

# Autómatas y Lenguajes Formales 2016-1

## Maestría en Ciencia e Ingeniería de la Computación UNAM

### Tema 11: Autómatas de pila

Dr. Favio Ezequiel Miranda Perea  
favio@ciencias.unam.mx

Facultad de Ciencias UNAM<sup>1</sup>

29 de enero de 2020

---

<sup>1</sup>Con el apoyo del proyecto PAPIME PE102117



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Una generalización de los autómatas finitos puede realizarse de diversos modos.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Una generalización de los autómatas finitos puede realizarse de diversos modos.
- Permitir que el autómata lea la entrada un número arbitrario de veces, lo cual requiere que la cabeza de lectura se mueva (máquinas bidireccionales con el mismo poder que AF).



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Una generalización de los autómatas finitos puede realizarse de diversos modos.
- Permitir que el autómata lea la entrada un número arbitrario de veces, lo cual requiere que la cabeza de lectura se mueva (máquinas bidireccionales con el mismo poder que AF).
- Añadir un dispositivo de conteo (máquinas contadoras)



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Una generalización de los autómatas finitos puede realizarse de diversos modos.
- Permitir que el autómata lea la entrada un número arbitrario de veces, lo cual requiere que la cabeza de lectura se mueva (máquinas bidireccionales con el mismo poder que AF).
- Añadir un dispositivo de conteo (máquinas contadoras)
- Añadir dispositivos de salida (traductores, Mealy y Moore)



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Una generalización de los autómatas finitos puede realizarse de diversos modos.
- Permitir que el autómata lea la entrada un número arbitrario de veces, lo cual requiere que la cabeza de lectura se mueva (máquinas bidireccionales con el mismo poder que AF).
- Añadir un dispositivo de conteo (máquinas contadoras)
- Añadir dispositivos de salida (traductores, Mealy y Moore)
- Agregar un dispositivo de memoria, por ejemplo mediante una pila.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.
  - ▶ El símbolo en el tope de la pila.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.
  - ▶ El símbolo en el tope de la pila.
- El funcionamiento de la unidad de control puede ser:



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.
  - ▶ El símbolo en el tope de la pila.
- El funcionamiento de la unidad de control puede ser:
  - ▶ Avance de la cabeza de lectura.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.
  - ▶ El símbolo en el tope de la pila.
- El funcionamiento de la unidad de control puede ser:
  - ▶ Avance de la cabeza de lectura.
  - ▶ Cambio de estado de la máquina.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.
  - ▶ El símbolo en el tope de la pila.
- El funcionamiento de la unidad de control puede ser:
  - ▶ Avance de la cabeza de lectura.
  - ▶ Cambio de estado de la máquina.
  - ▶ Sustitución del símbolo en el tope de la pila por una secuencia de símbolos.



# Introducción

## Autómatas de Pila

- Los autómatas de pila son una generalización de los AF.
- Los parámetros de un AP son:
  - ▶ El estado actual.
  - ▶ El símbolo actual de entrada.
  - ▶ El símbolo en el tope de la pila.
- El funcionamiento de la unidad de control puede ser:
  - ▶ Avance de la cabeza de lectura.
  - ▶ Cambio de estado de la máquina.
  - ▶ Sustitución del símbolo en el tope de la pila por una secuencia de símbolos.
- La diferencia entre determinismo y no-determinismo es importante.



# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.



# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.
- $\Sigma$  es el alfabeto de entrada.



# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.
- $\Sigma$  es el alfabeto de entrada.
- $\Gamma$  es el alfabeto de la pila.

# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.
- $\Sigma$  es el alfabeto de entrada.
- $\Gamma$  es el alfabeto de la pila.
- $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma^*)$  es la función de transición



# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.
- $\Sigma$  es el alfabeto de entrada.
- $\Gamma$  es el alfabeto de la pila.
- $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma^*)$  es la función de transición
- $q_0 \in Q$  es el estado inicial.

# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.
- $\Sigma$  es el alfabeto de entrada.
- $\Gamma$  es el alfabeto de la pila.
- $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma^*)$  es la función de transición
- $q_0 \in Q$  es el estado inicial.
- $Z_0 \in \Gamma$  es el símbolo inicial de la pila.



# Autómatas de pila

## Definición

Un autómata de pila (**no determinista**) es una septupla:

$$M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$$

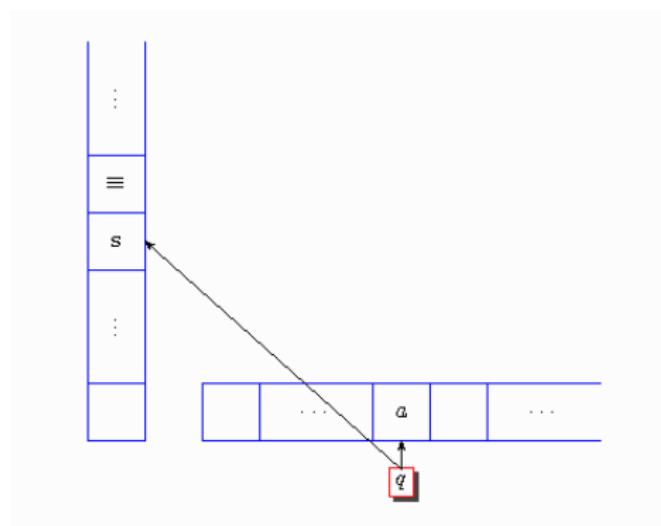
- $Q \neq \emptyset$  es un conjunto finito de estados.
- $\Sigma$  es el alfabeto de entrada.
- $\Gamma$  es el alfabeto de la pila.
- $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma^*)$  es la función de transición
- $q_0 \in Q$  es el estado inicial.
- $Z_0 \in \Gamma$  es el símbolo inicial de la pila.
- $F \subseteq Q$  es el conjunto de estados finales.



# Función de transición

Autómatas de pila

$$\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma^*)$$
$$\delta(q, a, s)$$



# Función de transición

## Autómatas de pila

$$(p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

- Estando en el estado  $q$  leyendo  $a$  con  $s$  en el tope de la pila se hace lo siguiente:



# Función de transición

## Autómatas de pila

$$(p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

- Estando en el estado  $q$  leyendo  $a$  con  $s$  en el tope de la pila se hace lo siguiente:
  - ▶ Consumir  $a$ .



# Función de transición

## Autómatas de pila

$$(p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

- Estando en el estado  $q$  leyendo  $a$  con  $s$  en el tope de la pila se hace lo siguiente:
  - ▶ Consumir  $a$ .
  - ▶ Eliminar  $s$  (POP  $s$ ).



# Función de transición

## Autómatas de pila

$$(p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

- Estando en el estado  $q$  leyendo  $a$  con  $s$  en el tope de la pila se hace lo siguiente:
  - ▶ Consumir  $a$ .
  - ▶ Eliminar  $s$  (POP  $s$ ).
  - ▶ Escribir  $\gamma$  en el tope de la pila (PUSH  $\gamma$ ).



# Función de transición

## Autómatas de pila

$$(p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

- Estando en el estado  $q$  leyendo  $a$  con  $s$  en el tope de la pila se hace lo siguiente:
  - ▶ Consumir  $a$ .
  - ▶ Eliminar  $s$  (POP  $s$ ).
  - ▶ Escribir  $\gamma$  en el tope de la pila (PUSH  $\gamma$ ).
  - ▶ Cambiar al estado  $p$ .



# Función de transición

## Autómatas de pila

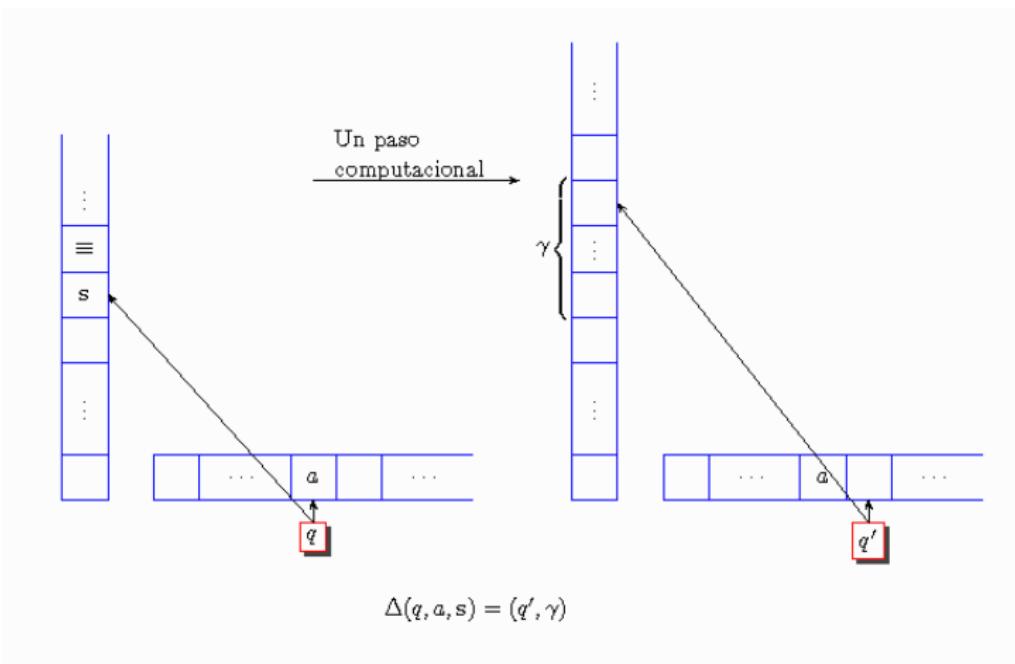
$$(p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

- Estando en el estado  $q$  leyendo  $a$  con  $s$  en el tope de la pila se hace lo siguiente:
  - ▶ Consumir  $a$ .
  - ▶ Eliminar  $s$  (POP  $s$ ).
  - ▶ Escribir  $\gamma$  en el tope de la pila (PUSH  $\gamma$ ).
  - ▶ Cambiar al estado  $p$ .
- Es posible consumir, leer o escribir  $\varepsilon$ .



# Función de transición

## Autómatas de pila



# Transiciones especiales

## Autómatas de pila

- $(q', s) \in \delta(q, a, s)$ . En este caso el contenido de la pila no se altera.



# Transiciones especiales

## Autómatas de pila

- $(q', s) \in \delta(q, a, s)$ . En este caso el contenido de la pila no se altera.
- $(q', \varepsilon) \in \delta(q, a, s)$ . El símbolo  $s$  se borra y el control del autómata lee el nuevo tope de la pila, es decir, el símbolo colocado inmediatamente abajo de  $s$ .



# Transiciones especiales

## Autómatas de pila

- $(q', s) \in \delta(q, a, s)$ . En este caso el contenido de la pila no se altera.
- $(q', \varepsilon) \in \delta(q, a, s)$ . El símbolo  $s$  se borra y el control del autómata lee el nuevo tope de la pila, es decir, el símbolo colocado inmediatamente abajo de  $s$ .
- $(q', \gamma) \in \delta(q, \varepsilon, s)$ . Esta es una  $\varepsilon$ -transición, el símbolo de entrada no se procesa ni se mueve el control, pero el tope de la pila  $s$  se reemplaza por  $\gamma$ .



# Configuraciones

## Autómatas de pila

Una configuración o descripción instantánea es una terna

$$\langle q, au, s\beta \rangle$$

# Configuraciones

## Autómatas de pila

Una configuración o descripción instantánea es una terna

$$\langle q, au, s\beta \rangle$$

que representa lo siguiente:

- El autómata está en el estado  $q$ .



# Configuraciones

## Autómatas de pila

Una configuración o descripción instantánea es una terna

$$\langle q, au, s\beta \rangle$$

que representa lo siguiente:

- El autómata está en el estado  $q$ .
- $au$  es la parte aún no procesada de la cadena de entrada, siendo  $a$  el siguiente símbolo a leer.



# Configuraciones

## Autómatas de pila

Una configuración o descripción instantánea es una terna

$$\langle q, au, s\beta \rangle$$

que representa lo siguiente:

- El autómata está en el estado  $q$ .
- $au$  es la parte aún no procesada de la cadena de entrada, siendo  $a$  el siguiente símbolo a leer.
- $s\beta$  es el contenido total de la pila, siendo  $s$  el símbolo colocado en el tope.



# Tipos de configuración

## Configuraciones

- Configuración inicial:  $\langle q_0, w, Z_0 \rangle$  para cualquier  $w \in \Sigma^*$ .



# Tipos de configuración

## Configuraciones

- Configuración inicial:  $\langle q_0, w, Z_0 \rangle$  para cualquier  $w \in \Sigma^*$ .
- Configuración de aceptación:  $\langle q_f, \varepsilon, \beta \rangle$  con  $q_f \in F$ .



# Tipos de configuración

## Configuraciones

- Configuración inicial:  $\langle q_0, w, Z_0 \rangle$  para cualquier  $w \in \Sigma^*$ .
- Configuración de aceptación:  $\langle q_f, \varepsilon, \beta \rangle$  con  $q_f \in F$ .
- Configuración de aceptación por pila vacía:  $\langle q_f, \varepsilon, \varepsilon \rangle$ .



# Paso de computación

## Funcionamiento de un AP

La noción informal de cómputo se formaliza mediante una relación  $\vdash_M$  entre configuraciones, llamada **paso de computación**

# Paso de computación

## Funcionamiento de un AP

La noción informal de cómputo se formaliza mediante una relación  $\vdash_M$  entre configuraciones, llamada **paso de computación** tal que

$$\langle q, au, s\beta \rangle \vdash_M \langle p, u, \gamma\beta \rangle \text{ si y sólo si } (p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

# Paso de computación

## Funcionamiento de un AP

La noción informal de cómputo se formaliza mediante una relación  $\vdash_M$  entre configuraciones, llamada **paso de computación** tal que

$$\langle q, au, s\beta \rangle \vdash_M \langle p, u, \gamma\beta \rangle \text{ si y sólo si } (p, \gamma) \in \delta(q, a, s)$$

La relación  $\vdash^*$  se define de la manera usual.



# Lenguaje aceptado por estados finales

Autómatas de pila.

Con la noción de paso de computación se formaliza la noción de lenguaje aceptado por un autómata por estados finales, de manera análoga al caso de los AF:



# Lenguaje aceptado por estados finales

Autómatas de pila.

Con la noción de paso de computación se formaliza la noción de lenguaje aceptado por un autómata por estados finales, de manera análoga al caso de los AF:

$$L(M) = \{ w \in \Sigma^* \mid \langle q_0, w, Z_0 \rangle \vdash_M^* \langle q_f, \varepsilon, \beta \rangle \text{ y } q_f \in F \}$$



# Lenguaje aceptado por estados finales

Autómatas de pila.

Con la noción de paso de computación se formaliza la noción de lenguaje aceptado por un autómata por estados finales, de manera análoga al caso de los AF:

$$L(M) = \{ w \in \Sigma^* \mid \langle q_0, w, Z_0 \rangle \vdash_M^* \langle q_f, \varepsilon, \beta \rangle \text{ y } q_f \in F \}$$

Obsérvese que el contenido de la pila  $\beta$  es irrelevante.



# Lenguaje aceptado por pila vacía

Autómatas de pila.

El lenguaje aceptado por pila vacía se define como



# Lenguaje aceptado por pila vacía

Autómatas de pila.

El lenguaje aceptado por pila vacía se define como

$$V(M) = \{ w \in \Sigma^* \mid \langle q_0, w, Z_0 \rangle \vdash_M^* \langle p, \varepsilon, \varepsilon \rangle \}$$



# Lenguaje aceptado por pila vacía

Autómatas de pila.

El lenguaje aceptado por pila vacía se define como

$$V(M) = \{ w \in \Sigma^* \mid \langle q_0, w, Z_0 \rangle \vdash_M^* \langle p, \varepsilon, \varepsilon \rangle \}$$

Obsérvese que el estado  $p$  es irrelevante.

# Lenguaje aceptado por pila vacía

Autómatas de pila.

El lenguaje aceptado por pila vacía se define como

$$V(M) = \{ w \in \Sigma^* \mid \langle q_0, w, Z_0 \rangle \vdash_M^* \langle p, \varepsilon, \varepsilon \rangle \}$$

Obsérvese que el estado  $p$  es irrelevante.

Los dos tipos de aceptación son equivalentes como veremos enseguida.

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1, q_2\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \{q_2\} \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\}$     $\delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1, q_2\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \{q_2\} \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1, q_2\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \{q_2\} \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1, q_2\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \{q_2\} \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, \varepsilon)\}$
- La aceptación es por estados finales.



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- La aceptación es por pila vacía.



$$L = \{a^i b^j \mid i \geq j \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$



$$L = \{a^i b^j \mid i \geq j \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^j \mid i \geq j \geq 0\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^j \mid i \geq j \geq 0\}$$

## Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{a^i b^j \mid i \geq j \geq 0\}$$

## Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b\}, \{X, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- La aceptación es por pila vacía.



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\}$     $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\} \quad \delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA)\} \quad \delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA)\}$



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

## Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\} \quad \delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA)\} \quad \delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB)\} \quad \delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB)\}$



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\} \quad \delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA)\} \quad \delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB)\} \quad \delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB)\}$
  
- $\delta(q_0, c, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\} \quad \delta(q_0, c, A) = \{(q_1, A)\}$



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

## Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\} \quad \delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA)\} \quad \delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB)\} \quad \delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB)\}$
  
- $\delta(q_0, c, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\} \quad \delta(q_0, c, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, c, B) = \{(q_1, B)\} \quad \delta(q_1, a, A) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

## Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\} \quad \delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA)\} \quad \delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB)\} \quad \delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB)\}$
  
- $\delta(q_0, c, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\} \quad \delta(q_0, c, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, c, B) = \{(q_1, B)\} \quad \delta(q_1, a, A) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, B) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{ w c w^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$$

## Ejemplos

$$M = \langle \{q_0, q_1\}, \{a, b, c\}, \{A, B, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \emptyset \rangle$$

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0)\} \quad \delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA)\} \quad \delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB)\} \quad \delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB)\}$
  
- $\delta(q_0, c, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\} \quad \delta(q_0, c, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, c, B) = \{(q_1, B)\} \quad \delta(q_1, a, A) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, B) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
  
- La aceptación es por pila vacía.



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA), (q_1, A)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB), (q_1, B)\}$

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB), (q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA), (q_1, A)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB), (q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA), (q_1, A)\})$
- $\delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB), (q_1, B)\}$

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB), (q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB), (q_1, B)\}$
- $\delta(q_1, a, A) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$$

## Ejemplos

- $\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, AZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, b, Z_0) = \{(q_0, BZ_0), (q_1, Z_0)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, Z_0)\}$     $\delta(q_0, \varepsilon, A) = \{(q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, \varepsilon, B) = \{(q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, a, A) = \{(q_0, AA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, a, B) = \{(q_0, AB), (q_1, B)\}$
- $\delta(q_0, b, A) = \{(q_0, BA), (q_1, A)\}$
- $\delta(q_0, b, B) = \{(q_0, BB), (q_1, B)\}$
- $\delta(q_1, a, A) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, B) = \{(q_1, \varepsilon)\}$     $\delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$

# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Dado un lenguaje  $L$  tal que  $L = L(M)$  para algún autómata de pila  $M$ , existe un autómata de pila  $M'$  tal que  $L = V(M')$ . Es decir, todo lenguaje aceptado por estados finales es aceptado por pila vacía.



# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial.



# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.

# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:



# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:
  - ▶  $\delta(p_0, \varepsilon, N_0) = \{(q_0, Z_0 N_0)\}$



# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:
  - ▶  $\delta(p_0, \varepsilon, N_0) = \{(q_0, Z_0 N_0)\}$
  - ▶  $(p, s) \in \delta(q_f, \varepsilon, s)$ , para todo  $q_f \in F$ ,  $s \in \Gamma \cup \{N_0\}$



# De estados finales a pila vacía

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, F \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:
  - ▶  $\delta(p_0, \varepsilon, N_0) = \{(q_0, Z_0 N_0)\}$
  - ▶  $(p, s) \in \delta(q_f, \varepsilon, s)$ , para todo  $q_f \in F$ ,  $s \in \Gamma \cup \{N_0\}$
  - ▶  $\delta(p, \varepsilon, s) = \{(p, \varepsilon)\}$



# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Dado un lenguaje  $L$  tal que  $L = V(M)$  para un autómata de pila  $M$ , existe un autómata de pila  $M'$  tal que  $L = L(M')$ . Es decir, todo lenguaje aceptado por pila vacía es aceptado por estados finales.



# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, \{p_f\} \rangle$$

# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, \{p_f\} \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p_f$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial y  $p_f$  el único estado final.



# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, \{p_f\} \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p_f$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial y  $p_f$  el único estado final.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.



# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, \{p_f\} \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p_f$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial y  $p_f$  el único estado final.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:



# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, \{p_f\} \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p_f$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial y  $p_f$  el único estado final.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:
  - ▶  $\delta(p_0, \varepsilon, N_0) = \{(q_0, Z_0 N_0)\}$



# De pila vacía a estados finales

## Equivalencia de la aceptación

Si  $M = \langle Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F \rangle$  entonces definimos a  $M'$  como

$$M' = \langle Q \cup \{p_0, p_f\}, \Sigma, \Gamma \cup \{N_0\}, \delta, p_0, N_0, \{p_f\} \rangle$$

- Se agregan dos estados,  $p_0, p_f$  siendo  $p_0$  el nuevo estado inicial y  $p_f$  el único estado final.
- Se agrega un símbolo  $N_0$  a  $\Gamma$ , el cual será el nuevo símbolo inicial de la pila.
- La función de transición conserva todas las transiciones de  $M$  y se agregan:

- ▶  $\delta(p_0, \varepsilon, N_0) = \{(q_0, Z_0 N_0)\}$
- ▶  $(p_f, s) \in \delta(q, \varepsilon, N_0)$ , para todo  $q \in Q$ .



# Autómatas de Pila Deterministas

## Definición

$$\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma^*$$



# Autómatas de Pila Deterministas

## Definición

$$\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma^*$$

- Hay a lo más una transición en un estado y símbolo dados, es decir,  $\delta(q, a, s) = (p, \gamma)$  para  $p, \gamma$  únicos o bien  $\delta(q, a, s)$  no está definida, es decir,  $\delta$  es una función parcial.



# Autómatas de Pila Deterministas

## Definición

$$\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma^*$$

- Hay a lo más una transición en un estado y símbolo dados, es decir,  $\delta(q, a, s) = (p, \gamma)$  para  $p, \gamma$  únicos o bien  $\delta(q, a, s)$  no está definida, es decir,  $\delta$  es una función parcial.
- Como se permiten  $\varepsilon$ -transiciones necesitamos la siguiente convención para mantener el determinismo:



# Autómatas de Pila Deterministas

## Definición

$$\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma^*$$

- Hay a lo más una transición en un estado y símbolo dados, es decir,  $\delta(q, a, s) = (p, \gamma)$  para  $p, \gamma$  únicos o bien  $\delta(q, a, s)$  no está definida, es decir,  $\delta$  es una función parcial.
- Como se permiten  $\varepsilon$ -transiciones necesitamos la siguiente convención para mantener el determinismo:
- Si  $\delta(q, a, s)$  está definida entonces  $\delta(q, \varepsilon, s)$  está indefinida y viceversa. Es decir, ambas transiciones no pueden estar definidas al mismo tiempo.



# Determinismo vs. No-determinismo

## Autómatas de pila

- Obviamente un AP determinista es un caso particular de un AP no-determinista.



# Determinismo vs. No-determinismo

## Autómatas de pila

- Obviamente un AP determinista es un caso particular de un AP no-determinista.
- A diferencia de los autómatas finitos, en el caso de los autómatas de pila no hay equivalencia entre los autómatas deterministas y los no-deterministas.



# Determinismo vs. No-determinismo

## Autómatas de pila

- Obviamente un AP determinista es un caso particular de un AP no-determinista.
- A diferencia de los autómatas finitos, en el caso de los autómatas de pila no hay equivalencia entre los autómatas deterministas y los no-deterministas.
- Existen lenguajes que sólo pueden ser reconocidos mediante una AP no-determinista.



# Determinismo vs. No-determinismo

## Autómatas de pila

- Obviamente un AP determinista es un caso particular de un AP no-determinista.
- A diferencia de los autómatas finitos, en el caso de los autómatas de pila no hay equivalencia entre los autómatas deterministas y los no-deterministas.
- Existen lenguajes que sólo pueden ser reconocidos mediante una AP no-determinista.
- Por ejemplo  $L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$



# Determinismo vs. No-determinismo

## Autómatas de pila

- Obviamente un AP determinista es un caso particular de un AP no-determinista.
- A diferencia de los autómatas finitos, en el caso de los autómatas de pila no hay equivalencia entre los autómatas deterministas y los no-deterministas.
- Existen lenguajes que sólo pueden ser reconocidos mediante una AP no-determinista.
- Por ejemplo  $L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w = w^R\}$
- Esto implica que hay lenguajes libres de contexto que no pueden ser reconocidos por un AP determinista.



# AP y lenguajes libres de contexto

## Autómatas de pila

### Teorema

*Un lenguaje es libre de contexto si y sólo si es aceptado por un autómata de pila (no-determinista).*



# AP y lenguajes libres de contexto

## Autómatas de pila

### Teorema

*Un lenguaje es libre de contexto si y sólo si es aceptado por un autómata de pila (no-determinista).*

### Demostración.

La prueba es en dos partes:



# AP y lenguajes libres de contexto

## Autómatas de pila

### Teorema

*Un lenguaje es libre de contexto si y sólo si es aceptado por un autómata de pila (no-determinista).*

### Demostración.

La prueba es en dos partes:

- I Síntesis: Dado un lenguaje libre de contexto  $L$  existe un autómata de pila  $M$  tal que  $L = L(M)$ .



# AP y lenguajes libres de contexto

## Autómatas de pila

### Teorema

*Un lenguaje es libre de contexto si y sólo si es aceptado por un autómata de pila (no-determinista).*

### Demostración.

La prueba es en dos partes:

- I Síntesis: Dado un lenguaje libre de contexto  $L$  existe un autómata de pila  $M$  tal que  $L = L(M)$ .
- II Análisis: Dado un autómata de pila  $M$  existe una gramática libre de contexto  $G$  tal que  $L(M) = L(G)$ . Es decir,  $L(M)$  es libre de contexto.



# GLC $\Rightarrow$ AP

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

Dada una gramática libre de contexto  $G = \langle V, T, S, P \rangle$  definimos un autómata de pila  $M_G$  como sigue:



# GLC $\Rightarrow$ AP

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

Dada una gramática libre de contexto  $G = \langle V, T, S, P \rangle$  definimos un autómata de pila  $M_G$  como sigue:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$



# GLC $\Rightarrow$ AP

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

Dada una gramática libre de contexto  $G = \langle V, T, S, P \rangle$  definimos un autómata de pila  $M_G$  como sigue:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $\Sigma = T, \Gamma = V \cup \{Z_0\}$



# GLC $\Rightarrow$ AP

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

Dada una gramática libre de contexto  $G = \langle V, T, S, P \rangle$  definimos un autómata de pila  $M_G$  como sigue:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $\Sigma = T$ ,  $\Gamma = V \cup \{Z_0\}$
- $F = \{q_2\}$ .



# GLC $\Rightarrow$ AP

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

Dada una gramática libre de contexto  $G = \langle V, T, S, P \rangle$  definimos un autómata de pila  $M_G$  como sigue:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $\Sigma = T, \Gamma = V \cup \{Z_0\}$
- $F = \{q_2\}$ .
- $\delta$  se define mediante:

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$$

$$\delta(q_1, \varepsilon, A) = \{(q_1, \alpha) \mid A \rightarrow \alpha \in P\}$$

$$\delta(q_1, a, a) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \forall a \in \Sigma$$

$$\delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, Z_0)\}$$



# GLC $\Rightarrow$ AP

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

Dada una gramática libre de contexto  $G = \langle V, T, S, P \rangle$  definimos un autómata de pila  $M_G$  como sigue:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $\Sigma = T$ ,  $\Gamma = V \cup \{Z_0\}$
- $F = \{q_2\}$ .
- $\delta$  se define mediante:

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$$

$$\delta(q_1, \varepsilon, A) = \{(q_1, \alpha) \mid A \rightarrow \alpha \in P\}$$

$$\delta(q_1, a, a) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \forall a \in \Sigma$$

$$\delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, Z_0)\}$$

- Se cumple  $L(G) = L(M_G)$ .



# Ejemplos

GLC  $\Rightarrow$  AP

Dada  $G$  mediante

$$S \rightarrow aSb \quad S \rightarrow cSb \quad S \rightarrow a$$

el autómata de pila correspondiente es:

- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$



# Ejemplos

GLC  $\Rightarrow$  AP

Dada  $G$  mediante

$$S \rightarrow aSb \quad S \rightarrow cSb \quad S \rightarrow a$$

el autómata de pila correspondiente es:

- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, S) = \{(q_1, aSb), (q_1, cSb), (q_1, a)\}$



# Ejemplos

GLC  $\Rightarrow$  AP

Dada  $G$  mediante

$$S \rightarrow aSb \quad S \rightarrow cSb \quad S \rightarrow a$$

el autómata de pila correspondiente es:

- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, S) = \{(q_1, aSb), (q_1, cSb), (q_1, a)\}$
- $\delta(q_1, a, a) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



# Ejemplos

GLC  $\Rightarrow$  AP

Dada  $G$  mediante

$$S \rightarrow aSb \quad S \rightarrow cSb \quad S \rightarrow a$$

el autómata de pila correspondiente es:

- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, S) = \{(q_1, aSb), (q_1, cSb), (q_1, a)\}$
- $\delta(q_1, a, a) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, b) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



# Ejemplos

GLC  $\Rightarrow$  AP

Dada  $G$  mediante

$$S \rightarrow aSb \quad S \rightarrow cSb \quad S \rightarrow a$$

el autómata de pila correspondiente es:

- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, S) = \{(q_1, aSb), (q_1, cSb), (q_1, a)\}$
- $\delta(q_1, a, a) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, b) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, c, c) = \{(q_1, \varepsilon)\}$



# Ejemplos

GLC  $\Rightarrow$  AP

Dada  $G$  mediante

$$S \rightarrow aSb \quad S \rightarrow cSb \quad S \rightarrow a$$

el autómata de pila correspondiente es:

- $\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, SZ_0)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, S) = \{(q_1, aSb), (q_1, cSb), (q_1, a)\}$
- $\delta(q_1, a, a) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, b, b) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, c, c) = \{(q_1, \varepsilon)\}$
- $\delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_2, Z_0)\}$



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Dado un autómata de pila  $M$  que acepta por pila vacía, vamos a construir una GLC  $G_M$  tal que  $L(M) = L(G_M)$ .



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Dado un autómata de pila  $M$  que acepta por pila vacía, vamos a construir una GLC  $G_M$  tal que  $L(M) = L(G_M)$ .
- Este método genera gramáticas bastante complejas, con un gran número de variables y producciones.



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Dado un autómata de pila  $M$  que acepta por pila vacía, vamos a construir una GLC  $G_M$  tal que  $L(M) = L(G_M)$ .
- Este método genera gramáticas bastante complejas, con un gran número de variables y producciones.
- Además pueden generarse variables inútiles.



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Dado un autómata de pila  $M$  que acepta por pila vacía, vamos a construir una GLC  $G_M$  tal que  $L(M) = L(G_M)$ .
- Este método genera gramáticas bastante complejas, con un gran número de variables y producciones.
- Además pueden generarse variables inútiles.
- Las variables de la gramática serán  $S$  y las expresiones de la forma

$[p, X, q]$  con  $p, q \in Q$ ,  $X \in \Gamma$



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Dado un autómata de pila  $M$  que acepta por pila vacía, vamos a construir una GLC  $G_M$  tal que  $L(M) = L(G_M)$ .
- Este método genera gramáticas bastante complejas, con un gran número de variables y producciones.
- Además pueden generarse variables inútiles.
- Las variables de la gramática serán  $S$  y las expresiones de la forma

$[p, X, q]$  con  $p, q \in Q$ ,  $X \in \Gamma$

- La idea básica es simular con derivaciones los cálculos de  $M$ .



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Dado un autómata de pila  $M$  que acepta por pila vacía, vamos a construir una GLC  $G_M$  tal que  $L(M) = L(G_M)$ .
- Este método genera gramáticas bastante complejas, con un gran número de variables y producciones.
- Además pueden generarse variables inútiles.
- Las variables de la gramática serán  $S$  y las expresiones de la forma

$[p, X, q]$  con  $p, q \in Q$ ,  $X \in \Gamma$

- La idea básica es simular con derivaciones los cálculos de  $M$ .
- La variable  $[p, X, q]$  debe generar todas las cadenas que llevan al autómata de  $p$  a  $q$  al eliminar  $X$  de la pila.



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Producciones iniciales:  $S \rightarrow [q_0, Z_0, p]$  para todo  $p \in Q$ .



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Producciones iniciales:  $S \rightarrow [q_0, Z_0, p]$  para todo  $p \in Q$ .
- Si  $(p, \varepsilon) \in \delta(q, a, X)$  entonces leyendo  $a$  el autómata pasa de  $q$  a  $p$  y elimina a  $X$  de la pila. Se agrega

$$[q, X, p] \rightarrow a$$

Esto incluye el caso  $a = \varepsilon$ .



# AP $\Rightarrow$ GLC

## Gramáticas y lenguajes libres de contexto

- Si  $(p, Y_1 Y_2 \dots Y_m) \in \delta(q, a, X)$  entonces leyendo  $a$  el autómata pasa de  $q$  a  $p$  y sustituye a  $X$  por  $Y_1 Y_2 \dots Y_m$  en la pila. Se agrega

$$[q, X, p_m] \rightarrow a[p, Y_1, p_1][p_1, Y_2, p_2] \dots [p_{m-1}, Y_m, p_m]$$

para todas las elecciones posibles de  $p_1, \dots, p_m \in Q$ .

Esto incluye el caso  $a = \varepsilon$ .



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

$$\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

$$\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\} \quad \delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

$$\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

Producciones iniciales:

$$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_0]$$

$$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

$$\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

$$\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, \varepsilon, Z_0) = \{(q_0, \varepsilon)\} \quad \delta(q_0, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

$$\delta(q_1, b, X) = \{(q_1, \varepsilon)\} \quad \delta(q_1, \varepsilon, Z_0) = \{(q_1, \varepsilon)\}$$

Producciones:

$$\begin{array}{lcl} [q_0, Z_0, q_0] & \rightarrow & \varepsilon \\ [q_0, X, q_1] & \rightarrow & b \\ [q_1, X, q_1] & \rightarrow & b \\ [q_1, Z_0, q_1] & \rightarrow & \varepsilon \end{array}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, XZ_0)\}$$

Producciones:

$$\begin{array}{lcl} [q_0, Z_0, q_1] & \rightarrow & a[q_0, X, q_0][q_0, Z_0, q_1] \\ [q_0, Z_0, q_0] & \rightarrow & a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_0] \\ [q_0, Z_0, q_0] & \rightarrow & a[q_0, X, q_0][q_0, Z_0, q_0] \\ [q_0, Z_0, q_1] & \rightarrow & a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_1] \end{array}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$



# Ejemplo

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$$

$$\delta(q_0, a, X) = \{(q_0, XX)\}$$

Producciones:

$$\begin{array}{lcl} [q_0, X, q_0] & \rightarrow & a[q_0, X, q_0][q_0, X, q_0] \\ [q_0, X, q_0] & \rightarrow & a[q_0, X, q_1][q_1, X, q_0] \\ [q_0, X, q_1] & \rightarrow & a[q_0, X, q_0][q_0, X, q_1] \\ [q_0, X, q_1] & \rightarrow & a[q_0, X, q_1][q_1, X, q_1] \end{array}$$



# Derivación de *aabb*

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$$



# Derivación de $aabb$

AP  $\Rightarrow$  GLC

$$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$$

$$\rightarrow a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$$



# Derivación de $aabb$

AP  $\Rightarrow$  GLC

$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$

$\rightarrow a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aa[q_0, X, q_1][q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$



# Derivación de $aabb$

AP  $\Rightarrow$  GLC

$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$

$\rightarrow a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aa[q_0, X, q_1][q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aab[q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$



# Derivación de $aabb$

AP  $\Rightarrow$  GLC

$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$

$\rightarrow a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aa[q_0, X, q_1][q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aab[q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aabb[q_1, Z_0, q_1]$



# Derivación de $aabb$

AP  $\Rightarrow$  GLC

$S \rightarrow [q_0, Z_0, q_1]$

$\rightarrow a[q_0, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aa[q_0, X, q_1][q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aab[q_1, X, q_1][q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aabb[q_1, Z_0, q_1]$

$\rightarrow aabb$

