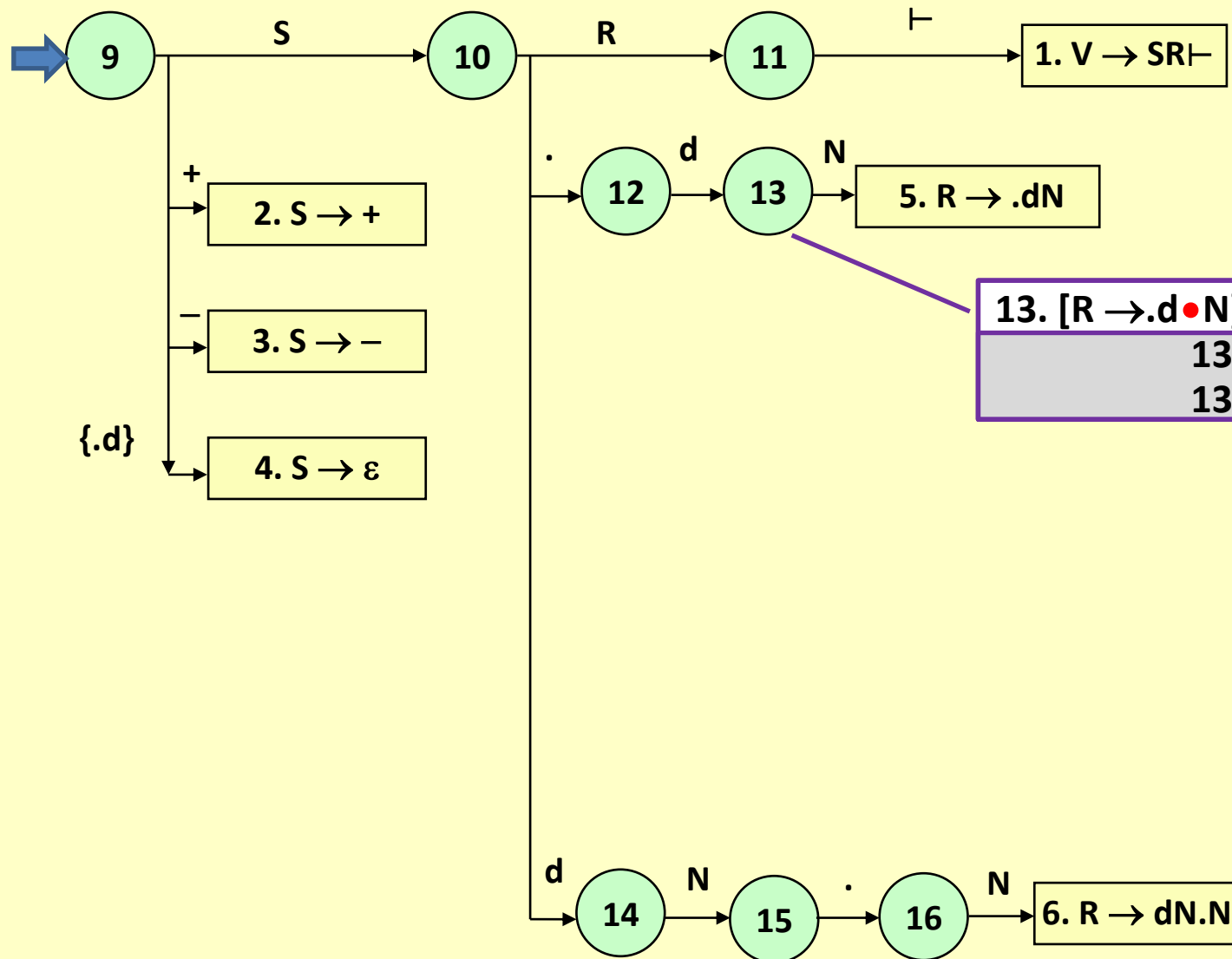
acrescentam-se os seguintes itens, relativos às regras 7 e 8 que definem o não-terminal N:

13. $[N \rightarrow .dN]$

8. $[N \rightarrow .], \{\vdash\}$

já que $\text{follow}(N) = \text{follow}(R) = \{\vdash\}$

Autômato em construção (7)



- | |
|-------------------------------|
| 1. $V \rightarrow SR\vdash$ |
| 2. $S \rightarrow +$ |
| 3. $S \rightarrow -$ |
| 4. $S \rightarrow \epsilon$ |
| 5. $R \rightarrow \cdot dN$ |
| 6. $R \rightarrow dN \cdot N$ |
| 7. $N \rightarrow dN$ |
| 8. $N \rightarrow \epsilon$ |

Montagem do autômato de decisão (9)

Desenvolvendo os itens associados a

13. $[N \rightarrow \bullet dN]$

acrescentam-se os seguintes estados:

17. $[N \rightarrow d \bullet N]$

7. $[N \rightarrow dN \bullet]$

Notar que para desenvolver os itens relativos a

17. $[N \rightarrow d \bullet N]$

seria preciso expandir novamente N, surgindo:

17'. $[N \rightarrow d \bullet N]$

7'. $[N \rightarrow dN \bullet]$

idênticos aos estados 17 e 7, respectivamente.

Como isso se repetiria indefinidamente, o melhor é simplificar o autômato, com a ajuda do conhecido lema de Arden, convertendo-se então a recursão em N em um fecho de Kleene sobre {d}.

Gramática

1. $V \rightarrow SR \mid$

2. $S \rightarrow +$

3. $S \rightarrow -$

4. $S \rightarrow \varepsilon$

5. $R \rightarrow \bullet dN$

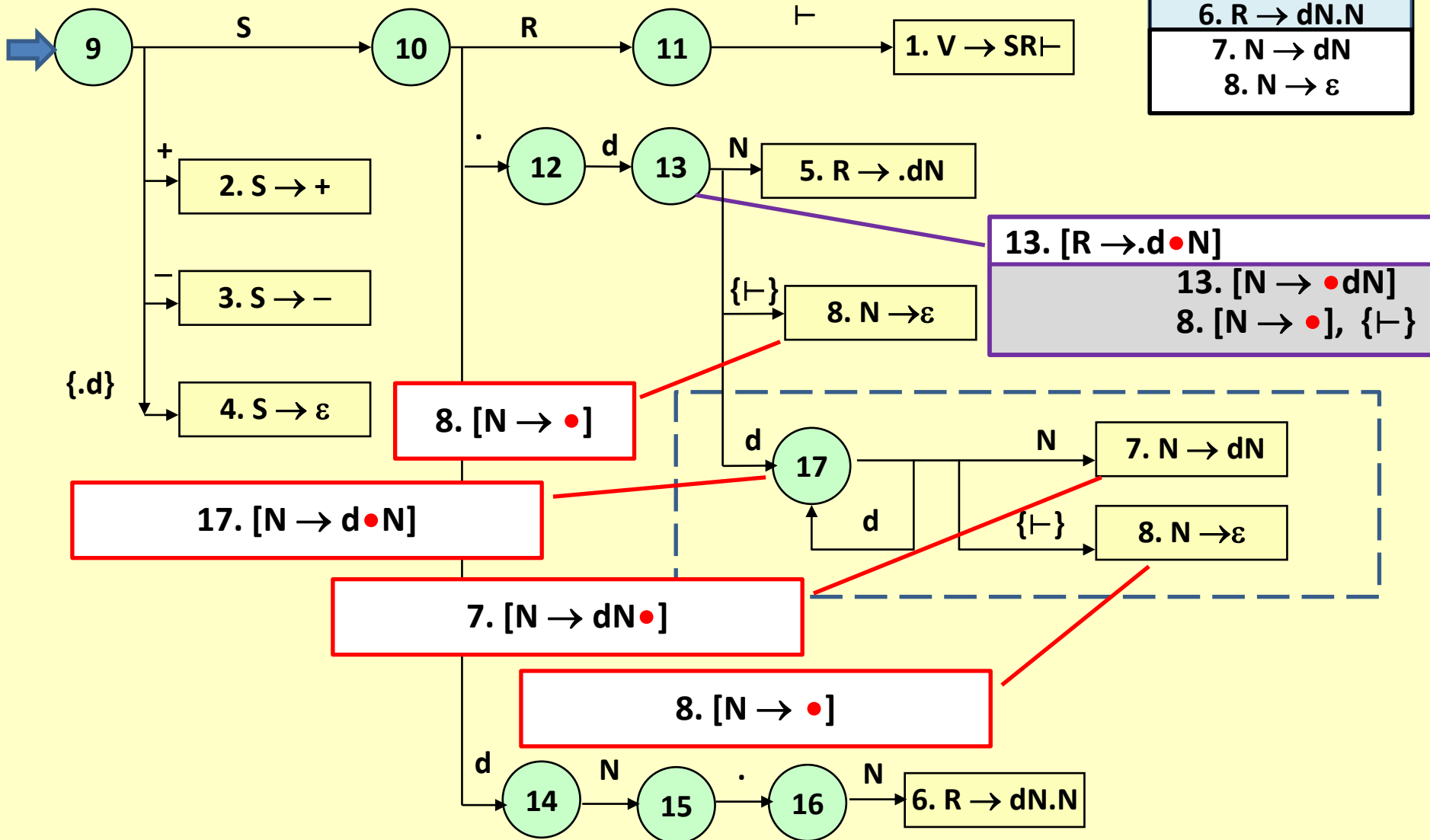
6. $R \rightarrow dN.N$

7. $N \rightarrow dN$

8. $N \rightarrow \varepsilon$

Autômato em construção (8)

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \epsilon$
5. $R \rightarrow \cdot dN$
6. $R \rightarrow dN \cdot N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \epsilon$



Montagem do autômato de decisão (10)

Gramática

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

Pode-se repetir o procedimento para o item

14. $[N \rightarrow \bullet dN]$

acrescentando-se os seguintes estados:

18. $[N \rightarrow d \bullet N]$

7. $[N \rightarrow dN \bullet]$

E também para o item

16. $[N \rightarrow \bullet dN]$

acrescentando-se os seguintes estados:

19. $[N \rightarrow d \bullet N]$

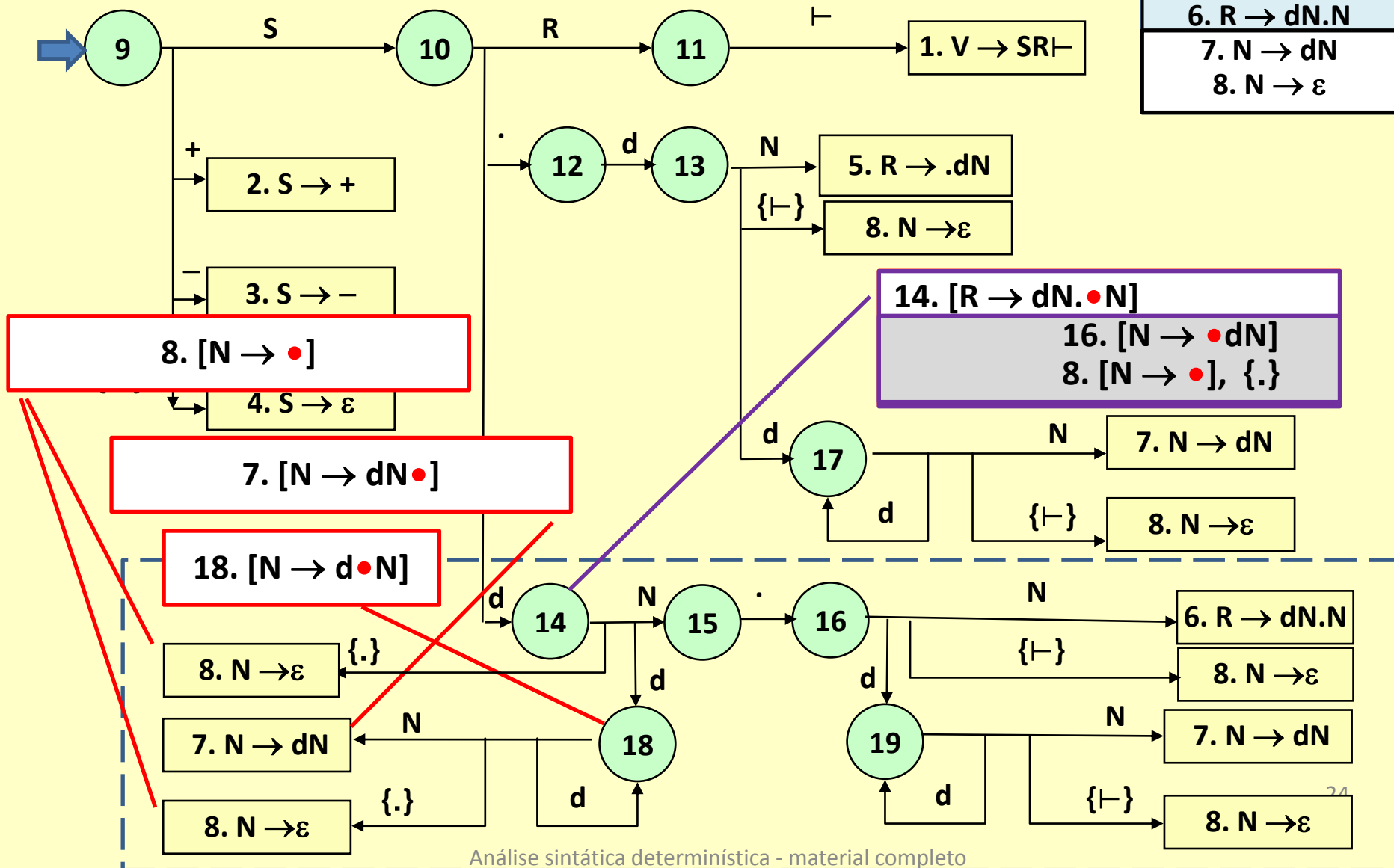
7. $[N \rightarrow dN \bullet]$

Naturalmente, apesar de estar sendo mencionado repetidamente por questão didática, no autômato o estado 7 é único.

O mesmo ocorre com o estado 8, variando porém o seu conjunto de look-ahead: para o estado 14, é $\{.\}$, e para o estado 16, é $\{\vdash\}$.

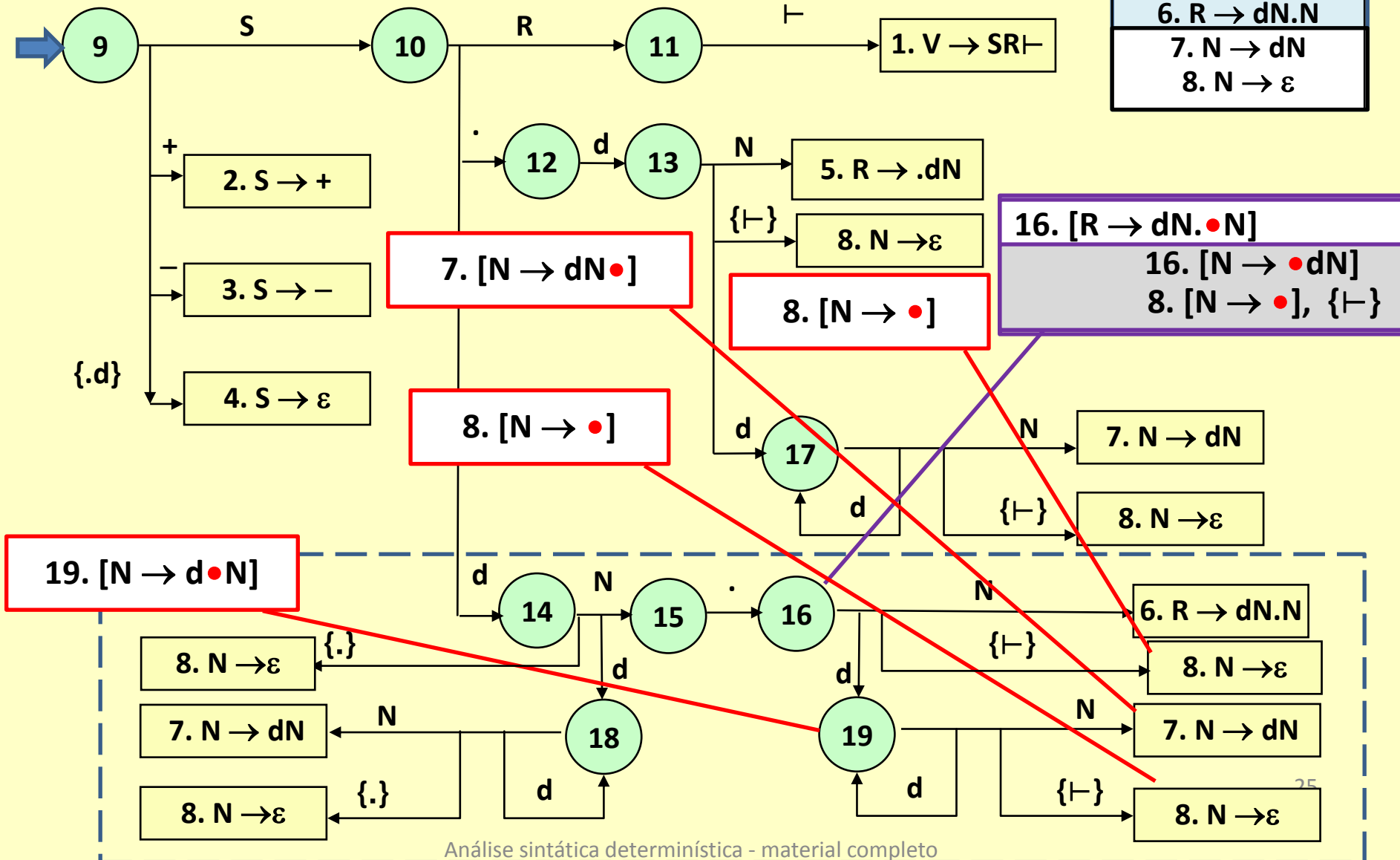
Autômato em construção (9)

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow \cdot dN$
6. $R \rightarrow dN \cdot N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$



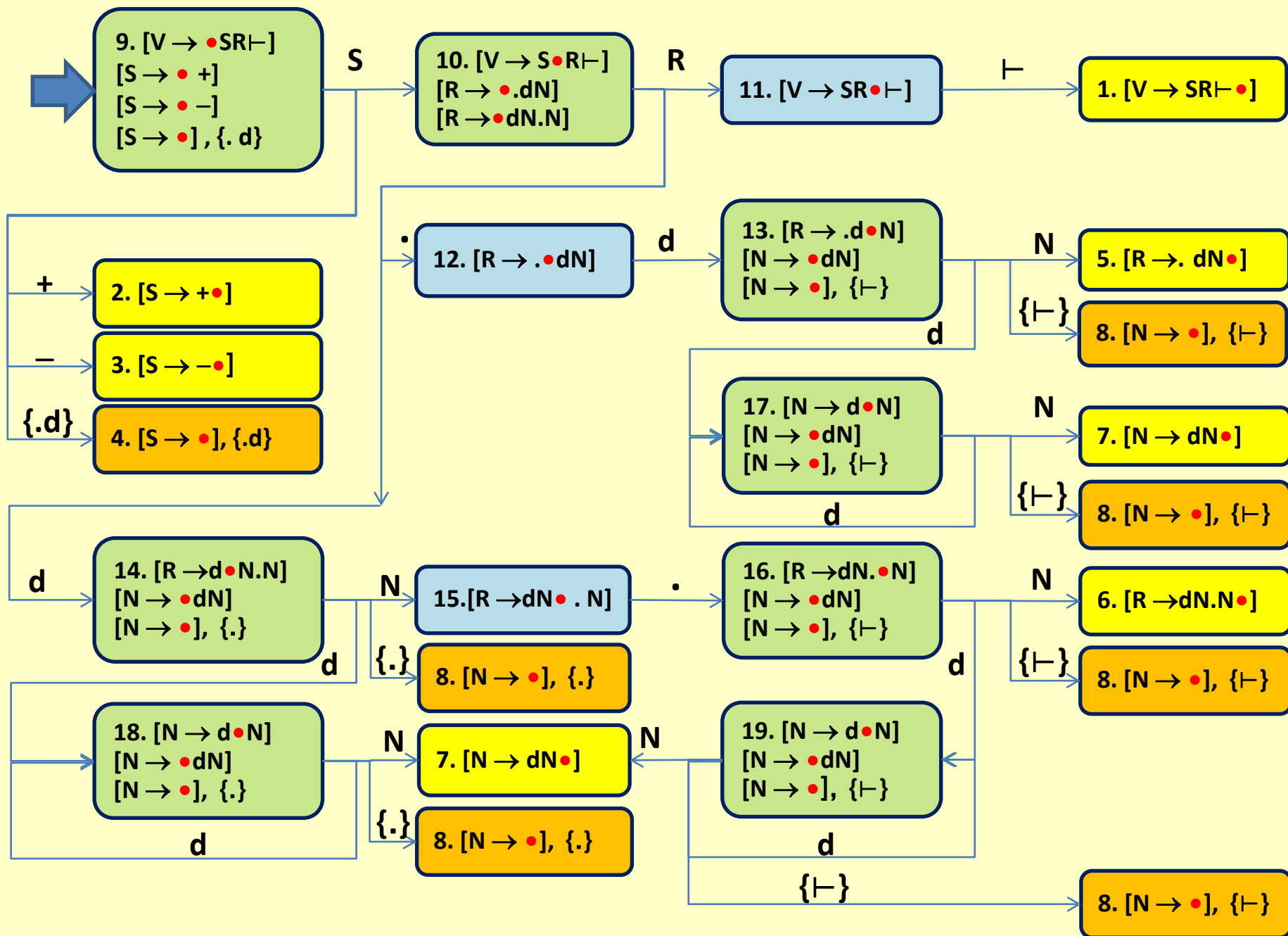
Autômato em construção (10)

1. $V \rightarrow SR \vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow \cdot dN$
6. $R \rightarrow dN \cdot N$
7. $N \rightarrow dN \bullet$
8. $N \rightarrow \bullet$



Comparação

- Compare o autômato final obtido no slide anterior com o mostrado no slide a seguir.
- Para facilitar a comparação, tomou-se o cuidado de adotar para este último autômato a mesma numeração de estados já utilizada no autômato previamente construído usando a intuição.
- Veja o conjunto de produções marcadas dentro de cada estado, as quais podem ser usadas para interpretar a situação da análise em cada estado.



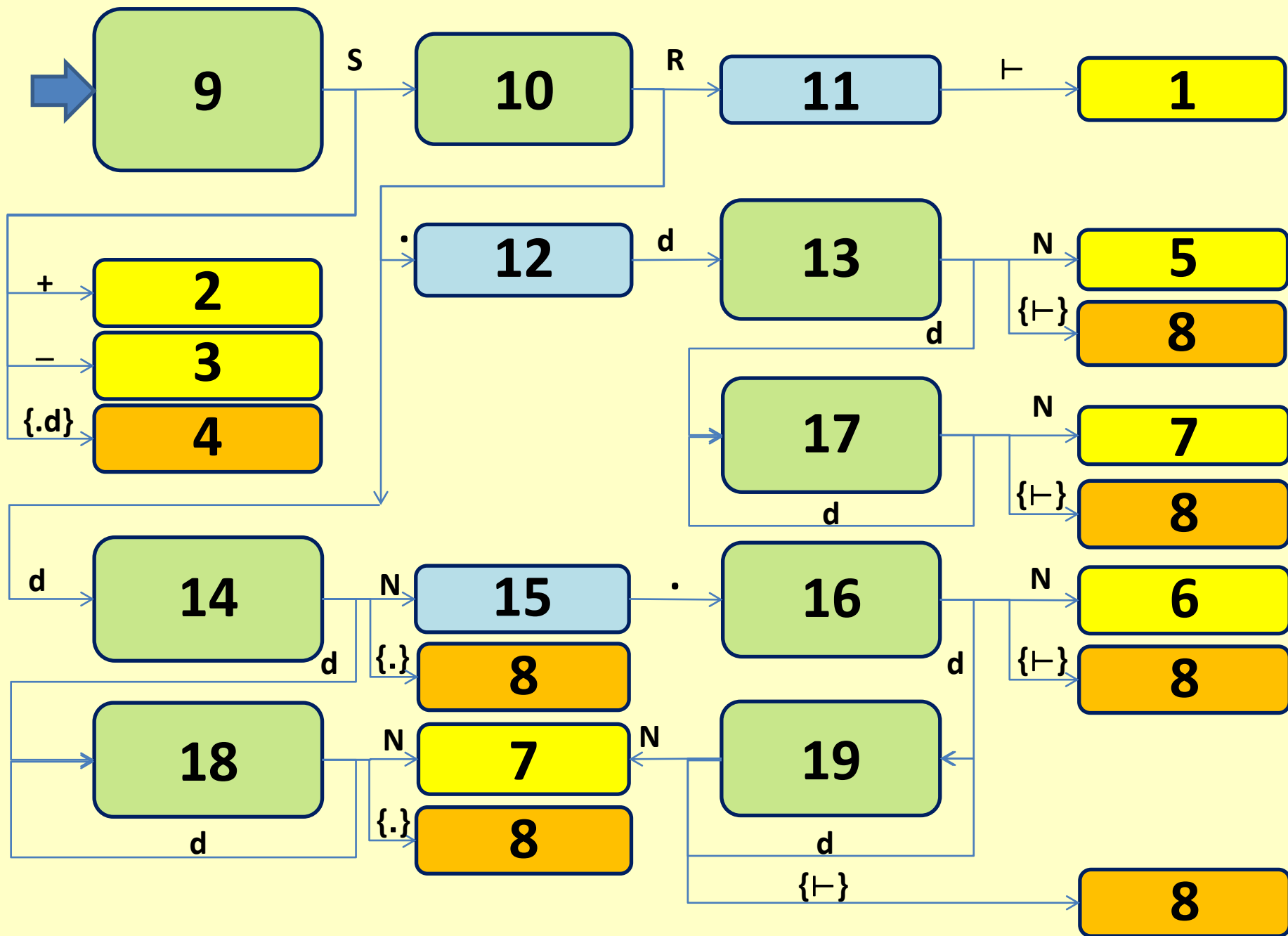


Tabela de análise

	S	R	N	V	+	-	.	d	⊢
9	r/10	-	-	-	a/2	a/3	l/4	l/4	-
10	-	r/11	-	-	-	-	r/12	r/13	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	a*/1
12	-	-	-	-	-	-	-	r/14	-
13	-	-	r/15	-	-	-	l/8	r/18	-
14	-	-	a/5	-	-	-	-	r/16	l/8
15	-	-	-	-	-	-	r/17	-	-
16	-	-	a/7	-	-	-	-	r/16	l/8
17	-	-	a/6	-	-	-	-	r/19	l/8
18	-	-	a/7	-	-	-	l/8	r/18	l/8
19	-	-	a/7	-	-	-	-	r/19	l/8

1. $V \rightarrow SR\vdash$
2. $S \rightarrow +$
3. $S \rightarrow -$
4. $S \rightarrow \varepsilon$
5. $R \rightarrow .dN$
6. $R \rightarrow dN.N$
7. $N \rightarrow dN$
8. $N \rightarrow \varepsilon$

a = apply
 r = read
 l = look-ahead
 * = accept
 - = erro de sintaxe

Esta tabela foi obtida por uma simples transcrição
do autômato previamente construído

Construção de Analisadores LR

- Item LR(k):

produção marcada :

$$[A \rightarrow \alpha \bullet \beta, \lambda]$$

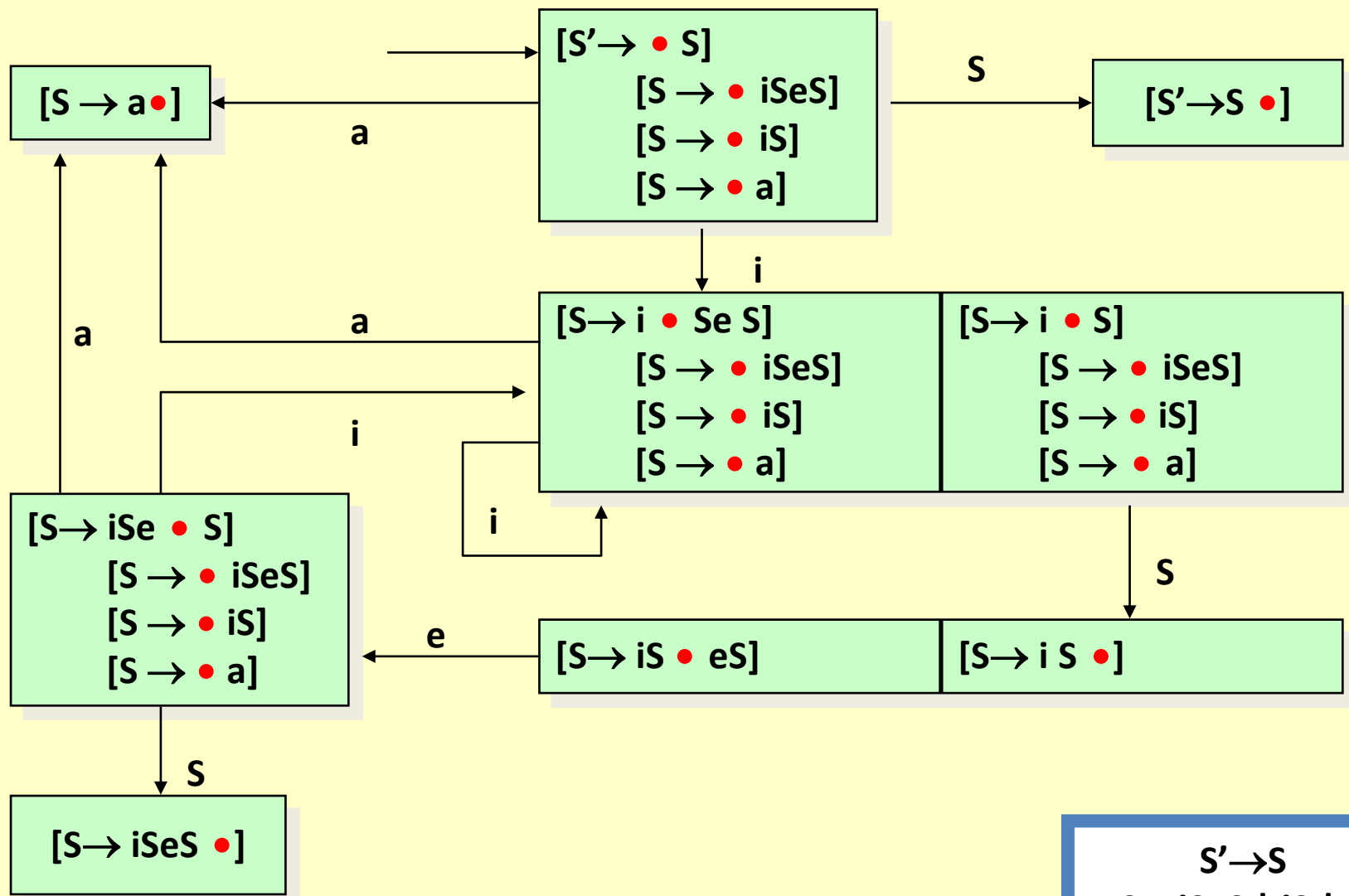
relativa à produção de P:

$$A \rightarrow \alpha\beta$$

cadeia de lookahead: λ

- Abrevia-se o conjunto $\{[A \rightarrow \alpha \bullet \beta, \lambda_i] \mid i=1,\dots,n\}$
como $[A \rightarrow \alpha \bullet \beta, \{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n\}]$
- Cada estado de um analisador LR(k) corresponde a um conjunto específico de itens LR(k)

Exemplo



$S' \rightarrow S$
 $S \rightarrow iSeS \mid iS \mid a$

MÉTODO RECURSIVO ASCENDENTE

Método ascendente recursivo (1)

(*recursive ascent*)

- Implementação literal conceitual da análise LR.
- Cada função do analisador representa um único estado do autômato LR.
- Dentro de cada função, um desvio múltiplo seleciona a ação a ser executada, com base no *token* corrente, extraído da pilha de entrada.
- Identificado o *token*, uma ação é escolhida e executada, com base no estado corrente.

***Recursive ascent* (2)**

- Conforme o *token* em questão, pode haver duas diferentes ações fundamentais a tomar:
 - ***Shift*** - Codificada como uma chamada de função, sua ação é de desviar para um próximo estado do autômato de decisão.
 - ***Reduce*** - Codificada de acordo com a rotina de ação semântica que é relevante para a produção, no caso. A saída desta rotina é passada, em uma estrutura de dados, para a rotina chamadora. A ação de redução devolve ao chamador também o número de *tokens* que foram *shifted* (ou seja, o comprimento da redução a efetuar), além do valor associado à ação, ou seja, o contador de *shifts* determina o ponto da pilha de trabalho até o qual a operação de redução deve atuar.

Recursive ascent (3)

- Há ainda uma terceira ação do autômato LR, que pode ser necessária em um dado estado, mas apenas depois de uma redução na qual o contador de *shifts* tenha sido zerado (indicando que o estado corrente pode manipular o resultado).
- Trata-se da ação ***goto***, que é essencialmente um caso particular de ***shift***, projetado para manipular, em particular, os não-terminais de uma produção.
- Esta ação deve ser manuseada depois do comando de desvios múltiplos, já que é nesse ponto que os resultados de qualquer redução irão aflorar no topo da pilha, após terem estado temporariamente submersos.

CONSTRUÇÃO DE TABELAS LR(1)

Construção de tabelas LR(1)

- Montar o autômato de controle a partir da gramática
- Codificar ações e transições nas tabelas de **ações** e **goto**
- Se todas as células da tabela tiverem um único elemento, trata-se realmente de uma tabela LR(1)

Visão geral

- Modela o estado da análise usando conjuntos de itens LR(1)
- Usa duas funções: *goto*(*s*, *X*) e *closure*(*s*)
 - *goto*() é similar a *move*() na construção dos subconjuntos
 - *closure*() acrescenta as informações necessárias para completar o estado
- Constrói estados e transições do autômato de controle
- Usa essa informação para preencher as tabelas de **ações** e **goto**

Ítems LR(1)

Uma configuração válida de um analisador LR(1) é representada por uma estrutura chamada ítem LR(1)

Um ítem LR(1) é um par $[P, \delta]$, em que

P é uma produção $A \rightarrow \beta\gamma$ com o marcador $\bullet$ em alguma posição da expressão $\beta\gamma$, do seu lado direito.

δ é o conjunto de *look-aheads*, com comprimento ≤ 1 .

O marcador $\bullet$ em um item denota a posição associada ao topo da pilha:

$[A \rightarrow \bullet \beta\gamma, \underline{a}]$ indica que a entrada que já foi analisada é consistente com o uso de $A \rightarrow \beta\gamma$ imediatamente à direita do símbolo do topo da pilha.

$[A \rightarrow \beta \bullet \gamma, \underline{a}]$ indica que a entrada já analisada é consistente com o uso de $A \rightarrow \beta\gamma$ nesse ponto da análise, $\underline{a}$ que o analisador já reconheceu β (ou seja, β já está no topo da pilha).

$[A \rightarrow \beta\gamma \bullet, \underline{a}]$ indica que o analisador já encontrou $\beta\gamma$, e também que o símbolo de *look-ahead* de $\underline{a}$ é consistente com a redução de $\beta\gamma$ para A .

A produção $A \rightarrow \beta$, com $\beta = B_1 B_2 B_3$ com *lookahead* $\underline{a}$, pode dar origem a quatro itens (naturalmente, o conjunto de itens LR(1) para uma dada gramática é finito)

$$[A \rightarrow \bullet B_1 B_2 B_3, \underline{a}], [A \rightarrow B_1 \bullet B_2 B_3, \underline{a}], [A \rightarrow B_1 B_2 \bullet B_3, \underline{a}], \text{ \& } [A \rightarrow B_1 B_2 B_3 \bullet, \underline{a}]$$

Para que, afinal, manter todos esses símbolos de *lookahead*?

- Facilitam a escolha da redução correta
- *Look-aheads* documentam o processo, a não ser com $\bullet$ na extremidade direita.
 - Não tem uso imediato em $[A \rightarrow \beta \bullet \gamma, \underline{a}]$
 - Em $[A \rightarrow \beta \bullet, \underline{a}]$, um *look-ahead* de $\underline{a}$ implica uma reduction com $A \rightarrow \beta$
 - Para um analisador modelado usando ítems $\{[A \rightarrow \beta \bullet, \underline{a}], [B \rightarrow \gamma \bullet \delta, \underline{b}]\}$, o *look-ahead* de $\underline{a} \Rightarrow \text{reduce para } A$; *look-ahead* em $\text{FIRST}(\delta) \Rightarrow \text{shift}$

Um contexto limitado à direita é suficiente para a correta escolha das ações a tomar.

Construção da tabela

Montar I , a coleção canônica de conjuntos de itens LR(1)

Iniciar com o estado inicial apropriado, s_0

- ◆ $[S' \rightarrow \bullet S, \underline{\text{EOF}}]$, juntamente com todos os itens a ele equivalentes
- ◆ Determinar os equivalentes usando o procedimento ***closure***(s_0)

Para cada s_k , e cada x , *calcular repetidamente os* ***goto***(s_k, x)

- ◆ Se o conjunto obtido ainda não estiver incluído, incluí-lo.
- ◆ Registrar todas as transições criadas por ***goto***()

Este procedimento atinge um ponto fixo em algum momento.

Preencher a tabela com a coleção de conjuntos de itens LR(1) assim obtida.

EXERCÍCIO SOBRE TABELAS DE ANÁLISE ASCENDENTE LR(1)

Para treinar com tabelas de análise

- Construa uma tabela de análise LR(k) para a linguagem definida pela gramática a seguir.

```
1. S = a := E
2. E = E + T | T
3. T = F * T | F
4. F = a | n | ( E ) | a ( Q )
5. Q = P | ε
6. P = E , P | E
```

Marcação inicial das produções

Notar que é desnecessário neste método efetuar alterações gramaticais.

$$1. S = \bullet a := E$$

$$2. E = \bullet E + T \mid \bullet T$$

$$3. T = \bullet F * T \mid \bullet F$$

$$4. F = \bullet a \mid \bullet n \mid \bullet (E) \mid \bullet a (Q)$$

$$5. Q = \bullet P \mid \bullet \varepsilon$$

$$6. P = \bullet E , P \mid \bullet E$$

1. NÃO-TERMINAL S (RAIZ)

$$S = a := E$$

$$1. S = \bullet a := E$$

Itens LR(1) associados a esta produção marcada:

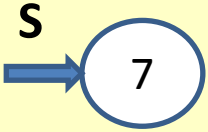
$$7. S = \bullet a := E$$

$$8. S = a \bullet := E$$

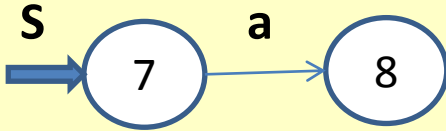
$$9. S = a := \bullet E$$

$$1. S = a := E \bullet$$

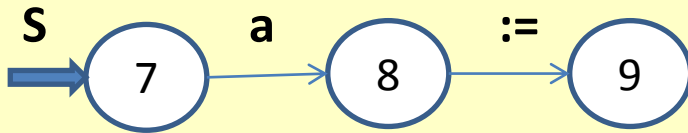
7. $S = \bullet a := E$



8. $S = a \bullet := E$



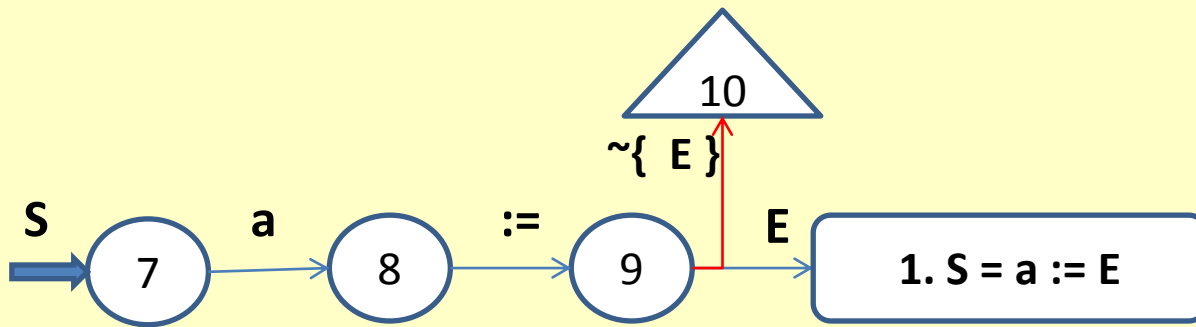
9. $S = a := \bullet E$



9. $S = a := \bullet E$

- Notar que, na produção marcada 9, a marca precede E, que é um não-terminal.
- Isso exige que se expanda E
ver adiante esta operação, descrita no item **2. Não-terminal E**.
- O diagrama associado a este item tem início no estado 10.
- Por essa razão, no estado 9 do diagrama está indicado um desvio para o estado 10, caso o símbolo de *look-ahead* E **não** for encontrado.
- No lugar de deliberar por exclusão, é possível usar outra forma, mais rigorosa e que dá resultados mais precisos, de tomar essa decisão: fazer look-ahead dos símbolos que constituem o conjunto **First** $(E) = \{ a, n, (\}$.

1. $S = a := E \bullet$



2. NÃO-TERMINAL E

$$E = E + T \mid T$$

2. $E = \bullet E + T \mid \bullet T$

2.a. $E = E + T$

Itens LR(1) associados:

10. $E = \bullet E + T$

11. $E = E \bullet + T$

12. $E = E + \bullet T$

2.a. $E = E + T \bullet$

2.b. $E = T$

Itens LR(1) associados:

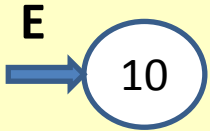
10. $E = \bullet T$

2.b. $E = T \bullet$

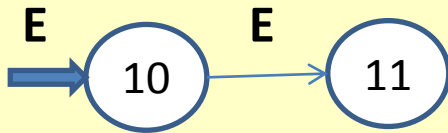
2.a. PRIMEIRA OPÇÃO:

$$E = E + T$$

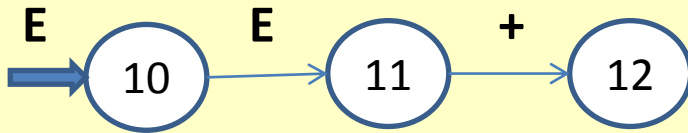
10. $E = \bullet E + T$



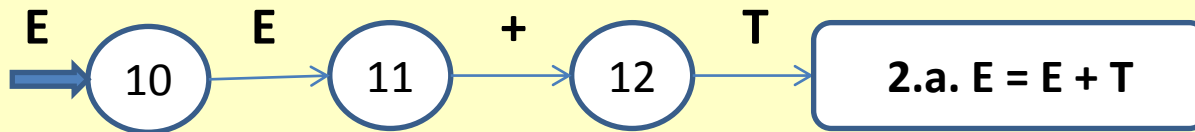
11. $E = E \bullet + T$



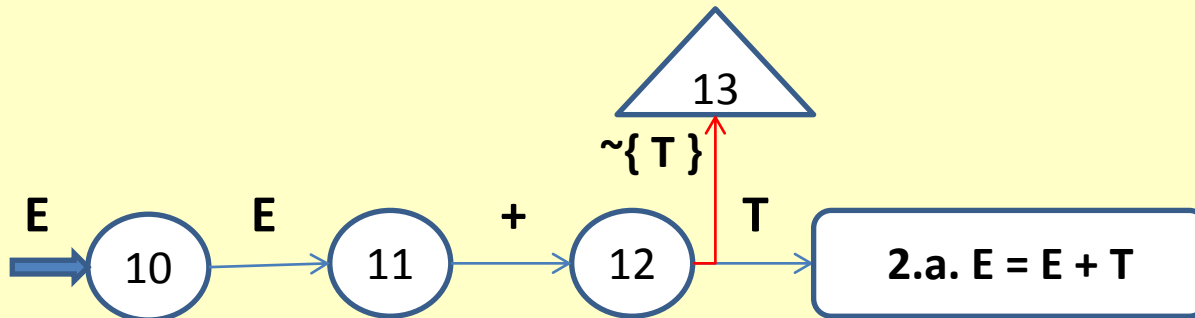
12. $E = E + \bullet T$



2.a. $E = E + T$ ●



2.a. $E = E + T \bullet$



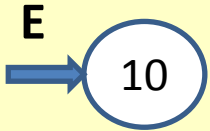
Incluiu-se no diagrama acima (em vermelho) um desvio no estado 12, para o estado 13, em função do resultado de operação de look-ahead do conjunto de símbolos que podem surgir a partir de T, e dos terminais que podem iniciar uma construção sintática aderente à regra associada ao não-terminal T.

O estado 13 é onde se inicia o diagrama que representa essa situação. No estado 10 a presença de E à direita exigiria a expansão do não-terminal, mas como é exatamente este o papel do estado 10, não há necessidade de inserir um desvio explícito para o estado 10.

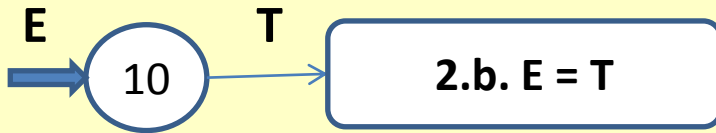
2.b – SEGUNDA OPÇÃO:

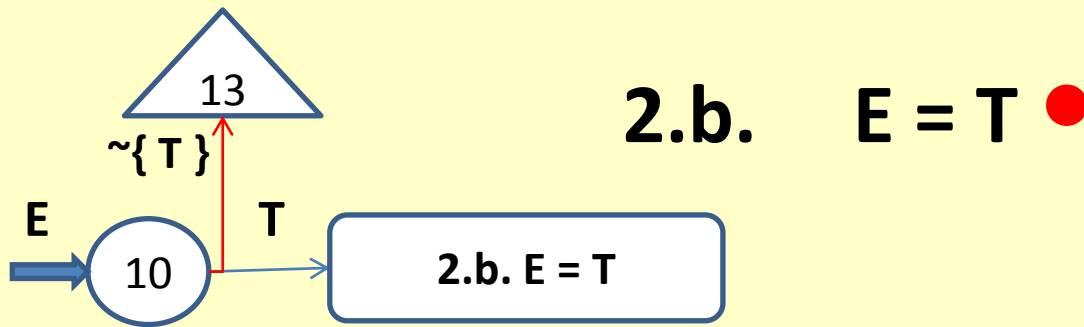
$$E = T$$

10. $E = \bullet T$



2.b. $E = T \bullet$



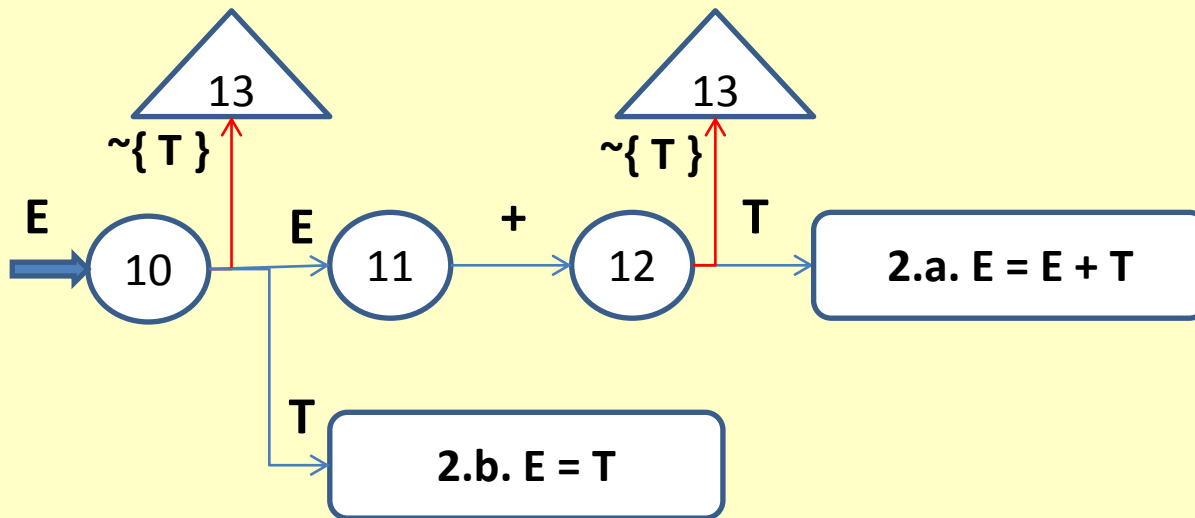


Incluiu-se aqui no diagrama acima um desvio no estado 10, para o estado 13, em função do resultado de operação de *look-ahead* do conjunto de símbolos que podem surgir a partir de T, e dos terminais que podem iniciar uma construção sintática aderente à regra associada ao não-terminal T.

O estado 13 é onde se inicia o diagrama que representa essa situação. No estado 10 a presença de T à direita exige a expansão do não-terminal, o que está representado pelo desvio explícito para o estado 13, em vermelho.

JUNTANDO AS REGRAS EM E:
 $E = E + T \mid T$

$$E = E + T \mid T$$



3. NÃO-TERMINAL T

$$T = F * T \mid F$$

3. $T = \bullet F * T \mid \bullet F$

3.a. $T = F * T$

Itens LR(1) associados:

13. $T = \bullet F * T$

14. $T = F \bullet * T$

15. $T = F * \bullet T$

3.a. $T = F * T \bullet$

3.b. $T = F$

Itens LR(1) associados:

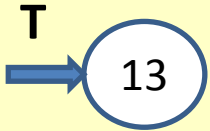
13. $T = \bullet F$

3.b. $T = F \bullet$

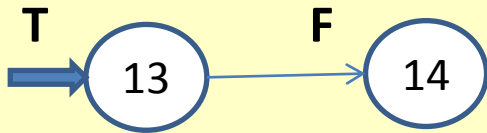
PRIMEIRA OPÇÃO:

3.a. $T = F * T$

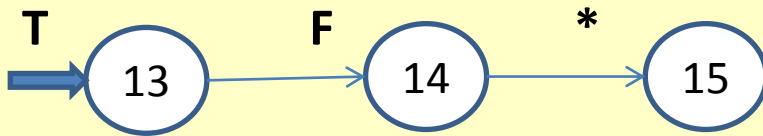
13. $T = \bullet F * T$



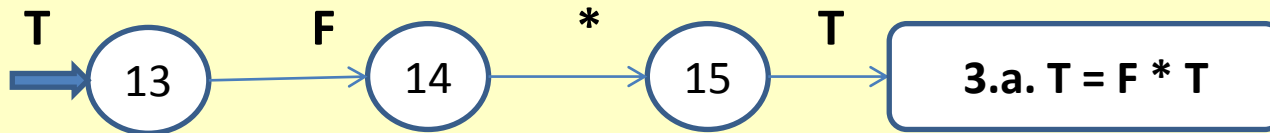
14. $T = F \bullet * T$

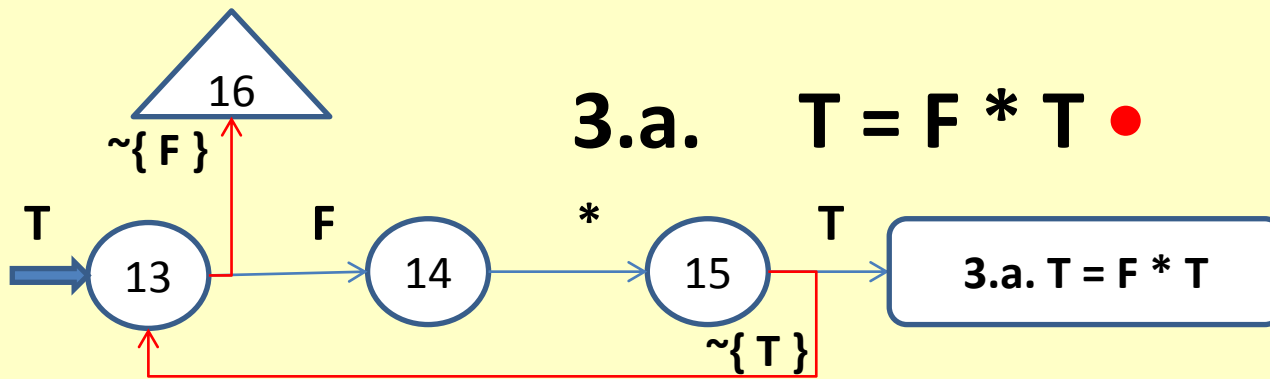


15. $T = F * \bullet T$



3.a. $T = F * T \bullet$





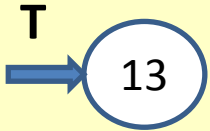
Incluíram-se no diagrama acima um desvio no estado 13, para o estado 16, em função do resultado de operação de look-ahead do conjunto de símbolos que podem surgir a partir de F, e dos terminais que podem iniciar uma construção sintática aderente à regra associada ao não-terminal F. O estado 16 é onde se inicia o diagrama que representa essa situação.

No estado 15, a presença de T à direita exigiria a expansão do não-terminal, porém isso não é feito porque o diagrama em construção refere-se exatamente ao tratamento do não-terminal T. Por isso, acrescentou-se apenas um desvio do estado 15 para o estado 13, em função do look-ahead de símbolos diferentes de T. Trata-se de uma instância de aplicação do Lema de Arden, dado que se trata da eliminação de uma recursão à direita do não-terminal T.

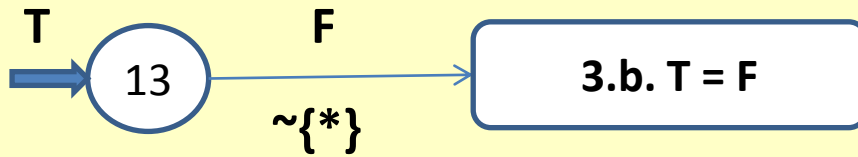
SEGUNDA OPÇÃO:

3.b. $T = F$

13. $T = \bullet F$



3.b. $T = F \bullet$

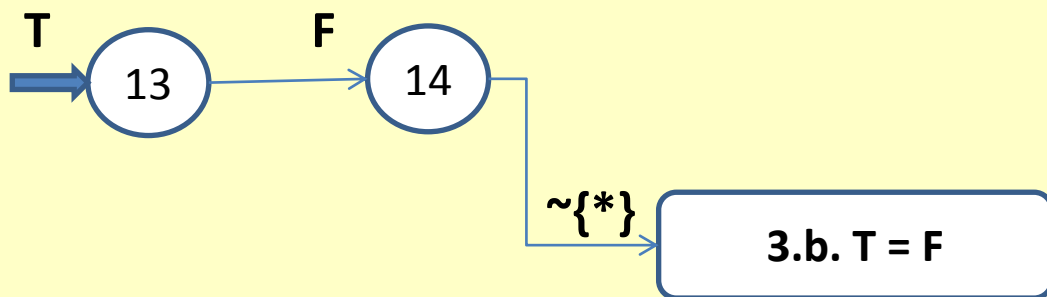


Redesenhando:

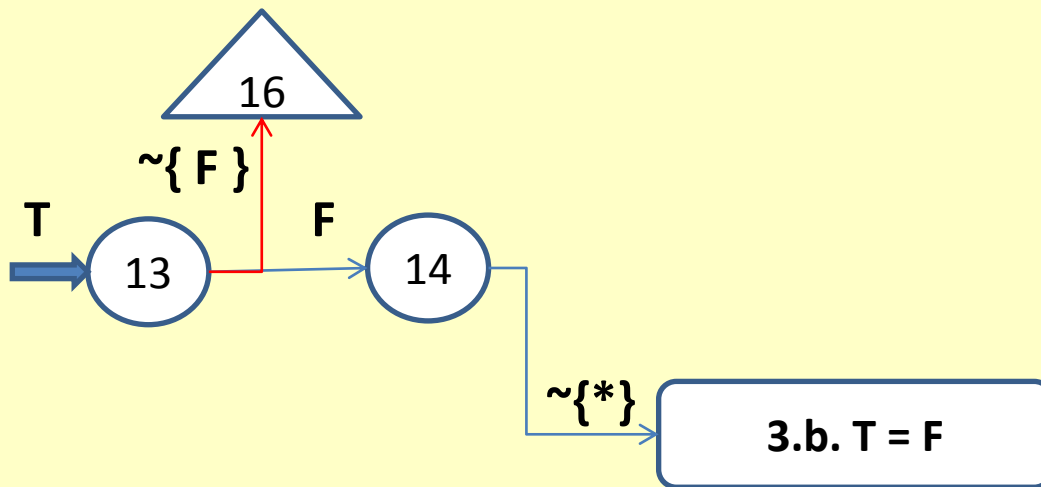
Notar que, devido à existência da opção 3.a. esta decisão não pode ser feita diretamente, razão pela qual é preciso efetuá-la por exclusão, descartando a possibilidade de prosseguir a análise em 3.a. após encontrar um F.

Isso se conclui em vista do não-determinismo que se instala entre as opções 3.a. e 3.b., a qual se manifesta quando o símbolo seguinte ao F na forma sentencial não for um asterisco.

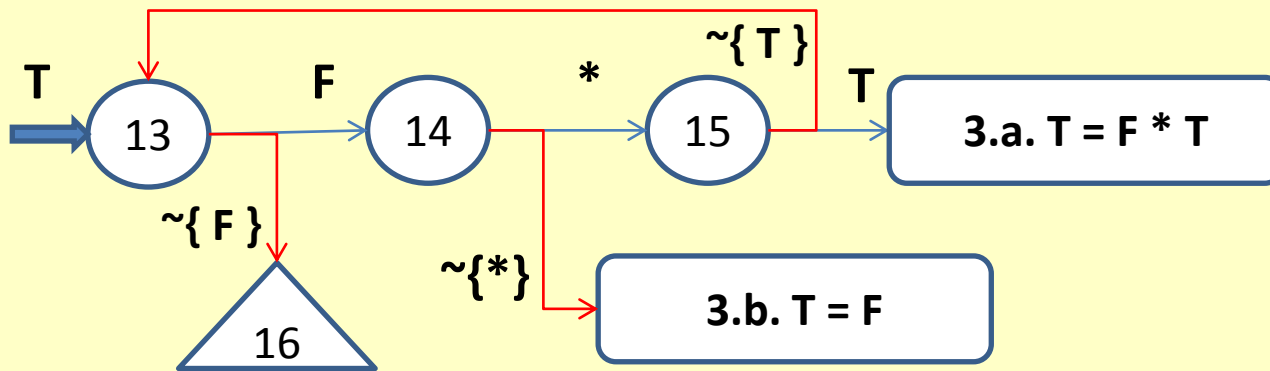
Este teste consiste em uma operação de look-ahead do símbolo asterisco. Para ficar compatível com o autômato associado à produção gramatical 3.a., o diagrama anterior pode ser redesenhado conforme abaixo:



Adicionalmente, acrescentou-se no estado 13 um desvio para o estado 16 em função de uma não ocorrência do look-ahead do não-terminal F. O estado 16 é o estado inicial do diagrama associado à análise completa do não-terminal F e de seus desdobramentos.



JUNTANDO AS REGRAS EM T :
 $T = F * T \mid F$



4. NÃO-TERMINAL F:
 $F = a \mid n \mid (E) \mid a (Q)$

4. $F = a \mid n \mid (E) \mid a (Q)$

$F = \bullet a$

Itens LR(1) associados:

16. $F = \bullet a$

4.a. $F = a \bullet$

$F = \bullet n$

Itens LR(1) associados:

16. $F = \bullet n$

4.b. $F = n \bullet$

$F = \bullet (E)$

Itens LR(1) associados:

16. $F = \bullet (E)$

17. $F = (\bullet E)$

18. $F = (E \bullet)$

4.c. $F = (E) \bullet$

$F = \bullet a (Q)$

Itens LR(1) associados:

16. $F = \bullet a (Q)$

19. $F = a \bullet (Q)$

20. $F = a (\bullet Q)$

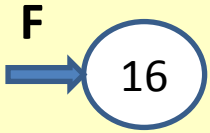
21. $F = a (Q \bullet)$

4.d. $F = a (Q) \bullet$

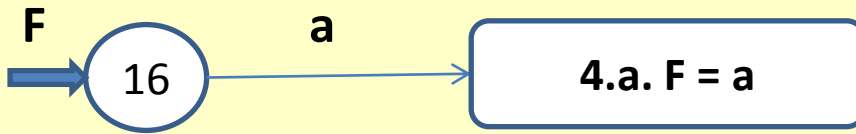
4.a. PRIMEIRA OPÇÃO

F = a

$$F = \bullet a$$



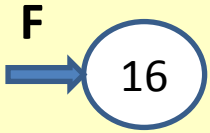
$$F = a \bullet$$



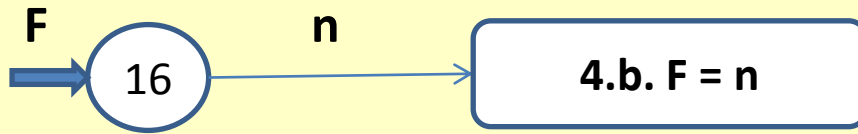
4.b. SEGUNDA OPÇÃO

$$F = n$$

$$F = \bullet n$$



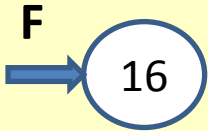
$$F = n \bullet$$



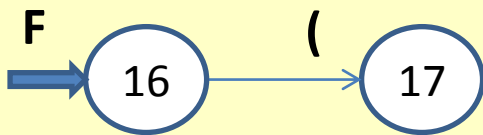
4.c. TERCEIRA OPÇÃO

F = (E)

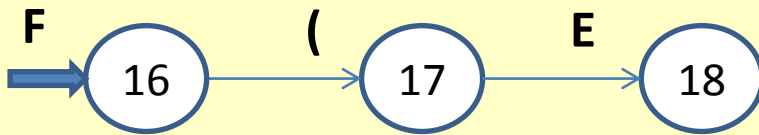
$$16. \quad F = \bullet (E)$$



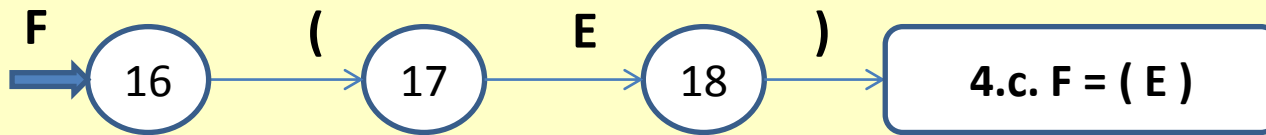
17. $F = (\bullet E)$



18. $F = (E \bullet)$



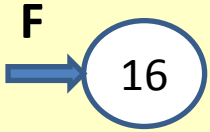
4.c. $F = (E) \bullet$



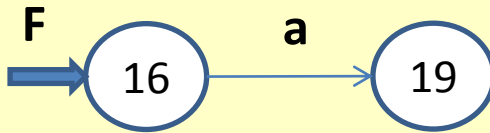
4.d. QUARTA OPÇÃO

$$F = a (Q)$$

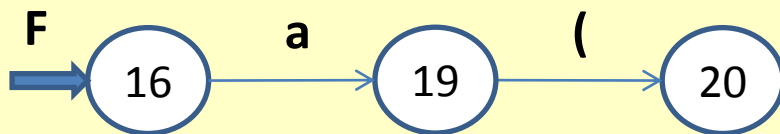
$$16. \quad F = \bullet a (Q)$$



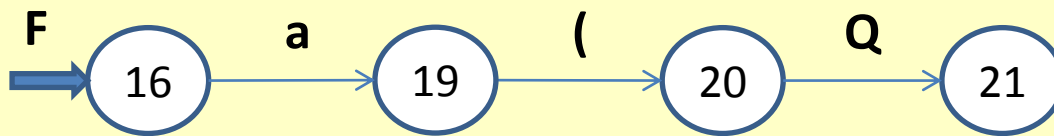
19. $F = a \bullet (Q)$



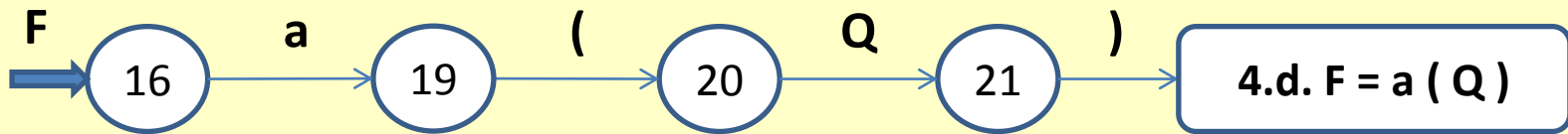
20. $F = a (\bullet Q)$



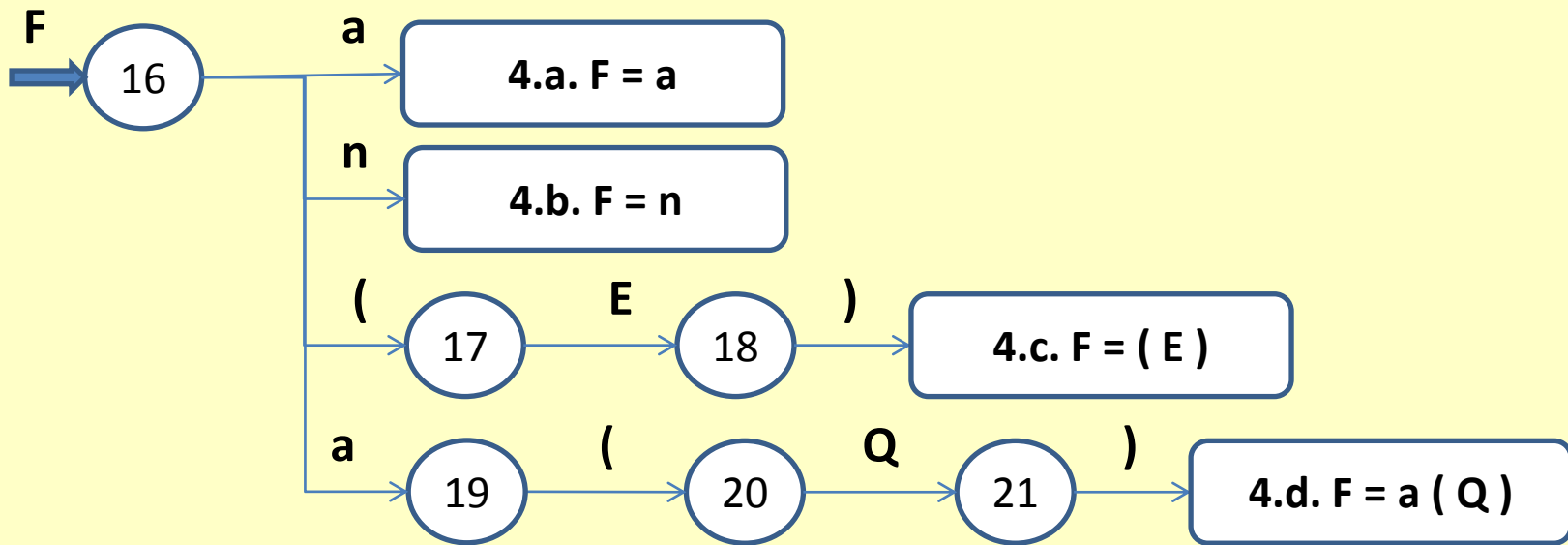
21. $F = a (Q \bullet)$



4.d. $F = a (Q) \bullet$

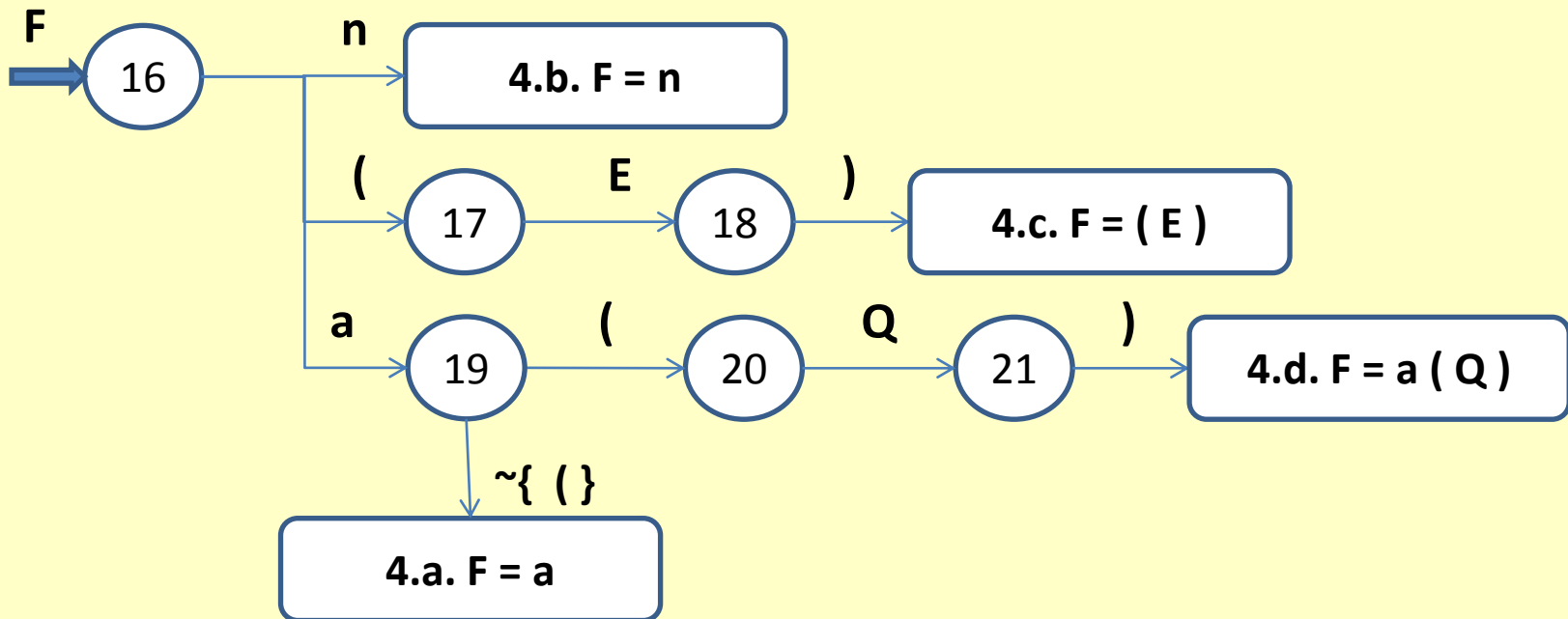


JUNTANDO AS OPÇÕES EM F:
 $F = a \mid n \mid (E) \mid a (Q)$



Observando-se o diagrama acima, é fácil notar o não-determinismo decorrente do prefixo comum **a** existente entre as regras 4.a. e 4.d. Esse não-determinismo pode ser facilmente removido no estado 19, usando-se o look-ahead de um símbolo abre-parênteses, e permitindo que a análise prossiga se o símbolo seguinte for um abre-parênteses, e considerando encerrada a regra 4.a. em caso contrário.

Redesenhando



5. NÃO-TERMINAL Q

$$Q = \bullet P \mid \bullet \varepsilon$$

$$Q = \bullet P$$

Itens LR(1) associados:

22. $Q = \bullet P$

5.a. $Q = P \bullet$

$$Q = \bullet \varepsilon$$

Itens LR(1) associados:

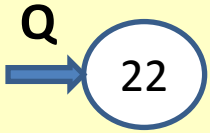
22. $Q = \bullet \varepsilon$

5.b. $Q = \varepsilon \bullet$

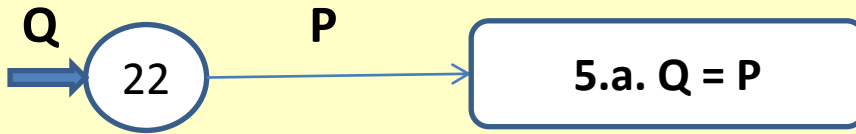
5a. PRIMEIRA OPÇÃO

$Q = P$

$$Q = \bullet P$$

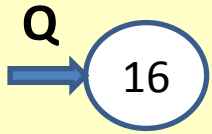


$$Q = P \bullet$$

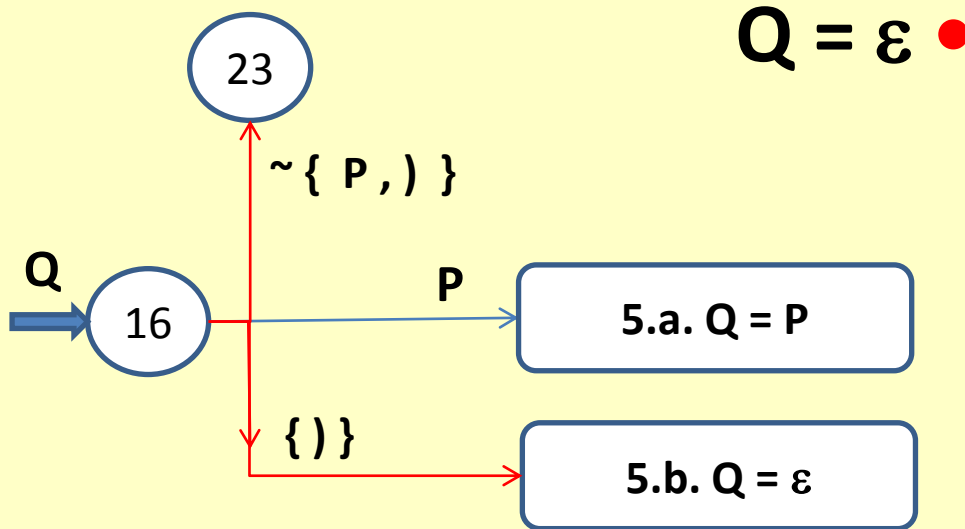


5b. SEGUNDA OPÇÃO

$$Q = \varepsilon$$



$$Q = \bullet \varepsilon$$



A regra 5.b., que interpreta como vazio o não-terminal Q , se aplica nesta situação se o símbolo em análise no estado 16 pertencer ao conjunto $\text{Follow}(Q) = \{) \}$. Portanto, decide-se pela aplicação da regra 5.b. quando o símbolo em análise for um fecha-parênteses. Caso tal símbolo não seja P nem $)$, desvia-se para o estado 23, no qual se inicia a análise do não terminal P .

6. NÃO-TERMINAL P

$$P = \bullet E, P \mid \bullet E$$

$$P = \bullet E, P$$

Itens LR(1) associados:

$$23. \quad P = \bullet E, P$$

$$24. \quad P = E \bullet, P$$

$$25. \quad P = E, \bullet P$$

$$6.a. \quad P = E, P \bullet$$

$$P = \bullet E$$

Itens LR(1) associados:

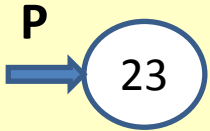
$$23. \quad P = \bullet E$$

$$6.b. \quad P = E \bullet$$

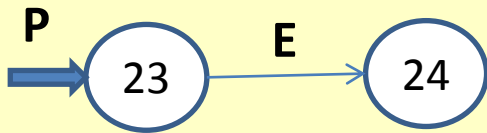
PRIMEIRA OPÇÃO:

6.a. $P = E, P$

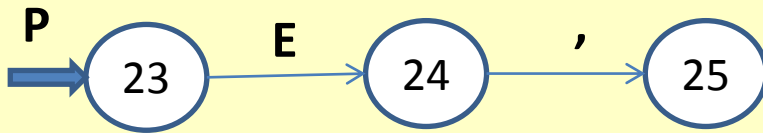
$$P = \bullet E, P$$



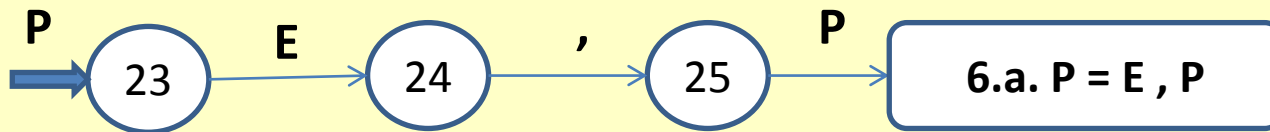
$$P = E \bullet , P$$



$$P = E, \bullet P$$



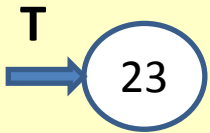
$P = E, P \bullet$



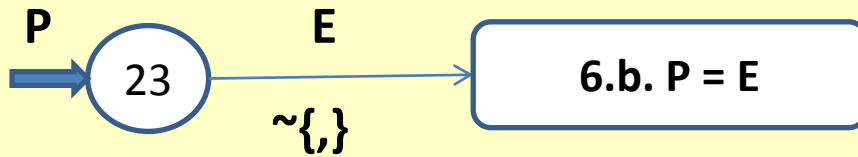
SEGUNDA OPÇÃO:

3.b. $P = E$

$$P = \bullet E$$



$$P = E \bullet$$



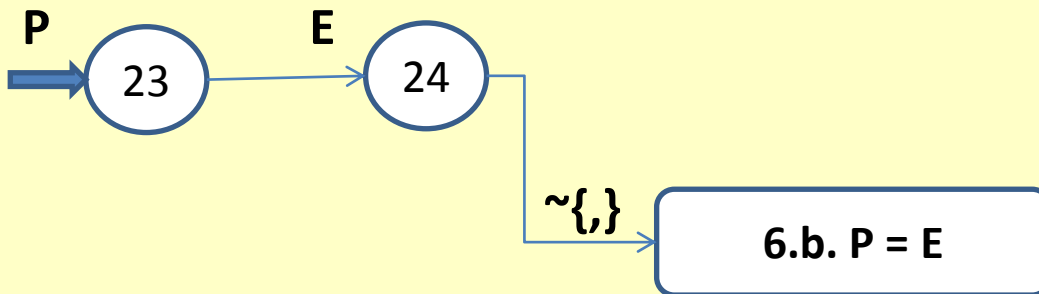
Redesenhando:

Este raciocínio é idêntico ao anteriormente realizado para o não terminal T. Devido à existência da opção 6.a. esta decisão não pode ser feita diretamente, razão pela qual é preciso efetuá-la por exclusão, ao descartar a possibilidade de prosseguir em 6.a. após encontrar um E.

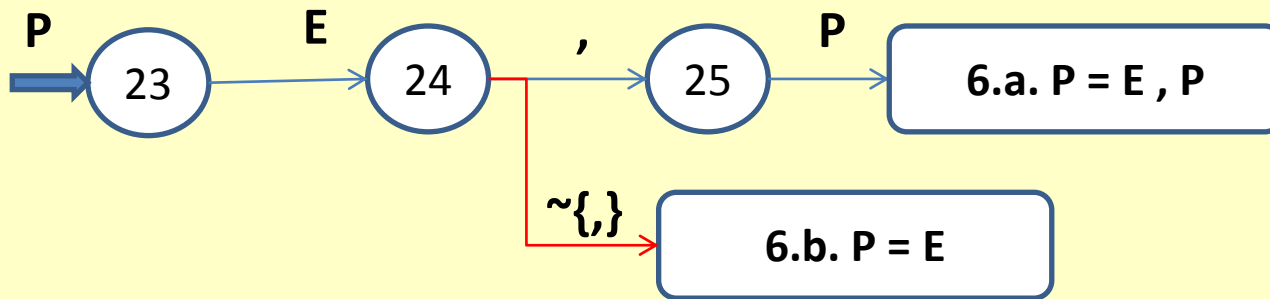
Isso se conclui em vista do não-determinismo que se instala entre as opções 6.a. e 6.b., e se manifesta quando o símbolo seguinte ao E na forma sentencial não for uma vírgula.

Este teste consiste em uma operação de look-ahead.

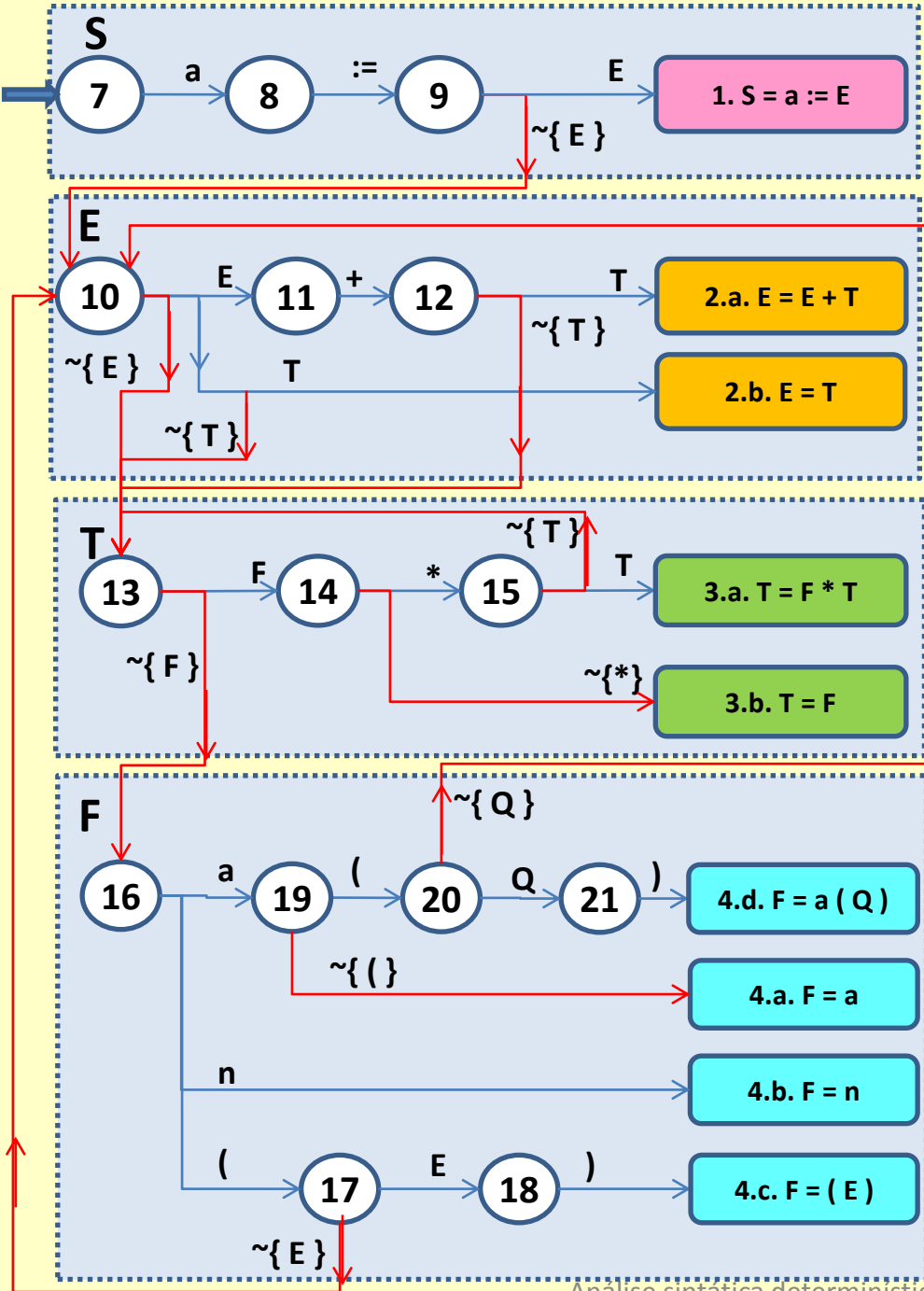
Para ficar compatível com o da opção 6.a., o diagrama anterior pode ser redesenhado conforme abaixo:



JUNTANDO AS OPÇÕES EM P:



**JUNTANDO TODOS OS DIAGRAMAS
PARCIAIS, OBTÉM-SE, FINALMENTE:**



1. S = a := E
2. E = E + T | T
3. T = F * T | F
4. F = a | n | (E) | a (Q)
5. Q = P | ε
6. P = E , P | E

