

# PROCESADORES DE LENGUAJES

## TEMA II: ANÁLISIS LÉXICO

Prof. Dr. Nicolás Luis Fernández García

Departamento de Informática y Análisis Numérico  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Córdoba

Curso académico 2009 - 2010

# Programa

- Tema I.- Introducción
- Tema II .- Análisis Lexicográfico
- Tema III.- Fundamentos Teóricos del Análisis Sintáctico
- Tema IV.- Análisis Sintáctico Descendente
- Tema V.- Análisis Sintáctico Ascendente
- Tema VI.- Traducción Basada en la Sintaxis

# Programa

- 1 **Introducción**
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Programa

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Programa

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Programa

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Programa

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Contenido del tema

- 1 **Introducción**
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores



# Contenido de la sección

- 1 **Introducción**
  - El análisis léxico en el proceso de traducción
  - Componentes Léxicos
  - Tabla de Símbolos
  - Palabras claves
  - Ejemplo
  - Autonomía del analizador léxico
- 2 **Especificación de componentes léxicos**
- 3 **Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 **Implementación de los analizadores léxicos**

# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción

## Análisis Léxico

- Primera fase del proceso de traducción
- Lee el código fuente "carácter a carácter"
- Genera los componentes léxicos
- Procedimiento auxiliar del Análisis Sintáctico
- Crea la Tabla de Símbolos
- El Gestor de errores procesa los errores léxicos detectados

# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción

## Análisis Léxico

- Primera fase del proceso de traducción
- Lee el código fuente “carácter a carácter”
- Genera los componentes léxicos
- Procedimiento auxiliar del Análisis Sintáctico
- Crea la Tabla de Símbolos
- El Gestor de errores procesa los errores léxicos detectados

# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción

## Análisis Léxico

- Primera fase del proceso de traducción
- Lee el código fuente “carácter a carácter”
- Genera los componentes léxicos
- Procedimiento auxiliar del Análisis Sintáctico
- Crea la Tabla de Símbolos
- El Gestor de errores procesa los errores léxicos detectados

# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción

## Análisis Léxico

- Primera fase del proceso de traducción
- Lee el código fuente “carácter a carácter”
- Genera los componentes léxicos
- Procedimiento auxiliar del Análisis Sintáctico
- Crea la Tabla de Símbolos
- El Gestor de errores procesa los errores léxicos detectados

# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción

## Análisis Léxico

- Primera fase del proceso de traducción
- Lee el código fuente “carácter a carácter”
- Genera los componentes léxicos
- Procedimiento auxiliar del Análisis Sintáctico
- Crea la Tabla de Símbolos
- El Gestor de errores procesa los errores léxicos detectados

# Introducción

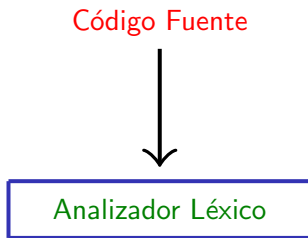
El análisis léxico en el proceso de traducción

## Análisis Léxico

- Primera fase del proceso de traducción
- Lee el código fuente “carácter a carácter”
- Genera los componentes léxicos
- Procedimiento auxiliar del Análisis Sintáctico
- Crea la Tabla de Símbolos
- El Gestor de errores procesa los errores léxicos detectados

# Introducción

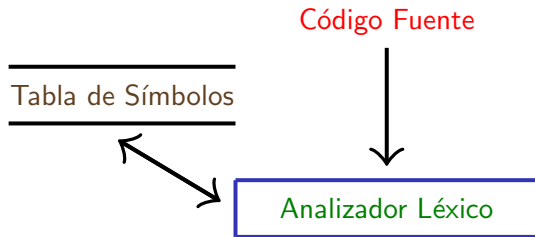
El análisis léxico en el proceso de traducción





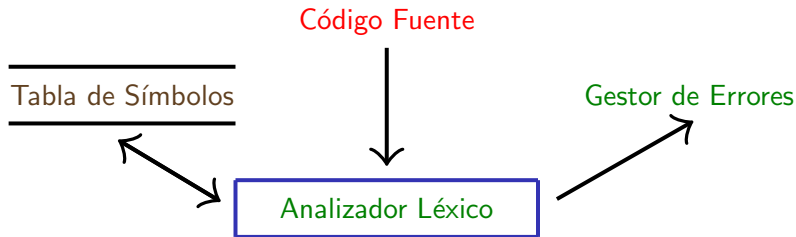
# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción



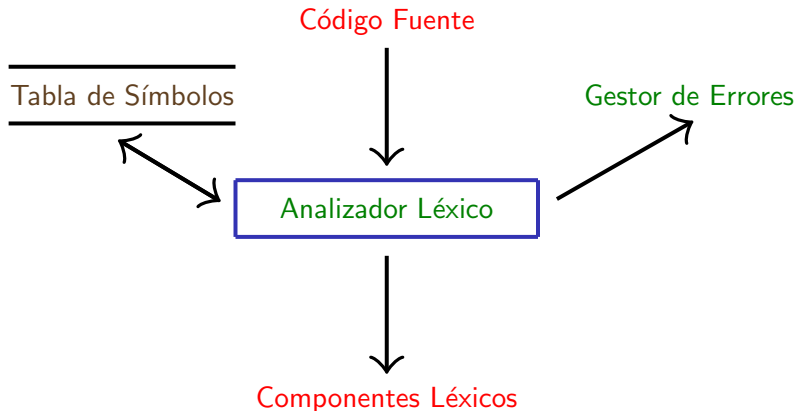
# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción



# Introducción

El análisis léxico en el proceso de traducción



## Contenido de la sección

- 1 **Introducción**
  - El análisis léxico en el proceso de traducción
  - **Componentes Léxicos**
  - Tabla de Símbolos
  - Palabras claves
  - Ejemplo
  - Autonomía del analizador léxico
- 2 **Especificación de componentes léxicos**
- 3 **Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 **Implementación de los analizadores léxicos**

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*



# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Definición (Componente léxico)

*Elemento más simple con significado propio de un lenguaje de programación:*

### Ejemplo

- *Identificadores: variables, palabras claves, ...*
- *Números*
- *Cadenas de caracteres*
- *Operadores: aritméticos, relacionales, lógicos, ...*
- *Signos de puntuación*
- *Etc.*

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Los componentes léxicos

- También se denominan “tokens”
- Son los **símbolos terminales** de las gramáticas de contexto libre que generan los lenguajes de programación.
- Son en realidad **códigos numéricos**

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Los componentes léxicos

- También se denominan “tokens”
- Son los **símbolos terminales** de las gramáticas de contexto libre que generan los lenguajes de programación.
- Son en realidad **códigos numéricos**

# Introducción

## Componentes Léxicos

### Los componentes léxicos

- También se denominan “tokens”
- Son los **símbolos terminales** de las gramáticas de contexto libre que generan los lenguajes de programación.
- Son en realidad **códigos numéricos**

# Contenido de la sección

- 1 **Introducción**
  - El análisis léxico en el proceso de traducción
  - Componentes Léxicos
  - **Tabla de Símbolos**
  - Palabras claves
  - Ejemplo
  - Autonomía del analizador léxico
- 2 **Especificación de componentes léxicos**
- 3 **Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 **Implementación de los analizadores léxicos**

# Introducción

## Tabla de Símbolos

### Tabla de Símbolos

- Se **crea** durante el Análisis Léxico
- Puede almacenar:
  - + Números
  - + Cadenas
  - + ...
  - + Pero, sobre todo, **identificadores**



# Introducción

## Tabla de Símbolos

### Tabla de Símbolos

- Cuando el analizador léxico **reconoce** un identificador:
  - + Se **inserta** el identificador en la Tabla de Símbolos
  - + Devuelve el componente léxico de **identificador** y un **puntero o índice** a su posición en la Tabla de Símbolos
- La información del identificador depende de su **naturaleza**:
  - + **Variable**: tipo de dato, valor, ...
  - + **Función**: número y tipo de argumentos, ...
  - + Etc.

# Introducción

## Tabla de Símbolos

### Tabla de Símbolos

- Cuando el analizador léxico **reconoce** un identificador:
  - + Se **inserta** el identificador en la Tabla de Símbolos
  - + Devuelve el componente léxico de **identificador** y un **puntero o índice** a su posición en la Tabla de Símbolos
- La información del identificador depende de su **naturaleza**:
  - + **Variable**: tipo de dato, valor, ...
  - + **Función**: número y tipo de argumentos, ...
  - + Etc.

# Introducción

## Tabla de Símbolos

**Ejemplo** ( $\text{dividendo} = \text{divisor} * \text{cociente} + \text{resto}$ )

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Valor</i>	<i>...</i>
<i>dividendo</i>			
<i>divisor</i>			
<i>cociente</i>			
<i>resto</i>			

# Introducción

## Tabla de Símbolos

### Nota

*La información de los identificadores se completa **durante** todas las **fases** del proceso de traducción*

## Contenido de la sección

- 1 **Introducción**
  - El análisis léxico en el proceso de traducción
  - Componentes Léxicos
  - Tabla de Símbolos
  - **Palabras claves**
  - Ejemplo
  - Autonomía del analizador léxico
- 2 **Especificación de componentes léxicos**
- 3 **Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 **Implementación de los analizadores léxicos**

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves o reservadas

- Son identificadores con un **significado especial**
- Algunos lenguajes de programación también permiten **usar** las palabras claves **como variables**
  - + Las palabras claves **no** serían palabras reservadas
  - + **Dificulta** la legibilidad de los programas

(PL 1)

```
IF (IF < 1) THEN THEN = 0;
```

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves o reservadas

- Son identificadores con un **significado especial**
- Algunos lenguajes de programación también permiten **usar** las palabras claves **como variables**
  - + Las palabras claves **no** serían palabras reservadas
  - + **Dificulta** la legibilidad de los programas

### Ejemplo (PL/I)

```
IF (IF  $\neq$  1) THEN THEN = 0;
```

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves o reservadas

- Son identificadores con un **significado especial**
- Algunos lenguajes de programación también permiten **usar** las palabras claves **como variables**
  - + Las palabras claves **no** serían palabras reservadas
  - + **Dificulta** la legibilidad de los programas

### Ejemplo (PL/I)

```
IF (IF  $\neq$  1) THEN THEN = 0;
```



# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

- Tipos de reconocimiento de las palabras claves:
  - 1.- **Implícito:** **preinstalación** en la Tabla de Símbolos
  - 2.- **Explícito:** reconocimiento **específico** de cada palabra clave.

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

- Tipos de reconocimiento de las palabras claves:
  - 1.- **Implícito:** **preinstalación** en la Tabla de Símbolos
  - 2.- **Explícito:** reconocimiento **específico** de cada palabra clave.

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

- Tipos de reconocimiento de las palabras claves:
  - 1.- **Implícito:** **preinstalación** en la Tabla de Símbolos
  - 2.- **Explícito:** reconocimiento **específico** de cada palabra clave.

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

#### 1.- Preinstalación en la Tabla de Símbolos:

- + Se almacena el nombre y el componente léxico
- + Al reconocer un identificador, se **consulta** la Tabla de Símbolos para comprobar si es una palabra clave o no.
- + **Ventajas**
  - La programación del analizador léxico es más **sencilla**
- + **Inconvenientes**
  - El reconocimiento es más **lento**
  - Se necesita **más memoria** para la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

#### 1.- Preinstalación en la Tabla de Símbolos:

- + Se almacena el nombre y el componente léxico
- + Al reconocer un identificador, se **consulta** la Tabla de Símbolos para comprobar si es una palabra clave o no.
- + **Ventajas**
  - La programación del analizador léxico es más **sencilla**
- + **Inconvenientes**
  - El reconocimiento es más **lento**
  - Se necesita **más memoria** para la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

1.- **Preinstalación** en la Tabla de Símbolos:

- + Se almacena el nombre y el componente léxico

### Ejemplo

<i>Nombre</i>	<i>Componente Léxico</i>	<i>...</i>	<i>...</i>
<i>if</i>	<i>IF</i>		
<i>while</i>	<i>WHILE</i>		
<i>...</i>			

- + Al reconocer un identificador, se **consulta** la Tabla de Símbolos para comprobar si es una palabra clave o no.
- + **Ventajas**
  - La programación del analizador léxico es más **sencilla**

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

#### 1.- Preinstalación en la Tabla de Símbolos:

- + Se almacena el nombre y el componente léxico
- + Al reconocer un identificador, se **consulta** la Tabla de Símbolos para comprobar si es una palabra clave o no.
- + **Ventajas**
  - La programación del analizador léxico es más **sencilla**
- + **Inconvenientes**
  - El reconocimiento es más **lento**
  - Se necesita **más memoria** para la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

#### 1.- Preinstalación en la Tabla de Símbolos:

- + Se almacena el nombre y el componente léxico
- + Al reconocer un identificador, se **consulta** la Tabla de Símbolos para comprobar si es una palabra clave o no.
- + **Ventajas**
  - La programación del analizador léxico es más **sencilla**
- + **Inconvenientes**
  - El reconocimiento es más **lento**
  - Se necesita **más memoria** para la Tabla de Símbolos



# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

#### 1.- Preinstalación en la Tabla de Símbolos:

- + Se almacena el nombre y el componente léxico
- + Al reconocer un identificador, se **consulta** la Tabla de Símbolos para comprobar si es una palabra clave o no.
- + **Ventajas**
  - La programación del analizador léxico es más **sencilla**
- + **Inconvenientes**
  - El reconocimiento es más **lento**
  - Se necesita **más memoria** para la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

2.- Reconocimiento **específico** de cada palabra clave.

- + Cada palabra clave es reconocida de forma **independiente** de los demás identificadores y palabras claves
- + **Ventajas**
  - El reconocimiento es más **rápido**
  - No se necesita aumentar la memoria de la Tabla de Símbolos: las palabras claves **no se almacenan**
- + **Inconvenientes**
  - La programación del analizador léxico es más **compleja**

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

2.- Reconocimiento **específico** de cada palabra clave.

- + Cada palabra clave es reconocida de forma **independiente** de los demás identificadores y palabras claves
- + **Ventajas**
  - El reconocimiento es más **rápido**
  - No se necesita aumentar la memoria de la Tabla de Símbolos: las palabras claves **no se almacenan**
- + **Inconvenientes**
  - La programación del analizador léxico es más **compleja**

# Introducción

## Palabras claves

### Palabras claves

2.- Reconocimiento **específico** de cada palabra clave.

- + Cada palabra clave es reconocida de forma **independiente** de los demás identificadores y palabras claves
- + **Ventajas**
  - El reconocimiento es más **rápido**
  - No se necesita aumentar la memoria de la Tabla de Símbolos: las palabras claves **no se almacenan**
- + **Inconvenientes**
  - La programación del analizador léxico es más **compleja**

## Contenido de la sección

- 1 **Introducción**
  - El análisis léxico en el proceso de traducción
  - Componentes Léxicos
  - Tabla de Símbolos
  - Palabras claves
  - Ejemplo
  - Autonomía del analizador léxico
- 2 **Especificación de componentes léxicos**
- 3 **Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 **Implementación de los analizadores léxicos**

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- **dividendo**
  - + Es reconocido como <IDENTIFICADOR>
  - + Se devuelve el componente léxico y el puntero a la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- Se eliminan
  - + Espacios en blanco
  - + Tabuladores
  - + Saltos de línea

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- Signo =
  - + Se devuelve el token de <ASIGNACIÓN>



# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

### Nota

- *El Análisis Sintáctico sólo necesita saber que se ha reconocido el componente léxico <ASIGNACIÓN>*
- *No le importa si el símbolo es = o := o cualquier otro*
- *No interesa el texto concreto, sino la categoría a la que pertenece*

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- **divisor**
  - + Es reconocido como <IDENTIFICADOR>
  - + Se devuelve el componente léxico y el puntero a la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- Signo \*
  - + Se devuelve el token de <PRODUCTO>

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- **cociente**
  - + Es reconocido como <IDENTIFICADOR>
  - + Se devuelve el componente léxico y el puntero a la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- Signo +
  - + Se devuelve el token de <SUMA>

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- **resto**
  - + Es reconocido como <IDENTIFICADOR>
  - + Se devuelve el componente léxico y el puntero a la Tabla de Símbolos

# Introducción

## Ejemplo

### Ejemplo

*Sentencia del lenguaje C*

*dividendo = divisor \* cociente + resto ;*

- Signo ;
  - + Se devuelve el token de <FIN DE SENTENCIA>

## Contenido de la sección

- 1 **Introducción**
  - El análisis léxico en el proceso de traducción
  - Componentes Léxicos
  - Tabla de Símbolos
  - Palabras claves
  - Ejemplo
  - Autonomía del analizador léxico
- 2 **Especificación de componentes léxicos**
- 3 **Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 **Implementación de los analizadores léxicos**



# Introducción

Autonomía del analizador léxico

## Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
  - + La separación de tareas **facilita el mantenimiento y mejora** del traductor
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

Autonomía del analizador léxico

## Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
  - + Los componentes léxicos pueden ser denotados por **Expresiones Regulares**
  - + Los **Autómatas Finitos Deterministas (AFD)** reconocen las palabras denotadas por las expresiones regulares
  - + Los Analizadores Léxicos están **basados** en los Autómatas Finitos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
  - + Los componentes léxicos pueden ser denotados por **Expresiones Regulares**
  - + Los **Autómatas Finitos Deterministas (AFD)** reconocen las palabras denotadas por las expresiones regulares
  - + Los Analizadores Léxicos están **basados** en los Autómatas Finitos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
  - + Los componentes léxicos pueden ser denotados por **Expresiones Regulares**
  - + Los **Autómatas Finitos Deterministas (AFD)** reconocen las palabras denotadas por las expresiones regulares
  - + Los Analizadores Léxicos están **basados** en los Autómatas Finitos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

Autonomía del analizador léxico

## Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
  - + El Análisis Léxico es la **única fase** que tiene contacto con el código fuente
  - + Puede **procesar** el texto: eliminar espacios en blanco, comentarios
  - + Almacena la posición de los **saltos de línea** para informar sobre la localización de los **errores detectados**
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad



# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
  - + El Análisis Léxico es la **única fase** que tiene contacto con el código fuente
  - + Puede **procesar** el texto: eliminar espacios en blanco, comentarios
  - + Almacena la posición de los **saltos de línea** para informar sobre la localización de los **errores detectados**
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
  - + El Análisis Léxico es la **única fase** que tiene contacto con el código fuente
  - + Puede **procesar** el texto: eliminar espacios en blanco, comentarios
  - + Almacena la posición de los **saltos de línea** para informar sobre la localización de los **errores detectados**
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

Autonomía del analizador léxico

## Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
  - + Las operaciones de **lectura / escritura** son computacionalmente muy **costosas**
  - + Se puede mejorar la eficiencia si se **codifican** con sentencias de **bajo nivel**: ensamblador, ...
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
  - + Las operaciones de **lectura / escritura** son computacionalmente muy **costosas**
  - + Se puede mejorar la eficiencia si se **codifican** con sentencias de **bajo nivel**: ensamblador, ...
- Portabilidad

# Introducción

Autonomía del analizador léxico

## Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad
  - + La codificación de los caracteres pueden variar de un entorno de ejecución a otro: **ASCII**, **EBCDIC**, ...
  - + El cambio de codificación sólo requerirá modificar el Análisis Léxico, no siendo necesario modificar el resto de fases.

# Introducción

## Autonomía del analizador léxico

### Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad
  - + La codificación de los caracteres pueden variar de un entorno de ejecución a otro: **ASCII, EBCDIC, ...**
  - + El cambio de codificación **sólo requerirá modificar el Analisis Léxico**, no siendo necesario modificar el resto de fases.



# Introducción

Autonomía del analizador léxico

## Razones para separar el análisis léxico del análisis sintáctico

- Modularidad
- Menor complejidad de los componentes léxicos
- Pre-procesamiento del código fuente
- Mejora en la eficiencia del analizador léxico
- Portabilidad

# Contenido del tema

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos**
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
  - Descripción de los componentes léxicos
  - Palabras y lenguajes formales
  - Expresiones Regulares
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Componentes léxicos

- Elementos básicos de los lenguajes de programación
- Se describen mediante
  - + Una descripción informal
  - + Una descripción formal mediante expresiones regulares
  - + Ejemplos o paradigmas

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Componentes léxicos

- Elementos básicos de los lenguajes de programación
- Se describen mediante
  - + Una descripción informal
  - + Una descripción formal mediante expresiones regulares
  - + Ejemplos o paradigmas

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Componentes léxicos

- Elementos básicos de los lenguajes de programación
- Se describen mediante
  - + Una descripción informal
  - + Una descripción formal mediante expresiones regulares
  - + Ejemplos o paradigmas

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Componentes léxicos

- Elementos básicos de los lenguajes de programación
- Se describen mediante
  - + Una descripción informal
  - + Una descripción formal mediante **expresiones regulares**
  - + Ejemplos o paradigmas

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Componentes léxicos

- Elementos básicos de los lenguajes de programación
- Se describen mediante
  - + Una descripción informal
  - + Una descripción formal mediante **expresiones regulares**
  - + Ejemplos o paradigmas



# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C 1 / 7)

- **IDENTIFICADOR**
- **Descripción informal:** *Cadenas de caracteres compuestas por letras, cifras y el símbolo de subrayado, pero que no comienza por una cifra.*
- **Descripción formal:**  
 $(\text{letra} + \text{subrayado})(\text{letra} + \text{cifra} + \text{subrayado})^*$
- **Ejemplos o paradigmas:**  
*dividendo, divisor, cociente, resto, suma\_total, x\_1, ...*

## Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C

2 / 7)

- **NÚMERO**
- **Descripción informal:** *números enteros, reales, ...*
- **Descripción formal:**  
*cifra cifra\**  
 $(\epsilon + .cifra^*(\epsilon + (E + e)(\epsilon + " + " + " - ")cifra cifra^*))$
- **Ejemplos o paradigmas:** *9, 19.7, 97.7e2, ...*

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C

3 / 7)

- *IF*
- **Descripción informal:** *palabra clave de la sentencia condicional if*
- **Descripción formal:** *if*
- **Ejemplo o paradigma:** *if*

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C

4 / 7)

- **FOR**
- **Descripción informal:** *palabra clave de la sentencia de repetición for*
- **Descripción formal:** *for*
- **Ejemplo o paradigma:** *for*

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C

5 / 7)

- **ASIGNACIÓN**
- **Descripción informal:** *signo igual para la sentencia de asignación*
- **Descripción formal:** =
- **Ejemplo o paradigma:** =

## Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C 6 / 7)

- *MAYOR\_IGUAL\_QUE*
- **Descripción informal:** *operador relacional mayor o igual que*
- **Descripción formal:** `>=`
- **Ejemplo o paradigma:** `>=`

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Ejemplo (Componentes léxicos en el lenguaje C 7 / 7)

- ***FIN\_SENTENCIA***
- **Descripción informal:** *signo de punto y coma para indicar el fin de una sentencia*
- **Descripción formal:** ;
- **Ejemplo o paradigma:** ;

# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Nota

*Sólo interesa saber el **significado** (Componente Léxico) que se asocia a uno o más signos, **no cómo son** dichos signos.*



# Especificación de componentes léxicos

Descripción de los componentes léxicos

## Nota

Sólo interesa saber el *significado (Componente Léxico)* que se asocia a uno o más signos, *no cómo son dichos signos*.

## Ejemplo (Lenguaje Fortran)

La expresión regular para el componente léxico *MAYOR\_IGUAL\_QUE* es:  $.(G+g)(E+e).$

## Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
  - Descripción de los componentes léxicos
  - Palabras y lenguajes formales
  - Expresiones Regulares
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Alfabeto o vocabulario)

- *Conjunto finito y no vacío de símbolos que permiten formar la palabras pertenecientes a un lenguaje*
- *Se suele denotar por  $\Sigma$  o  $V$*
- $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Ejemplo

- $\Sigma_1 = \{0, 1\}$  (*Alfabeto binario*)
- $\Sigma_2 = \{0, 1, 2, \dots, 9\}$
- $\Sigma_3 = \{a, b, c, \dots, z\}$
- $\Sigma_4 = \{if, else\}$
- $\Sigma_5 = \{ab, ca, bbc\}$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Palabra o cadena)

- Secuencia *finita* de símbolos pertenecientes a un alfabeto

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Palabra o cadena)

- Secuencia *finita* de símbolos pertenecientes a un alfabeto

## Ejemplo (Palabras definidas sobre)

- $\Sigma_1 = \{0, 1\}$ : *0, 1, 01, 1, 10, 010101, 100,...*
- $\Sigma_3 = \{a, b, c, \dots, z\}$ : *aab, valor, punto,...*
- $\Sigma_5 = \{ab, ca, bbc\}$ : *ab, bbc, abab, abbcb,...*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Longitud de una palabra  $x$ )

- *Número de símbolos de un alfabeto que componen dicha palabra.*
- *Se denota por  $|x|$*
- *Si  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$  y  $x = \sigma_{i_1} \sigma_{i_2} \dots \sigma_{i_k}$  entonces  $|x| = k$*

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Nota

*La longitud de una palabra depende del alfabeto sobre el que esté definida.*



# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Nota

*La longitud de una palabra depende del alfabeto sobre el que esté definida.*

**Ejemplo** (Longitud de la palabra  $x = abab$  definida sobre)

- $\Sigma_3 = \{a, b, c, \dots, z\}: |x| = 4$
- $\Sigma_5 = \{ab, ca, bbc\}: |x| = 2$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Lenguaje universal definido sobre $\Sigma$ )

- *Conjunto de palabras compuestas por cero o más símbolos de  $\Sigma$ .*
- *Se representa por  $\Sigma^*$ .*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Ejemplo** (Palabras definidas sobre un alfabeto  $\Sigma$ )

- Si  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$  entonces  $\Sigma^*$  se puede generar a partir de las palabras de:
  - +  $|x| = 0$ : "palabra vacía" que se denota por  $\epsilon$  o  $\lambda$ .
  - +  $|x| = 1$ :  $x = \sigma_1, x = \sigma_2, \dots, x = \sigma_n$
  - +  $|x| = 2$ :  $x = \sigma_1\sigma_1, x = \sigma_1\sigma_2, \dots$
  - + Etc.

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Ejemplo** (Palabras definidas sobre  $\Sigma = \{a, b, c\}$ )

- $|x| = 0$ :  $x = \epsilon$ .
- $|x| = 1$ :  $x = a, x = b, x = c$
- $|x| = 2$ :  $x = aa, x = ab, x = ac, x = ba, \dots$
- *Etc.*
- *En resumen,  $\Sigma^* = \{\epsilon, a, b, c, aa, ab, ac, ba, \dots\}$*

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Lenguajes formales)

- $L$  es un lenguaje formal definido sobre  $\Sigma$  si  $L \subseteq \Sigma^*$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Lenguajes formales)

- $L$  es un lenguaje formal definido sobre  $\Sigma$  si  $L \subseteq \Sigma^*$

Ejemplo (Lenguajes formales definidos sobre  $\Sigma$ )

- $L_{\emptyset} = \emptyset$ .
- $\Sigma$
- $\Sigma^*$
- $L_{\sigma} = \{\sigma\}$  donde  $\sigma \in \Sigma$
- $L_{\epsilon} = \{\epsilon\}$
- $\Sigma^+ = \{x \mid x \in \Sigma^* \wedge |x| \geq 1\}$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Nota

- $L_\epsilon = \{\epsilon\} \neq L_\emptyset = \emptyset$
- $\epsilon \in \Sigma^+ \iff \epsilon \in \Sigma$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Ejemplo** (Lenguajes formales sobre  $\Sigma = \{a, b, c\}$ )

- $L_{\emptyset} = \emptyset$
- $L_{\epsilon} = \{\epsilon\}$
- $\Sigma = \{a, b, c\}$
- $\Sigma^* = \{\epsilon, a, b, c, aa, ab, ac, \dots\}$
- $L_a = \{a\}$
- $L = \{a, ab, abb, abbb, \dots\}$

**Nota**

$L$  puede ser denotado por la expresión regular  $ab^*$



# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Operaciones con palabras

- Concatenación
- Potencia

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Concatenación de palabras)

- Sea  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$
- $x = \sigma_{i_1}\sigma_{i_2}\dots\sigma_{i_p}$ ,  $y = \sigma_{j_1}\sigma_{j_2}\dots\sigma_{j_q} \in \Sigma^*$
- La concatenación de  $x$  con  $y$  se denota por  $x \cdot y$  o simplemente  $xy$
- $xy = \sigma_{i_1}\sigma_{i_2}\dots\sigma_{i_p}\sigma_{j_1}\sigma_{j_2}\dots\sigma_{j_q}$

Ejemplo (Concatenación de palabras sobre  $\Sigma = \{a, b, c\}$ )

Si  $x = ab$ ,  $y = bcc$  entonces  $xy = abbcc$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Concatenación de palabras)

- Sea  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$
- $x = \sigma_{i_1}\sigma_{i_2}\dots\sigma_{i_p}$ ,  $y = \sigma_{j_1}\sigma_{j_2}\dots\sigma_{j_q} \in \Sigma^*$
- La concatenación de  $x$  con  $y$  se denota por  $x \cdot y$  o simplemente  $xy$
- $xy = \sigma_{i_1}\sigma_{i_2}\dots\sigma_{i_p}\sigma_{j_1}\sigma_{j_2}\dots\sigma_{j_q}$

Ejemplo (Concatenación de palabras sobre  $\Sigma = \{a, b, c\}$ )

Si  $x = ab$ ,  $y = bcc$  entonces  $xy = abbcc$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la concatenación de palabras

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :** si  $x, y \in \Sigma^*$  entonces  $xy \in \Sigma^*$
- $|xy| = |x| + |y|$
- **Asociativa:**  $x(yz) = (xy)z = xyz$
- **Existencia de elemento neutro:**  $\epsilon$ .  
$$x\epsilon = \epsilon x = x$$
- **No conmutativa:**  $xy \neq yx$

Ejemplo (Si  $\Sigma = \{a, b, c\}$ )

*Si  $x = ab$  ,  $y = bcc$  entonces  $xy = abbcc \neq bccab = yx$*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Potencia de una palabra)

- Sea  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$
- $x = \sigma_{i_1}\sigma_{i_2}\dots\sigma_{i_p} \in \Sigma^*$
- La potencia "i-ésima" de  $x$  se denota por  $x^i$
- $x^i = \underbrace{xx\dots x}_{i \text{ veces}}$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Ejemplo** (Potencia una palabra definida sobre  $\Sigma = \{a, b, c\}$ )*Si  $x = abb$  entonces*

- $x^0 = \epsilon$
- $x^1 = x = abb$
- $x^2 = xx = abbabb$
- $x^3 = xxx = abbabbabb$
- *Etc.*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Potencia de una palabra (versión recursiva))

- $x^0 = \epsilon$
- $x^i = x x^{i-1}$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la potencia de una de palabra

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :**

si  $x \in \Sigma^*$  entonces  $\forall i \in \mathbb{N}, x^i \in \Sigma^*$

- $|x^i| = i|x|$



# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Operaciones con lenguajes formales

- Unión
- Concatenación
- Potencia
- Clausura o cierre de Kleene
- Clausura positiva
- Intersección

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Unión de lenguajes formales)

Si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces

$$L_1 \cup L_2 = \{x \mid x \in L_1 \vee x \in L_2\}$$

## Ejemplo

Si  $L_1 = \{ab, bc, bcc\}$  y  $L_2 = \{a, bc, abb, ac\}$

entonces  $L_1 \cup L_2 = \{ab, bc, bcc, a, abb, ac\}$

## Nota

*No hay palabras o cadenas repetidas*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Unión de lenguajes formales)*Si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces*

$$L_1 \cup L_2 = \{x \mid x \in L_1 \vee x \in L_2\}$$

**Ejemplo***Si  $L_1 = \{ab, bc, bcc\}$  y  $L_2 = \{a, bc, abb, ac\}$* *entonces  $L_1 \cup L_2 = \{ab, bc, bcc, a, abb, ac\}$* **Nota***No hay palabras o cadenas repetidas*

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Definición (Unión de lenguajes formales)

Si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces

$$L_1 \cup L_2 = \{x \mid x \in L_1 \vee x \in L_2\}$$

## Ejemplo

Si  $L_1 = \{ab, bc, bcc\}$  y  $L_2 = \{a, bc, abb, ac\}$

entonces  $L_1 \cup L_2 = \{ab, bc, bcc, a, abb, ac\}$

## Nota

*No hay palabras o cadenas repetidas*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la unión de lenguajes

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :**

si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces  $L_1 \cup L_2 \subseteq \Sigma^*$

- **Asociativa:**  $L_1 \cup (L_2 \cup L_3) = (L_1 \cup L_2) \cup L_3 = L_1 \cup L_2 \cup L_3$

- **Conmutativa:**  $L_1 \cup L_2 = L_2 \cup L_1$

- **Existencia de elemento neutro:**  $\emptyset$

$$L \cup \emptyset = \emptyset \cup L$$

- **Idempotente:**  $L \cup L = L$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Concatenación de lenguajes formales)*Si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces*

$$L_1L_2 = \{x \mid x = yz \wedge y \in L_1 \wedge z \in L_2\}$$

**Ejemplo***Si  $L_1 = \{ab, a, bb\}$  y  $L_2 = \{bc, c, aa\}$* *entonces  $L_1L_2 = \{abbc, abc, abaa, ac, aaa, bbbc, bbc, bbaa\}$* **Nota***No hay palabras o cadenas repetidas*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Concatenación de lenguajes formales)*Si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces*

$$L_1L_2 = \{x \mid x = yz \wedge y \in L_1 \wedge z \in L_2\}$$

**Ejemplo***Si  $L_1 = \{ab, a, bb\}$  y  $L_2 = \{bc, c, aa\}$* *entonces  $L_1L_2 = \{abbc, abc, abaa, ac, aaa, bbbc, bbc, bbaa\}$* **Nota***No hay palabras o cadenas repetidas*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Concatenación de lenguajes formales)*Si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces*

$$L_1L_2 = \{x \mid x = yz \wedge y \in L_1 \wedge z \in L_2\}$$

**Ejemplo***Si  $L_1 = \{ab, a, bb\}$  y  $L_2 = \{bc, c, aa\}$* *entonces  $L_1L_2 = \{abbc, abc, abaa, ac, aaa, bbbc, bbc, bbaa\}$* **Nota***No hay palabras o cadenas repetidas*



## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la concatenación de lenguajes

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :**  
si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces  $L_1 L_2 \subseteq \Sigma^*$
- **Asociativa:**  $L_1(L_2 L_3) = (L_1 L_2)L_3 = L_1 L_2 L_3$
- **Existencia de elemento neutro:**  $L_\epsilon = \{\epsilon\}$   
 $L\{\epsilon\} = \{\epsilon\}L = L$
- **No conmutativa:**  $L_1 L_2 \neq L_2 L_1$

## Nota

*La concatenación lenguajes formales **no** es conmutativa porque la concatenación de palabras tampoco lo es*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la concatenación de lenguajes

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :**  
si  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  entonces  $L_1 L_2 \subseteq \Sigma^*$
- **Asociativa:**  $L_1(L_2 L_3) = (L_1 L_2)L_3 = L_1 L_2 L_3$
- **Existencia de elemento neutro:**  $L_\epsilon = \{\epsilon\}$   
 $L\{\epsilon\} = \{\epsilon\}L = L$
- **No conmutativa:**  $L_1 L_2 \neq L_2 L_1$

## Nota

*La concatenación lenguajes formales **no** es conmutativa porque la concatenación de palabras tampoco lo es*

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Potencia de un lenguaje formal)*Si  $L \subseteq \Sigma^*$  e  $i \in \mathbb{N}$  entonces*

$$L^i = \{x^i \mid x \in L\}$$

**Ejemplo**

$$L^0 = \{x^0 \mid x \in L\} = \{\epsilon\}$$

$$L^1 = L$$

$$L^2 = LL$$

$$\dots$$

$$L^i = LL^{i-1}$$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Potencia de un lenguaje formal)*Si  $L \subseteq \Sigma^*$  e  $i \in \mathbb{N}$  entonces*

$$L^i = \{x^i \mid x \in L\}$$

**Ejemplo**

$$L^0 = \{x^0 \mid x \in L\} = \{\epsilon\}$$

$$L^1 = L$$

$$L^2 = LL$$

$$\dots$$

$$L^i = LL^{i-1}$$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la potencia de un lenguaje formal

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :**

si  $L \subseteq \Sigma^*$  entonces  $\forall i \in \mathbb{N} \quad L^i \subseteq \Sigma^*$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Clausura de Kleene de un lenguaje formal)Si  $L \subseteq \Sigma^*$  entonces

$$L^* = \bigcup_{i=0}^{\infty} L^i = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup \dots$$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Ejemplo

Si  $L = \{a\}$  entonces

$$\begin{aligned}L^* &= \bigcup_{i=0}^{\infty} L^i \\ &= L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup \dots \\ &= \{\epsilon\} \cup \{a\} \cup \{aa\} \dots \\ &= \{\epsilon, a, aa, \dots\}\end{aligned}$$

$L^* = \{a\}^*$  puede ser *denotado* por la expresión regular  $a^*$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la clausura de un lenguaje formal

- Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :

si  $L \subseteq \Sigma^*$  entonces  $L^* \subseteq \Sigma^*$



## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

**Definición** (Clausura positiva de un lenguaje formal)Si  $L \subseteq \Sigma^*$  entonces

$$L^+ = \bigcup_{i=1}^{\infty} L^i = L^1 \cup L^2 \cup \dots$$

# Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Propiedades de la clausura positiva de un lenguaje formal

- **Operación cerrada sobre  $\Sigma^*$ :**

si  $L \subseteq \Sigma^*$  entonces  $L^+ \subseteq \Sigma^*$

## Especificación de componentes léxicos

Palabras y lenguajes formales

## Ejemplos (Operaciones con lenguajes formales)

Si  $L_1 = \{a\}$  y  $L_2 = \{b\}$  entonces

$$L_3 = L_1L_2 = \{ab\}$$

$$L_4 = L_2L_1 = \{ba\}$$

$$L_5 = L_3 \cup L_4 = \{ab, ba\}$$

$$L_6 = L_5^* = \bigcup_{i=0}^{\infty} L_5^i = L_5^0 \cup L_5^1 \cup L_5^2 \cup \dots$$

$$= \{\epsilon\} \cup \{ab, ba\} \cup \{abab, abba, baab, baba\} \dots$$

$$= \{\epsilon, ab, ba, abab, abba, baab, baba, \dots\}$$

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
  - Descripción de los componentes léxicos
  - Palabras y lenguajes formales
  - Expresiones Regulares
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Definición (Expresión regular)

Expresiones regulares sobre  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$ :

- 1  $\emptyset$  es una expresión regular
- 2  $\epsilon$  es una expresión regular
- 3 Si  $\sigma \in \Sigma$  entonces  $\sigma$  es una expresión regular
- 4 Si  $\alpha$  y  $\beta$  son expresiones regulares entonces también son:
  - a)  $\alpha + \beta$
  - b)  $\alpha \cdot \beta$
  - c)  $(\alpha)$  (o  $(\beta)$ )
  - d)  $\alpha^* = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i = \alpha^0 + \alpha^1 + \alpha^2 + \dots$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Notas

- *La palabra vacía se puede representar por  $\epsilon$  o  $\lambda$*
- *La alternativa se puede representar por  $+$  o por  $|$*
- *El punto de la concatenación se suele omitir*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

Ejemplos (Expresiones regulares sobre  $\Sigma = \{0, 1\}$ )

- $\emptyset, \epsilon, 0, 1$
- $0 + \epsilon, \epsilon + 0, 0\epsilon, \epsilon 0$
- $1 + \epsilon, \epsilon + 1, 1\epsilon, \epsilon 1$
- $0 + 0, 0 + 1, 1 + 0, 1 + 1$
- $00, 01, 10, 11$
- $0^*, 1^*$
- $(0 + 1), (0 + 1)^*, 0^*(0 + 1)1^*$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Prioridad de los operadores de las expresiones regulares

+ Máxima prioridad ( )

\*

.

- Mínima prioridad +



## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

**Definición** (Lenguaje denotado por una expresión regular)

- 1  $L(\emptyset) = \emptyset$
- 2  $L(\epsilon) = \{\epsilon\}$
- 3 Si  $\sigma \in \Sigma$  entonces  $L(\sigma) = \{\sigma\}$
- 4 Si  $\alpha$  y  $\beta$  son expresiones regulares sobre  $\Sigma$ 
  - a)  $L(\alpha + \beta) = L(\alpha) \cup L(\beta)$
  - b)  $L(\alpha \cdot \beta) = L(\alpha) \cdot L(\beta)$
  - c)  $L((\alpha)) = L(\alpha)$
  - d)  $L(\alpha^*) = L(\sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i) = \bigcup_{i=0}^{\infty} L(\alpha^i) = \bigcup_{i=0}^{\infty} (L(\alpha))^i$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplos (Lenguajes denotados)

1 / 5

Dado  $\Sigma = \{0, 1\}$

- $L(0) = \{0\}$
- $L(0 + 1) = L(0) \cup L(1) = \{0\} \cup \{1\} = \{0, 1\}$
- $L(01) = L(0)L(1) = \{0\}\{1\} = \{01\}$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

**Ejemplo** (Lenguaje denotado)

2 / 5

$$\begin{aligned}L(1^*) &= L(\sum_{i=0}^{\infty} 1^i) = \bigcup_{i=0}^{\infty} L(1^i) \\ &= \bigcup_{i=0}^{\infty} (L(1))^i = \bigcup_{i=0}^{\infty} \{1\}^i \\ &= \{\epsilon, 1, 11, 111, \dots\}\end{aligned}$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

Ejemplo (Lenguaje denotado)

2 / 5

$$\begin{aligned}L(1^*) &= L(\sum_{i=0}^{\infty} 1^i) = \bigcup_{i=0}^{\infty} L(1^i) \\ &= \bigcup_{i=0}^{\infty} (L(1))^i = \bigcup_{i=0}^{\infty} \{1\}^i \\ &= \{\epsilon, 1, 11, 111, \dots\}\end{aligned}$$

*Palabras compuestas por cero o más unos*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

Ejemplo (Lenguaje denotado)

3 / 5

$$\begin{aligned}L((0 + 1)1^*) &= L((0 + 1))L(1^*) \\ &= L(0 + 1)L(1^*) \\ &= \{0, 1\}\{\epsilon, 1, 11, 111, \dots\} \\ &= \{0, 01, 011, 0111, \dots, 1, 11, 111, \dots\}\end{aligned}$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

Ejemplo (Lenguaje denotado)

3 / 5

$$\begin{aligned}L((0 + 1)1^*) &= L((0 + 1))L(1^*) \\ &= L(0 + 1)L(1^*) \\ &= \{0, 1\}\{\epsilon, 1, 11, 111, \dots\} \\ &= \{0, 01, 011, 0111, \dots, 1, 11, 111, \dots\}\end{aligned}$$

*Palabras que comienza por cero o por uno y van seguidas por cero o más unos*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

Ejemplo (Lenguaje denotado)

4 / 5

$$\begin{aligned}L(0^*(11)0^*) &= L(0^*)L((11))L(0^*) \\ &= \{\epsilon, 0, 00, 000, \dots\}\{11\}\{\epsilon, 0, 00, 000, \dots\} \\ &= \{11, 011, 0011, 00011, \dots\}\{\epsilon, 0, 00, 000, \dots\} \\ &= \{11, 0110, 00110, \dots, 00110, 001100, \dots\}\end{aligned}$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Lenguaje denotado)

4 / 5

$$\begin{aligned}L(0^*(11)0^*) &= L(0^*)L((11))L(0^*) \\ &= \{\epsilon, 0, 00, 000, \dots\}\{11\}\{\epsilon, 0, 00, 000, \dots\} \\ &= \{11, 011, 0011, 00011, \dots\}\{\epsilon, 0, 00, 000, \dots\} \\ &= \{11, 0110, 00110, \dots, 00110, 001100, \dots\}\end{aligned}$$

*Palabras que contienen a la cadena **11** y comienzan y terminan por una secuencia de ceros, posiblemente nula*



## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

**Ejemplo** (Lenguaje denotado)

5 / 5

Dado  $\Sigma = \{a, b, c, \dots, z\}$

$$\begin{aligned}L(a + b + c + \dots + z) &= L(a) \cup L(b) \cup L(c) \cup \dots \cup L(z) \\ &= \{a\} \cup \{b\} \cup \{c\} \cup \dots \cup \{z\} \\ &= \{a, b, c, \dots, z\}\end{aligned}$$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Definición (Definición regular)

- *Identificador que se asocia a una expresión regular*
- *Puede ser utilizado para definir nuevas expresiones regulares*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplos

- *letra* =  $(a + b + c + \dots + z)$
- *cifra* =  $(0 + 1 + \dots + 9)$
- *guion* =  $-$
- *subrayado* =  $_$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

**Ejemplos** (Identificadores de lenguajes de programación)● **Pascal:**
$$\textit{letra (letra + cifra)^*}$$
● **C:**
$$\textit{(subrayado + letra) (subrayado + letra + cifra)^*}$$
● **Cobol:**
$$\textit{letra (letra + cifra + guion (letra + cifra))^*}$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplos (Números en el Lenguaje C)

$$\textit{número} = \textit{parte\_entera} (\epsilon + \textit{parte\_decimal})$$

donde

$$\textit{parte\_entera} = \textit{cifra} \textit{cifra}^*$$
$$\textit{parte\_decimal}$$
$$= \textit{punto} \textit{cifra}^* (\epsilon + (E + e)(\epsilon + " - " + " + ")) \textit{cifra} \textit{cifra}^*$$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota (Abreviaturas)

- $\alpha? = \alpha + \epsilon = \epsilon + \alpha$
- $\alpha^+ = \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha$

### Ejemplo (Números en el Lenguaje C)

*número = parte\_entera parte\_decimal?*

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota (Abreviaturas)

- $\alpha? = \alpha + \epsilon = \epsilon + \alpha$
- $\alpha^+ = \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha$

### Ejemplo (Números en el Lenguaje C)

*número = parte\_entera parte\_decimal?*

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota

**Palabras claves:** *existe una expresión regular para cada palabra clave.*



# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Ejemplo (Palabras claves en C

1/3)

- **COMPONENTE LÉXICO:** *IF*
- **Expresión regular:** *if*
- **Paradigma:** *if*

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Ejemplo (Palabras claves en C

2/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *WHILE*
- **Expresión regular:** *while*
- **Paradigma:** *while*

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Ejemplo (Palabras claves en C

3/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *FOR*
- **Expresión regular:** *for*
- **Paradigma:** *for*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Palabras claves en FORTRAN)

1/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *DO*
- **Expresión regular:**  $(D+d)(O+o)$
- **Paradigma:** *DO, Do, dO, do*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Palabras claves en FORTRAN)

2/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *FORMAT*
- **Expresión regular:**  $(F+f)(O+o)(R+r)(M+m)(A+a)(T+t)$
- **Paradigma:** *FORMAT, ..., Format, ..., format*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Palabras claves en FORTRAN)

3/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *REAL*
- **Expresión regular:**  $(R+r)(E+e)(A+a)(L+l)$
- **Paradigma:** *REAL, ..., Real, ... real*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Palabras claves en Pascal)

1/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *INTEGER*
- **Expresión regular:**  
 $(I+i)(N+n)(T+t)(E+e)(G+g)(E+e)(R+r)$
- **Paradigma:** *INTEGER, ..., Integer, ..., integer*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Palabras claves en Pascal)

2/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *THEN*
- **Expresión regular:**  $(T+t)(H+h)(E+e)(N+n)$
- **Paradigma:** *THEN, ..., Then, ..., then*



## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Palabras claves en Pascal)

3/3

- **COMPONENTE LÉXICO:** *VAR*
- **Expresión regular:**  $(V+v)(A+a)(R+r)$
- **Paradigma:** *VAR, ..., Var, ..., var*

## Especificación de componentes léxicos

Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores aritméticos en C)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>SUMA</i>	<i>+</i>	<i>+</i>
<i>RESTA</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>MULTIPLICACIÓN</i>	<i>*</i>	<i>*</i>
<i>DIVISIÓN</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
<i>RESTO_DIVISIÓN_ENTERA</i>	<i>%</i>	<i>%</i>

## Especificación de componentes léxicos

Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores aritméticos en FORTRAN)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>SUMA</i>	<i>+</i>	<i>+</i>
<i>RESTA</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>MULTIPLICACIÓN</i>	<i>*</i>	<i>*</i>
<i>DIVISIÓN</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
<i>POTENCIA</i>	<i>**</i>	<i>**</i>

## Especificación de componentes léxicos

Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores aritméticos en PASCAL)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>SUMA</i>	<i>+</i>	<i>+</i>
<i>RESTA</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>MULTIPLICACIÓN</i>	<i>*</i>	<i>*</i>
<i>DIVISIÓN</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
<i>RESTO_DIVISIÓN_ENTERA</i>	<i>mod</i>	<i>mod</i>
<i>COCIENTE_DIVISIÓN_ENTERA</i>	<i>div</i>	<i>div</i>

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores relacionales en C)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>MENOR_QUE</i>	<	<
<i>MENOR_IGUAL_QUE</i>	<=	<=
<i>MAYOR_QUE</i>	>	>
<i>MAYOR_IGUAL_QUE</i>	>=	>=
<i>IGUAL</i>	==	==
<i>DISTINTO</i>	!=	!=

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores relacionales en FORTRAN)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>MENOR_QUE</i>	$.(L+l)(T+t).$	<i>.LT., ... .lt.</i>
<i>MENOR_IGUAL_QUE</i>	$.(L+l)(E+e).$	<i>.LE., ... .le.</i>
<i>MAYOR_QUE</i>	$.(G+g)(T+t).$	<i>.GT., ... .gt.</i>
<i>MAYOR_IGUAL_QUE</i>	$.(G+g)(E+e).$	<i>.GE., ... .ge.</i>
<i>IGUAL</i>	$.(E+e)(Q+q).$	<i>.EQ., ... .eq.</i>
<i>DISTINTO</i>	$.(N+n)(E+e).$	<i>.NE., ... .ne.</i>

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores relacionales en Pascal)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>MENOR_QUE</i>	<	<
<i>MENOR_IGUAL_QUE</i>	<=	<=
<i>MAYOR_QUE</i>	>	>
<i>MAYOR_IGUAL_QUE</i>	>=	>=
<i>IGUAL</i>	=	=
<i>DISTINTO</i>	<>	<>

## Especificación de componentes léxicos

Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores lógicos en C)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>NEGACIÓN_LÓGICA</i>	<i>!</i>	<i>!</i>
<i>CONJUNCIÓN_LÓGICA</i>	<i>&amp;&amp;</i>	<i>&amp;&amp;</i>
<i>DISYUNCIÓN_LÓGICA</i>	<i>  </i>	<i>  </i>



## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores lógicos en FORTRAN)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>NEGACIÓN_LÓGICA</i>	$.(N+n)(O+o)(T+t).$	<i>.NOT, ... .not.</i>
<i>CONJUNCIÓN_LÓGICA</i>	$.(A+a)(N+n)(T+t).$	<i>.AND., ... .and.</i>
<i>DISYUNCIÓN_LÓGICA</i>	$.(O+o)(R+r).$	<i>.OR., ... .or.</i>

## Especificación de componentes léxicos

Expresiones Regulares

## Ejemplo (Operadores lógicos en PASCAL)

COMPONENTE LÉXICO	Expresión regular	Paradigma
<i>NEGACIÓN_LÓGICA</i>	$(N+n)(O+o)(T+t)$	<i>NOT, ... not</i>
<i>CONJUNCIÓN_LÓGICA</i>	$(A+a)(N+n)(T+t)$	<i>AND, ... and</i>
<i>DISYUNCIÓN_LÓGICA</i>	$(O+o)(R+r)$	<i>OR, ... or</i>

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota

- *El analizador sintáctico sólo necesita saber **cuál** es el componente léxico reconocido*
- *No necesita saber **cómo** es dicho componente léxico.*

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

**Definición** (Equivalencia de expresiones regulares)

$\alpha$  y  $\beta$  son **equivalentes** si y sólo si denotan el mismo lenguaje:

$$L(\alpha) = L(\beta)$$

$$\alpha \equiv \beta \iff L(\alpha) = L(\beta)$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Ejemplo

Se verifica que

$$aa^* \equiv a^*a$$

porque

$$\begin{aligned}L(aa^*) &= L(a)L(a^*) \\ &= \{a\}\{\epsilon, a, aa, \dots\} \\ &= \{a, aa, aaa, \dots\} \\ &= \{\epsilon, a, aa, \dots\}\{a\} \\ &= L(a^*)L(a) \\ &= L(a^*a)\end{aligned}$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$



## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

- 1.- **Disyunción idempotente:**  $\alpha + \alpha = \alpha$
- 2.- **Disyunción asociativa:**  $\alpha + (\beta + \gamma) = (\alpha + \beta) + \gamma$
- 3.- **Disyunción conmutativa:**  $\alpha + \beta = \beta + \alpha$
- 4.- **Concatenación asociativa:**  $\alpha (\beta \gamma) = (\alpha \beta) \gamma$
- 5.- **Concatenación no conmutativa:**  $\alpha \beta \neq \beta \alpha$
- 6.- **Distributiva:**  $\alpha (\beta + \gamma) = \alpha \beta + \alpha \gamma$
- 7.- **Elemento neutro de la disyunción:**  $\alpha + \emptyset = \emptyset + \alpha = \alpha$
- 8.- **Elemento neutro de la concatenación:**  $\alpha \epsilon = \epsilon \alpha = \alpha$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$



## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$\begin{aligned} L(\emptyset^*) &= (L(\emptyset))^* &&= (\emptyset)^* \\ &= \bigcup_{i=0}^{\infty} \emptyset^i &&= \emptyset^0 \cup \emptyset^1 \cup \emptyset^2 \dots \\ &= \{\epsilon\} \cup \emptyset \cup \emptyset \dots \\ &= \{\epsilon\} &&= L(\epsilon) \end{aligned}$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- (\alpha^* \beta)^* = \alpha^* \beta^*$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$

## Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

## Propiedades de las expresiones regulares

$$9.- \alpha \emptyset = \emptyset \alpha = \emptyset$$

$$10.- \epsilon^* = \epsilon$$

$$11.- \emptyset^* = \epsilon$$

$$12.- \alpha^* \alpha^* = \alpha^*$$

$$13.- \alpha \alpha^* = \alpha^* \alpha = \alpha^+$$

$$14.- (\alpha^*)^* = \alpha^*$$

$$15.- \alpha^* = \epsilon + \alpha \alpha^*$$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Capacidad de las expresiones regulares

- Denotan los componentes léxicos
- Pueden denotar
  - + Un número **fijo** de repeticiones: *aaaaa*
  - + Un número **arbitrario** de repeticiones: *a\**
  - + Repeticiones **no** coordinadas

### Ejemplo

$$\begin{aligned}L_1 &= \{a^i b^j \mid i, j \geq 0\} \\ &= \{\epsilon, a, aa, aaa, \dots b, ab, aab, \dots\} \\ &= \{\epsilon, a, aa, aaa, \dots\} \{\epsilon, b, bb, bbb\} \\ &= L(a^*b^*)\end{aligned}$$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Capacidad de las expresiones regulares

- Denotan los componentes léxicos
- Pueden denotar
  - + Un número **fijo** de repeticiones: *aaaaa*
  - + Un número **arbitrario** de repeticiones: *a\**
  - + Repeticiones **no** coordinadas

### Ejemplo

$$\begin{aligned}L_1 &= \{a^i b^j \mid i, j \geq 0\} \\ &= \{\epsilon, a, aa, aaa, \dots b, ab, aab, \dots\} \\ &= \{\epsilon, a, aa, aaa, \dots\} \{\epsilon, b, bb, bbb\} \\ &= L(a^*b^*)\end{aligned}$$

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota (Limitaciones de las expresiones regulares)

- *No pueden denotar características sintácticas*
- *No pueden denotar repeticiones coordinadas*



# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota (Limitaciones de las expresiones regulares)

- *No pueden denotar características **sintácticas***
- *No pueden denotar repeticiones **coordinadas***

### Ejemplo

*Lenguaje que no puede ser denotado por una expresión regular*

$$L_2 = \{a^i b^i \mid i \geq 0\} = \{\epsilon, ab, aabb, aaabbb, \dots\}$$

*$L_2$  no es un lenguaje regular.*

# Especificación de componentes léxicos

## Expresiones Regulares

### Nota (Limitaciones de las expresiones regulares)

- *No pueden denotar características **sintácticas***
- *No pueden denotar repeticiones **coordinadas***

### Ejemplo

$L_2 = \{a^i b^i | i \geq 0\}$  representa a **muchas estructuras sintácticas** de los lenguajes de programación:

- + *Balanceo de paréntesis, llaves o corchetes.*
- + *Paso de parámetros*
- + *Etc.*

# Contenido del tema

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos**
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
  - Autómatas finitos
    - Autómatas finitos deterministas: AFD
    - Autómatas finitos NO deterministas: AFN
    - Minimización de autómatas finitos deterministas
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos

## COMPONENTES LÉXICOS

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos

COMPONENTES LÉXICOS



EXPRESIONES REGULARES

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos



# Reconocimiento de componentes léxicos

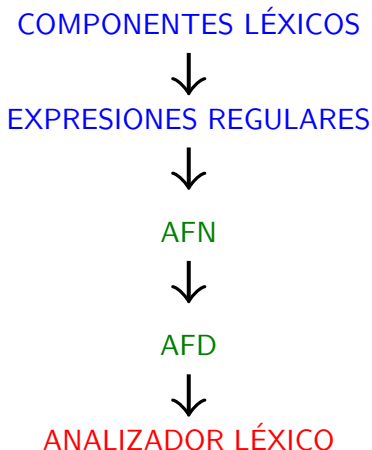
Autómatas finitos





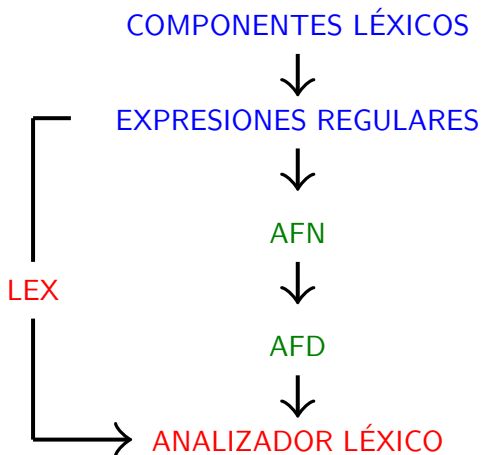
## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos



# Reconocimiento de componentes léxicos

## Autómatas finitos

- **Expresiones regulares:** denotan componentes léxicos.
- **Autómatas finitos:** reconocen componentes léxicos:
  - + Autómata finito no determinista: AFN
  - + Autómata finito determinista: AFD
- Generación de autómatas finitos a partir de expresiones regulares:

Paso 1.- Algoritmo de **Thompson**: genera un AFN a partir de una expresión regular

Paso 2.- Algoritmo de **Construcción de subconjuntos**: genera un AFD a partir de un AFN.

# Reconocimiento de componentes léxicos

## Autómatas finitos

- **Expresiones regulares:** denotan componentes léxicos.
- **Autómatas finitos:** reconocen componentes léxicos:
  - + Autómata finito no determinista: **AFN**
  - + Autómata finito determinista: **AFD**
- Generación de autómatas finitos a partir de expresiones regulares:

Paso 1.- Algoritmo de **Thompson**: genera un AFN a partir de una expresión regular

Paso 2.- Algoritmo de **Construcción de subconjuntos**: genera un AFD a partir de un AFN.

# Reconocimiento de componentes léxicos

## Autómatas finitos

- **Expresiones regulares:** denotan componentes léxicos.
- **Autómatas finitos:** reconocen componentes léxicos:
  - + Autómata finito no determinista: **AFN**
  - + Autómata finito determinista: **AFD**
- **Generación** de autómatas finitos a partir de expresiones regulares:

**Paso 1.-** Algoritmo de **Thompson:** genera un AFN a partir de una expresión regular

**Paso 2.-** Algoritmo de **Construcción de subconjuntos:** genera un AFD a partir de un AFN.

## Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
  - Autómatas finitos
  - Autómatas finitos deterministas: AFD
  - Autómatas finitos NO deterministas: AFN
  - Minimización de autómatas finitos deterministas
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

- Descripción general
- Definición formal
- Función de transición para palabras
- Representación gráfica
- Lenguaje reconocido por un AFD

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

- Descripción general
- Definición formal
- Función de transición para palabras
- Representación gráfica
- Lenguaje reconocido por un AFD



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Definición (Autómata finito determinista: AFD)

- *Dispositivo formal que permite **reconocer** si una palabra pertenece o no a un lenguaje regular.*
- *También se denomina “**máquina reconocedora o aceptadora**”*

# Reconocimiento de componentes léxicos

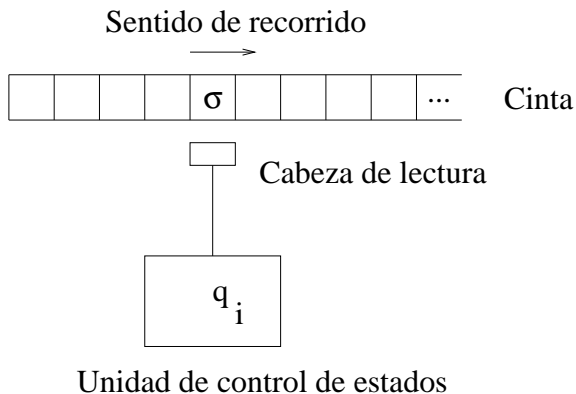
Autómatas finitos deterministas: AFD

## Componentes de un AFD

- **Cinta de lectura:**
  - + Dividida en celdas.
  - + Infinita hacia la derecha.
- **Cabeza de lectura:**
  - + Lee el símbolo actual de la cinta.
  - + Sólo se puede mover hacia la derecha.
- **Alfabeto de la cinta**
- **Unidad de control de estados:** indica el estado actual.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD



Componentes básicos de un autómata finito determinista.

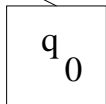
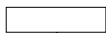
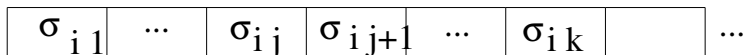
# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

Pasos del AFD para reconocer a  $x = \sigma_{i_1} \dots \sigma_{i_j} \sigma_{i_{j+1}} \dots \sigma_{i_k} \in \Sigma^*$

## Reconocimiento de componentes léxicos

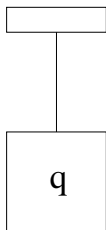
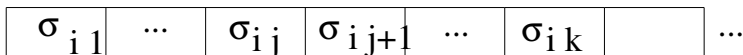
Autómatas finitos deterministas: AFD

Pasos del AFD para reconocer a  $x = \sigma_{i_1} \dots \sigma_{i_j} \sigma_{i_{j+1}} \dots \sigma_{i_k} \in \Sigma^*$ 

Configuración inicial

## Reconocimiento de componentes léxicos

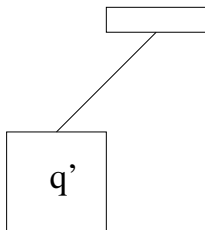
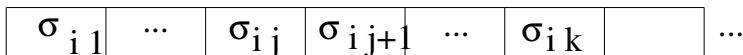
Autómatas finitos deterministas: AFD

Pasos del AFD para reconocer a  $x = \sigma_{i_1} \dots \sigma_{i_j} \sigma_{i_{j+1}} \dots \sigma_{i_k} \in \Sigma^*$ 

Transición: situación anterior

## Reconocimiento de componentes léxicos

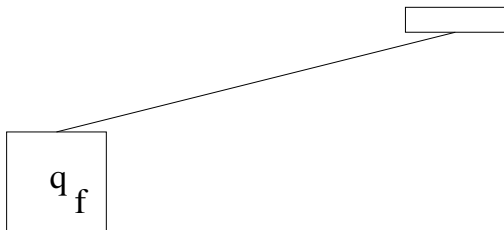
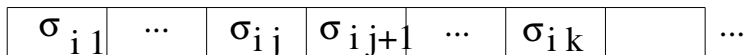
Autómatas finitos deterministas: AFD

Pasos del AFD para reconocer a  $x = \sigma_{i_1} \dots \sigma_{i_j} \sigma_{i_{j+1}} \dots \sigma_{i_k} \in \Sigma^*$ 

Transición: situación posterior

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

Pasos del AFD para reconocer a  $x = \sigma_{i_1} \dots \sigma_{i_j} \sigma_{i_{j+1}} \dots \sigma_{i_k} \in \Sigma^*$ 

Configuración final



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

- Descripción general
- Definición formal
- Función de transición para palabras
- Representación gráfica
- Lenguaje reconocido por un AFD

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Definición (Autómata finito determinista)

$$A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$$

*donde*

- $Q$ : conjunto finito de **estados**
- $\Sigma$ : **alfabeto** de símbolos de entrada
- $\delta$ : **función de transición** entre estados:

$$\begin{aligned}\delta : Q \times \Sigma &\longrightarrow Q \\ \delta(q, \sigma) &= q'\end{aligned}$$

- $q_0 \in Q$ : estado **inicial**
- $F \subseteq Q$ : conjunto de estados **finales**

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (AFD que reconoce identificadores de COBOL)

	$\delta$	$l$	$d$	$g$
$\rightarrow$	$q_0$	$q_1$	$q_3$	$q_3$
$\leftarrow$	$q_1$	$q_1$	$q_1$	$q_2$
	$q_2$	$q_1$	$q_1$	$q_3$
	$q_3$	$q_3$	$q_3$	$q_3$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (AFD que reconoce identificadores de COBOL)

Los componentes del autómata son:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3\}$
- $F = \{q_1\}$
- El símbolo " $\rightarrow$ " indica el estado *inicial*.
- El símbolo " $\leftarrow$ " indica los estados  *finales*.
- $\Sigma = \{l, d, g\}$  donde:  $l = \text{letra}$ ,  $d = \text{dígito}$  y  $g = \text{guion}$ .

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

- Descripción general
- Definición formal
- Función de transición para palabras
- Representación gráfica
- Lenguaje reconocido por un AFD

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Definición (Función de transición para palabras)

$$\hat{\delta} : Q \times \Sigma^* \longrightarrow Q$$

$$\hat{\delta}(q, \epsilon) = q \in Q$$

$$\hat{\delta}(q, x\sigma) = \delta(\hat{\delta}(q, x), \sigma) \in Q \quad \forall x \in \Sigma^* \wedge \sigma \in \Sigma$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Notas

- $\hat{\delta}$  y  $\delta$  coinciden sobre símbolos de  $\Sigma$ :

$$\hat{\delta}(q, \sigma) = \hat{\delta}(q, \epsilon \cdot \sigma) = \delta(\hat{\delta}(q, \epsilon), \sigma) = \delta(q, \sigma) \quad \forall \sigma \in \Sigma$$

- $\hat{\delta}(q, xy) = \hat{\delta}(\hat{\delta}(q, x), y) \quad \forall x, y \in \Sigma^*$

- $\hat{\delta}(q, \sigma x) = \hat{\delta}(\hat{\delta}(q, \sigma), x) = \hat{\delta}(\delta(q, \sigma), x)$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo

$$\begin{aligned}\hat{\delta}(q_0, x) &= \hat{\delta}(q_0, llgd) \\ &= \delta(\delta(\hat{\delta}(q_0, ll), g), d) \\ &= \delta(\delta(\delta(\hat{\delta}(q_0, l), l), g), d) \\ &= \delta(\delta(\delta(\delta(q_0, l), l), g), d) \\ &= \delta(\delta(\delta(q_1, l), g), d) \\ &= \delta(\delta(q_1, g), d) \\ &= \delta(q_2, d) \\ &= q_1 \in F\end{aligned}$$



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Nota

$x = llgd$  es **reconocida** por el AFD porque  $q_1$  es un estado **final**.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Nota

Existe una **notación más simple** para el reconocimiento de un AFD.

## Ejemplo

$$\begin{aligned}(q_0, llgd) &\vdash (q_1, lgd) \\ &\vdash (q_1, gd) \\ &\vdash (q_2, d) \\ &\vdash (q_1, \epsilon)\end{aligned}$$

o simplemente  $(q_0, llgd) \vdash^* (q_1, \epsilon)$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Nota

Existe una **notación más simple** para el reconocimiento de un AFD.

## Ejemplo

$$\begin{aligned}(q_0, llgd) &\vdash (q_1, lgd) \\ &\vdash (q_1, gd) \\ &\vdash (q_2, d) \\ &\vdash (q_1, \epsilon)\end{aligned}$$

o simplemente  $(q_0, llgd) \vdash^* (q_1, \epsilon)$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Nota

Existe una **notación más simple** para el reconocimiento de un AFD.

## Ejemplo

$$\begin{aligned}(q_0, llgd) &\vdash (q_1, lgd) \\ &\vdash (q_1, gd) \\ &\vdash (q_2, d) \\ &\vdash (q_1, \epsilon)\end{aligned}$$

o simplemente  $(q_0, llgd) \vdash^* (q_1, \epsilon)$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Lenguaje reconocido por un AFD

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Definición (Representación gráfica de un AFD)

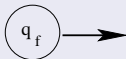
## Grafo dirigido:

- *Número de nodos = cardinal(Q).*
- *Etiqueta de cada nodo  $\in Q$ .*

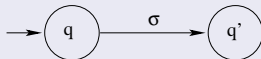
- *Estado inicial:*



- *Estados finales:*



- *Si  $\delta(q, \sigma) = q'$  entonces*

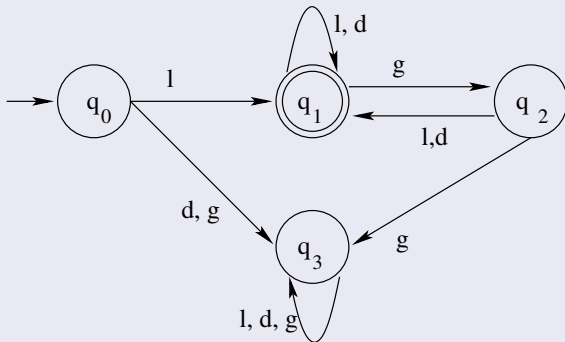


- *Se **agrupan** las aristas que enlazan los mismos estados.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

Ejemplo (AFD que reconoce identificadores de COBOL)

*Representación gráfica de un AFD.*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Lenguaje reconocido por un AFD



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

**Definición** (Lenguaje reconocido por un AFD)

$$L(A) = \{x \mid x \in \Sigma^* \wedge \hat{\delta}(q_0, x) \in F\}$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Notas

- Si  $F = Q$  entonces  $L(A) = \Sigma^*$
- Si  $F = \emptyset$  entonces  $L(A) = \emptyset$
- $q_0 \in F$  si y sólo si  $\epsilon \in L(A)$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo

$$L(A) = L(l(l + d + g(l + d))^*)$$

*Lenguaje reconocido por un AFD que reconoce identificadores de COBOL*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (Lenguaje reconocido por un AFD)

*Función de transición*

	$\delta$	$a$	$b$
$\rightarrow$	$q_0$	$q_0$	$q_1$
$\leftarrow$	$q_1$	$q_2$	$q_1$
$\leftarrow$	$q_2$	$q_2$	$q_2$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (Lenguaje reconocido por un AFD)

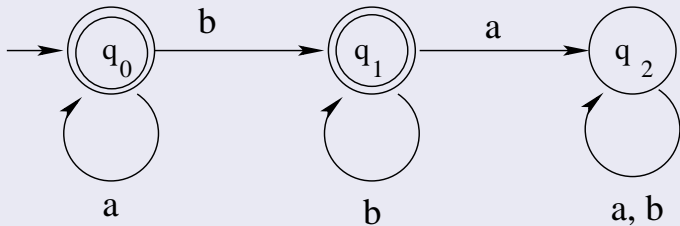
*Los componentes del autómata son:*

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $F = \{q_0, q_1\}$
- $\Sigma = \{a, b, c\}$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (Lenguaje reconocido por un AFD)



$a \dots a$

$b$

$b \dots b$

$$L(A) = L(a^* b^*)$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Nota

*El estado  $q_2$  es inútil o superfluo*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (Lenguaje reconocido por un AFD)

$$\begin{aligned}\hat{\delta}(q_0, aabb) &= \hat{\delta}(\delta(q_0, a), abb) \\ &= \hat{\delta}(\delta(q_0, a), bb) \\ &= \hat{\delta}(\delta(q_0, b), b) \\ &= \hat{\delta}(q_1, b) \\ &= \delta(q_1, b) \\ &= q_1 \in F\end{aligned}$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

## Ejemplo (Lenguaje reconocido por un AFD)

$$\begin{aligned}(q_0, aabb) &\vdash (q_0, abb) \\ &\vdash (q_0, bb) \\ &\vdash (q_1, b) \\ &\vdash (q_1, \epsilon)\end{aligned}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

**Ejemplo** (AFD que reconoce identificadores de C)*Función de transición*

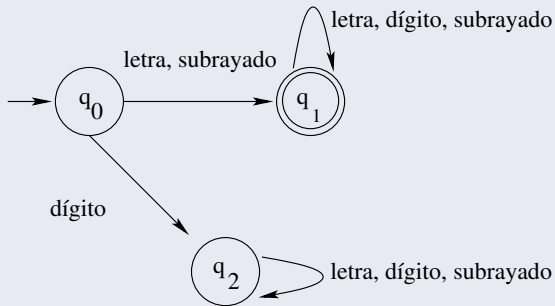
$\delta$	<i>letra</i>	<i>subrayado</i>	<i>dígito</i>
→ $q_0$	$q_1$	$q_1$	$q_2$
← $q_1$	$q_1$	$q_1$	$q_1$
$q_2$	$q_2$	$q_2$	$q_2$

**Nota***El estado  $q_2$  es **superfluo***

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

Ejemplo (AFD que reconoce identificadores de C)

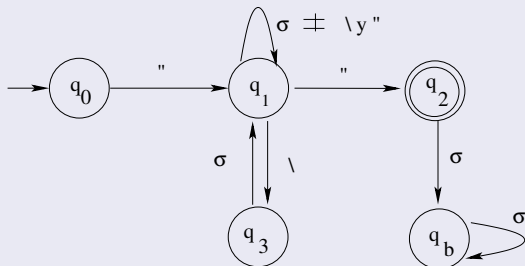


$$L(A) = L((letra + subrayado)(letra + subrayado + dígito)^*)$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos deterministas: AFD

**Ejemplo** (AFD que reconoce cadenas de caracteres)



$$L(A) = L(" (letra + \dots) (BARRA" + letra + \dots)^* ")$$

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
  - Autómatas finitos
  - Autómatas finitos deterministas: AFD
  - **Autómatas finitos NO deterministas: AFN**
  - Minimización de autómatas finitos deterministas
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Definición (Autómata finito NO determinista: AFN)

- *Un autómata finito es **no** determinista si posee alguna de las siguientes transiciones:*
  - **Transición  $\epsilon$ :** *no lee el símbolo actual pero cambia de estado*
  - **Transición múltiple:** *puede cambiar a más de un estado.*
- *Estos tipos de transiciones **no** son **excluyentes**.*



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Definición (Autómata finito NO determinista: AFN)

$$A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$$

- $Q$ : conjunto finito de estados
- $\Sigma$ : alfabeto de símbolos de entrada
- $\delta$ : función de transición entre estados:  
$$\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \longrightarrow \mathcal{P}(Q)$$
$$\delta(q, \epsilon) \subseteq Q$$
$$\delta(q, \sigma) \subseteq Q$$
- $q_0 \in Q$ : estado inicial
- $F \subseteq Q$ : conjunto de estados finales
- $\mathcal{P}(Q)$ : conjunto de las partes de  $Q$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Definición (Transición ( $\epsilon$ ) **trivial**)

$$q \in \delta(q, \epsilon) \quad \forall q \in Q$$

## Nota

*Las transiciones triviales siempre existen y se suponen tácitamente por defecto.*

Definición (Transición ( $\epsilon$ ) **no trivial**)

$$q' \in \delta(q, \epsilon) \quad \wedge \quad q \neq q'$$

## Nota

*Si existen, estas transiciones se han de indicar expresamente.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Definición (Transición ( $\epsilon$ ) **trivial**)

$$q \in \delta(q, \epsilon) \quad \forall q \in Q$$

## Nota

*Las transiciones triviales siempre existen y se suponen tácitamente por defecto.*

Definición (Transición ( $\epsilon$ ) **no trivial**)

$$q' \in \delta(q, \epsilon) \quad \wedge \quad q \neq q'$$

## Nota

*Si existen, estas transiciones se han de indicar expresamente.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Definición** (Transición ( $\epsilon$ ) **trivial**)

$$q \in \delta(q, \epsilon) \quad \forall q \in Q$$

**Nota**

*Las transiciones triviales siempre existen y se suponen tácitamente por defecto.*

**Definición** (Transición ( $\epsilon$ ) **no trivial**)

$$q' \in \delta(q, \epsilon) \quad \wedge \quad q \neq q'$$

**Nota**

*Si existen, estas transiciones se han de indicar expresamente.*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Definición (Transición ( $\epsilon$ ) trivial)

$$q \in \delta(q, \epsilon) \quad \forall q \in Q$$

## Nota

*Las transiciones triviales siempre existen y se suponen tácitamente por defecto.*

## Definición (Transición ( $\epsilon$ ) no trivial)

$$q' \in \delta(q, \epsilon) \quad \wedge \quad q \neq q'$$

## Nota

*Si existen, estas transiciones se han de indicar expresamente.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo

$\delta$	$a$	$b$	$\epsilon$
→ $q_0$	$\{q_1\}$	$\emptyset$	$\{q_0, q_1\}$
$q_1$	$\emptyset$	$\{q_3, q_4\}$	$\{q_1, q_2\}$
$q_2$	$\emptyset$	$\{q_5\}$	$\{q_2\}$
$q_3$	$\{q_2\}$	$\emptyset$	$\{q_3\}$
$q_4$	$\{q_4, q_5\}$	$\emptyset$	$\{q_2, q_4\}$
← $q_5$	$\emptyset$	$\{q_5\}$	$\{q_3, q_5\}$

Las transiciones *triviales* se pueden omitir.

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Nota

*Un AFD puede considerarse un caso especial de AFN:*

- *No existen transiciones- $\epsilon$  no triviales.*
- *y no existen transiciones múltiples, es decir,*

$$\delta(q, \sigma) = \{q'\}$$



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN


- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

## Reconocimiento de componentes léxicos

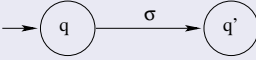
Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Definición (AFN: representación gráfica)

- Número de nodos del grafo =  $\text{cardinal}(Q)$ .
- Etiqueta de cada nodo  $\in Q$ .

- Estado inicial: 

- Estados finales:  

- Si  $q' \in \delta(q, \sigma)$  entonces 

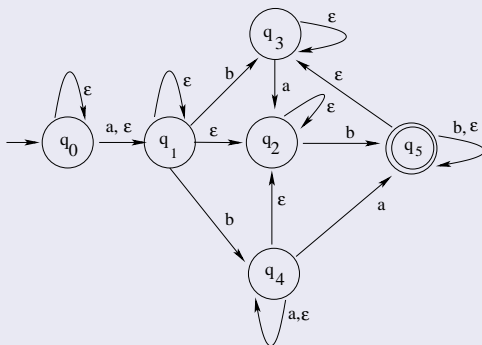
- Si  $q' \in \delta(q, \epsilon)$  entonces 

- Las aristas de las transiciones- $\epsilon$  *triviales* se pueden omitir.
- Se agrupan las aristas que enlazan los mismos estados.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

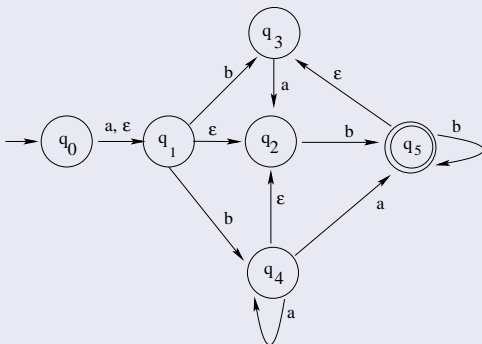
## Ejemplo

*AFN con transiciones triviales*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo



*AFN sin transiciones triviales*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Función de transición para palabras en un AFN:
  - + Clausura -  $\epsilon$  aplicada a estados
  - + Clausura -  $\epsilon$  aplicada a conjuntos de estados
  - + Función de transición para palabras:  $\hat{\delta}$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Definición (Clausura -  $\epsilon$  aplicada a estados)

$$\text{clausura} - \epsilon : Q \longrightarrow \mathcal{P}(Q)$$

Si  $q \in Q$ 

- +  $q \in \text{clausura} - \epsilon(q)$
- + Si  $q' \in \text{clausura} - \epsilon(q) \wedge q'' \in \delta(q', \epsilon)$   
entonces  $q'' \in \text{clausura} - \epsilon(q)$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Definición (Clausura - $\epsilon$ aplicada a estados)

*Segunda versión*

$$\text{clausura} - \epsilon : Q \longrightarrow \mathcal{P}(Q)$$

$$\text{clausura} - \epsilon(q) = \{q' \mid q' \in Q \wedge \exists \text{un camino de } q \text{ a } q' \\ \text{con las aristas etiquetadas con } \epsilon\}$$

## Nota

*Siempre se verifica que  $q \in \text{clausura} - \epsilon(q)$*



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplos (Clausura- $\epsilon$  de los estados del AFD anterior)

$$\text{clausura} - \epsilon(q_0) = \{q_0, q_1, q_2\}$$

$$\text{clausura} - \epsilon(q_1) = \{q_1, q_2\}$$

$$\text{clausura} - \epsilon(q_2) = \{q_2\}$$

$$\text{clausura} - \epsilon(q_3) = \{q_3\}$$

$$\text{clausura} - \epsilon(q_4) = \{q_2, q_4\}$$

$$\text{clausura} - \epsilon(q_5) = \{q_3, q_5\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Definición** (Clausura -  $\epsilon$  aplicada a conjuntos de estados)

$$\text{clausura} - \epsilon : \mathcal{P}(Q) \longrightarrow \mathcal{P}(Q)$$

Si  $P \subseteq Q$ 

- +  $P \in \text{clausura} - \epsilon(P)$
- + Si  $q' \in \text{clausura} - \epsilon(P) \wedge q'' \in \delta(q', \epsilon)$   
entonces  $q'' \in \text{clausura} - \epsilon(P)$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Definición** (Clausura -  $\epsilon$  aplicada a conjuntos de estados)*Segunda versión*Si  $P \subseteq Q$  entonces

$$\text{clausura} - \epsilon(P) = \bigcup_{q \in P} \text{clausura} - \epsilon(q)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Clausura- $\epsilon$  de un conjunto de estados)

$$\begin{aligned} \text{clausura} - \epsilon(\{q_1, q_3\}) &= \bigcup_{q \in \{q_1, q_3\}} \text{clausura} - \epsilon(q) \\ &= \text{clausura} - \epsilon(q_1) \cup \text{clausura} - \epsilon(q_3) \\ &= \{q_1, q_2\} \cup \{q_3\} \\ &= \{q_1, q_2, q_3\} \end{aligned}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Clausura- $\epsilon$  de un conjunto de estados)

$$\begin{aligned} \text{clausura} - \epsilon(\{q_0, q_5\}) &= \bigcup_{q \in \{q_0, q_5\}} \text{clausura} - \epsilon(q) \\ &= \text{clausura} - \epsilon(q_0) \cup \text{clausura} - \epsilon(q_5) \\ &= \{q_0, q_1, q_2\} \cup \{q_3, q_5\} \\ &= \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_5\} \end{aligned}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Definición (Función de transición para palabras)

$$\hat{\delta} : Q \times \Sigma^* \longrightarrow \mathcal{P}(Q)$$

$$\hat{\delta}(q, \epsilon) = \text{clausura} - \epsilon(q)$$

$$\hat{\delta}(q, x\sigma) = \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q, x)} \delta(q', \sigma) \right)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Definición** (Función de transición para palabras)*En particular*

$$\begin{aligned} + \hat{\delta}(q, \sigma) &= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q, \epsilon)} \delta(q', \sigma) \right) \\ &= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \text{clausura} - \epsilon(q)} \delta(q', \sigma) \right) \end{aligned}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

1 / 8)

$$\begin{aligned}\hat{\delta}(q_0, x) &= \hat{\delta}(q_0, abb) \\ &= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q_0, ab)} \delta(q', b) \right)\end{aligned}$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

2 / 8)

$$\hat{\delta}(q_0, ab) = \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q_0, a)} \delta(q', b) \right)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

3 / 8)

$$\hat{\delta}(q_0, a) = \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q_0, \epsilon)} \delta(q', a) \right)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

4 / 8)

$$\begin{aligned}\hat{\delta}(q_0, \epsilon) &= \textit{clausura} - \epsilon(q_0) \\ &= \{q_0, q_1, q_2\}\end{aligned}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

5 / 8)

Se sustituye  $\hat{\delta}(q_0, \epsilon)$  en  $\hat{\delta}(q_0, a)$ :

$$\begin{aligned}
 \hat{\delta}(q_0, a) &= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q_0, \epsilon)} \delta(q', a) \right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \{q_0, q_1, q_2\}} \delta(q', a) \right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta(q_0, a) \cup \delta(q_1, a) \cup \delta(q_2, a)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_1\} \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \{q_1, q_2\}
 \end{aligned}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

6 / 8)

Se sustituye  $\hat{\delta}(q_0, a)$  en  $\hat{\delta}(q_0, ab)$ :

$$\hat{\delta}(q_0, ab) = \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q_0, a)} \delta(q', b) \right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \{q_1, q_2\}} \delta(q', b) \right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon (\delta(q_1, b) \cup \delta(q_2, b))$$

$$= \text{clausura} - \epsilon (\{q_3, q_4\} \cup \{q_5\})$$

$$= \text{clausura} - \epsilon (\{q_3, q_4, q_5\})$$

$$= \{q_2, q_3, q_4, q_5\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo (Reconocimiento de una palabra:

7 / 8)

Por último, se sustituye  $\hat{\delta}(q_0, ab)$  en  $\hat{\delta}(q_0, abb)$ :

$$\hat{\delta}(q_0, abb) = \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \hat{\delta}(q_0, ab)} \delta(q', b) \right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon \left( \bigcup_{q' \in \{q_2, q_3, q_4, q_5\}} \delta(q', b) \right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon(\delta(q_2, b) \cup \delta(q_3, b) \cup \delta(q_4, b) \cup \delta(q_5, b))$$

$$= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\} \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \{q_5\})$$

$$= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) = \{q_3, q_5\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Reconocimiento de una palabra:

8 / 8)

 $x = abb \in L(A)$  porque

$$\hat{\delta}(q_0, abb) \cap F = \{q_3, q_5\} \cap F = \{q_5\} \neq \emptyset$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Definición** (Lenguaje reconocido por un AFN)

$$L(A) = \{x \mid x \in \Sigma^* \wedge \hat{\delta}(q_0, x) \cap F \neq \emptyset\}$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Necesidad de convertir AFN en AFD

- Calcular  $\hat{\delta}(q_0, x)$  es un AFN muy **tedioso**.
- Se suele **evitar** el uso de AFN.
- AFN y AFD tienen la **misma capacidad** de reconocimiento.
- Paso de AFN a AFD: **algoritmo de Construcción de subconjuntos**.
- Se ha de **extender** la definición de la función de transición a **subconjuntos** de  $Q$ .

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Definición** (Extensión de  $\delta$  a subconjuntos de  $Q$ )

$$\delta : \mathcal{P}(Q) \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \longrightarrow \mathcal{P}(Q)$$
$$\delta(P, \sigma) = \bigcup_{q \in P} \delta(q, \sigma)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Aplicación de  $\hat{\delta}$  a  $p \subseteq Q$ )*Sea el AFN anterior y  $p = \{q_0, q_3\}$ :*

$$\begin{aligned}\delta(p, a) &= \delta(\{q_0, q_3\}, a) \\ &= \bigcup_{q \in \{q_0, q_3\}} \delta(q, a) \\ &= \delta(q_0, a) \cup \delta(q_3, a) \\ &= \{q_1\} \cup \{q_2\} \\ &= \{q_1, q_2\}\end{aligned}$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Teorema

*Dado un AFN  $A_N$ , se puede construir otro AFD  $A_D$  equivalente:*

$$L(A_N) = L(A_D)$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Demostración

*AFN*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Demostración

AFN



*Algoritmo de Construcción de subconjuntos*



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Demostración

AFN

*Algoritmo de Construcción de subconjuntos*

AFD

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Demostración

## Algoritmo (Construcción de subconjuntos)

- *Entrada:*  $A_N = (Q_N, \Sigma, \delta_N, q_0, F_N)$
- *Salida:*  $A_D = (Q_D, \Sigma, \delta_D, p_0, F_D)$

**Algoritmo** (Construcción de subconjuntos)**inicio** $p_0 \leftarrow \text{clausura} - \epsilon(q_0)$  ;  $Q_D \leftarrow \{p_0\}$  y  $p_0$  no marcado**mientras** haya un estado  $p \in Q_D$  no marcado **hacer**    Marcar a  $p$     **para** cada  $\sigma \in \Sigma$  **hacer**         $p' \leftarrow \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p, \sigma))$         **si**  $p' \notin Q_D$  **entonces**             $Q_D \leftarrow Q_D \cup \{p'\}$  y  $p'$  no marcado        **fin\_si**        Definir  $\delta_D(p, \sigma) \leftarrow p'$     **fin para****fin mientras** $F_D \leftarrow \{p_i \mid F_N \cap p_i \neq \emptyset\}$ **fin**

## Reconocimiento de componentes léxicos

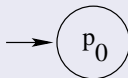
Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 0:** Estado inicial del AFD:

$$p_0 = \text{clausura} - \epsilon(q_0) = \{q_0, q_1, q_2\}$$
$$Q_D = \{p_0\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 0:** *estado inicial  $p_0$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 1:** *Transiciones de  $p_0 = \{q_0, q_1, q_2\}$* *Se marca el estado  $p_0$ :*

$$Q_D = \{\underline{p}_0\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0, q_1, q_2\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_0, a)) &= \\
 &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_0} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in \{q_0, q_1, q_2\}} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_0, a) \cup \delta_N(q_1, a) \cup \delta_N(q_2, a)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_1\} \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_1\}) = \{q_1, q_2\} = p_1
 \end{aligned}$$

Por tanto,  $\delta_D(p_0, a) = p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0, q_1, q_2\}$ *Como*  $p_1 \notin Q_D$ :

$$Q_D = Q_D \cup \{p_1\} = \{\underline{p}_0, p_1\}$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0, q_1, q_2\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_0, b)) &= \\
 &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_0} \delta_N(q, b)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_0, b) \cup \delta_N(q_1, b) \cup \delta_N(q_2, b)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \{q_3, q_4\} \cup \{q_5\}) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_3, q_4, q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_5\} = p_2
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_0, b) = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

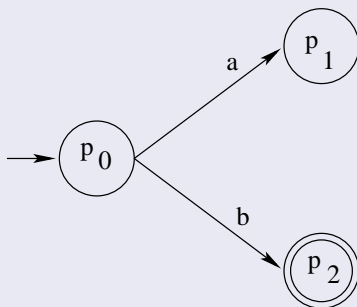
**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 1:** *Transiciones de  $p_0 = \{q_0, q_1, q_2\}$* *Como  $p_2 \notin Q_D$ :*

$$Q_D = Q_D \cup \{p_2\} = \{\underline{p}_0, p_1, p_2\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 1:** *transiciones de  $p_0$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 2:** *Transiciones de*  $p_1 = \{q_1, q_2\}$ *Se marca el estado*  $p_1$ :

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, p_2\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

Paso 2: Transiciones de  $p_1 = \{q_1, q_2\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_1, a)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_1} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_1, a) \cup \delta_N(q_2, a)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset) = \emptyset
 \end{aligned}$$

Por tanto,  $\delta_D(p_1, a) = -$ , es decir, está *indefinida*.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

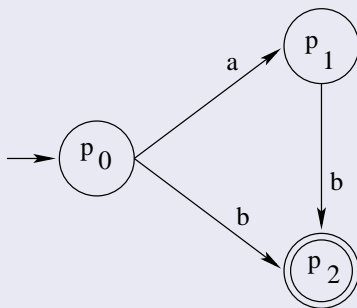
Paso 2: Transiciones de  $p_1 = \{q_1, q_2\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_1, b)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_1} \delta_N(q, b)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_1, b) \cup \delta_N(q_2, b)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_3, q_4\} \cup \{q_5\}) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_3, q_4, q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_5\} = p_2
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_1, b) = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 2:** *transiciones de  $p_1$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 3:** *Transiciones de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5\}$* *Se marca el estado  $p_2$ :*

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2\}$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 3:** Transiciones de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_2, a)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_2} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{\{q_2, q_3, q_4, q_5\}} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, a) \cup \dots \cup \delta_N(q_5, a)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \{q_2\} \cup \{q_4, q_5\} \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_2, q_4, q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_5\} = p_2
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_2, a) = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 3:** Transiciones de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_2, b)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_2} \delta_N(q, b)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{\{q_2, q_3, q_4, q_5\}} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, b) \cup \dots \cup \delta_N(q_5, b)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\} \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \{q_5\}) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\
 &= \{q_3, q_5\} = p_3
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_2, b) = p_3$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

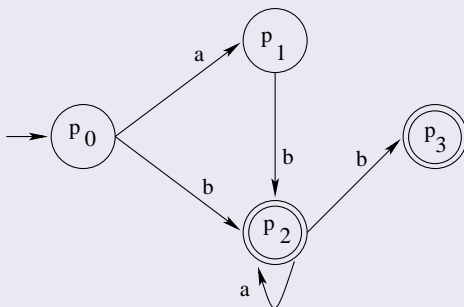
**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 3:** *Transiciones de*  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5\}$ Como  $p_3 \notin Q_D$ 

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, p_3\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 3:** *transiciones de  $p_2$*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 4:** *Transiciones de*  $p_3 = \{q_3, q_5\}$

*Se marca el estado*  $p_3$ :

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, \underline{p}_3\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 4:** *Transiciones de*  $p_3 = \{q_3, q_5\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_3, a)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_3} \delta_N(q, a)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_3, a) \cup \delta_N(q_5, a)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_2\} \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_2\}) \\
 &= \{q_2\} = p_4
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_3, a) = p_4$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 4:** *Transiciones de*  $p_3 = \{q_3, q_5\}$ Como  $p_4 \notin Q_D$ 

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, \underline{p}_3, \underline{p}_4\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 4:** *Transiciones de*  $p_3 = \{q_3, q_5\}$ 

$$\begin{aligned} \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_3, b)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_3} \delta_N(q, b)\right) \\ &= \dots \\ &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_3, b) \cup \delta_N(q_5, b)) \\ &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \{q_5\}) \\ &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\ &= \{q_3, q_5\} = p_3 \end{aligned}$$

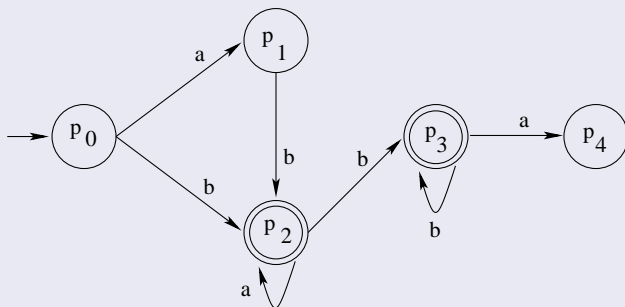
$$\delta_D(p_3, b) = p_3$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

Paso 4: transiciones de  $p_3$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)**Paso 5:** *Transiciones de  $p_4 = \{q_2\}$* *Se marca el estado  $p_4$* 

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, \underline{p}_3, \underline{p}_4\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

**Paso 5:** *Transiciones de*  $p_4 = \{q_2\}$ 

$$\begin{aligned} \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_4, a)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_4} \delta_N(q, a)\right) \\ &= \dots \\ &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, a)) \\ &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset) = \emptyset \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_4, a) = -$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

Paso 5: Transiciones de  $p_4 = \{q_2\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_4, b)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_4} \delta_N(q, b)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, b)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\
 &= \{q_3, q_5\} = p_3
 \end{aligned}$$

$$\delta(p_4, b) = p_3$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)

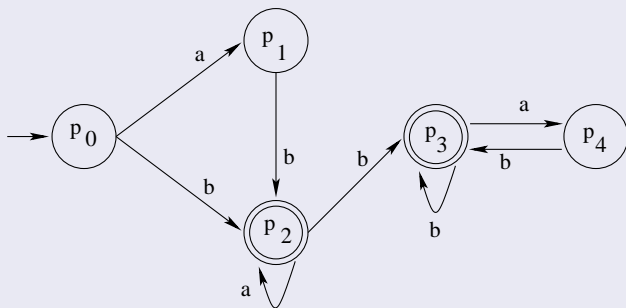
**Nota**

*El algoritmo finaliza al estar marcados todos los estados de  $Q_D$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

Paso 5: transiciones de  $p_4$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Construcción de AFD a partir de AFN)

*La función de transición del AFD es:*

	$\delta$	$a$	$b$
$\rightarrow$	$p_0$	$p_1$	$p_2$
	$p_1$	—	$p_2$
$\leftarrow$	$p_2$	$p_2$	$p_3$
$\leftarrow$	$p_3$	$p_4$	$p_3$
	$p_4$	—	$p_3$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)*Los dos únicos estados finales son  $p_2$  y  $p_3$  porque*

$$p_2 \cap F_N = \{q_2, q_3, q_4, q_5\} \cap \{q_5\} = \{q_5\} \neq \emptyset$$

$$p_3 \cap F_N = \{q_3, q_5\} \cap \{q_5\} = \{q_5\} \neq \emptyset$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** (Construcción de AFD a partir de AFN)*Análisis de  $x = abb$  usando el AFD construido:*

$$\begin{aligned}(p_0, abb) &\vdash (p_1, bb) \\ &\vdash (p_2, b) \\ &\vdash (p_3, \epsilon)\end{aligned}$$

 $x \in L(A_D)$  porque  $p_3 \in F_D$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

- Descripción general
- Definición formal
- Representación gráfica
- Función de transición para palabras
- Lenguaje reconocido por un AFN
- Equivalencia entre AFN y AFD
- Equivalencia entre expresiones regulares y autómatas finitos

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

AFN

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

AFN



Algoritmo de Construcción de subconjuntos

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

AFN



Algoritmo de Construcción de subconjuntos



AFD

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## EXPRESIÓN REGULAR

AFN



Algoritmo de Construcción de subconjuntos



AFD

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

EXPRESIÓN REGULAR



Algoritmo de Thompson



AFN



Algoritmo de Construcción de subconjuntos



AFD

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Teorema

*Dada una expresión regular  $\alpha$ , se puede construir un AFN  $A_N$  equivalente:*

$$L(\alpha) = L(A_N)$$



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Demostración

*EXPRESIÓN REGULAR*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Demostración

*EXPRESIÓN REGULAR*



*Algoritmo de Thompson*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Demostración

*EXPRESIÓN REGULAR**Algoritmo de Thompson**AFN*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Demostración

### Algoritmo (Thompson)

- *Entrada*: **expresión regular**  $\alpha$ .
- *Salida*: **AFN**  $A_N = (Q_N, \Sigma, \delta_N, q_0, F_N)$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Algoritmo (Thompson)

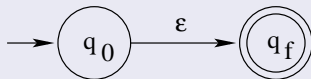


*AFN equivalente a la expresión regular  $\emptyset$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Algoritmo (Thompson)

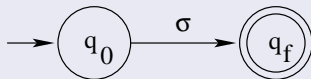


*AFN equivalente a la expresión regular  $\epsilon$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Algoritmo (Thompson)

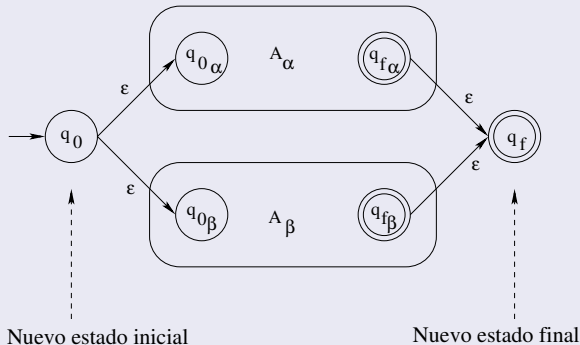


*AFN equivalente a la expresión regular  $\sigma$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Algoritmo (Thompson)



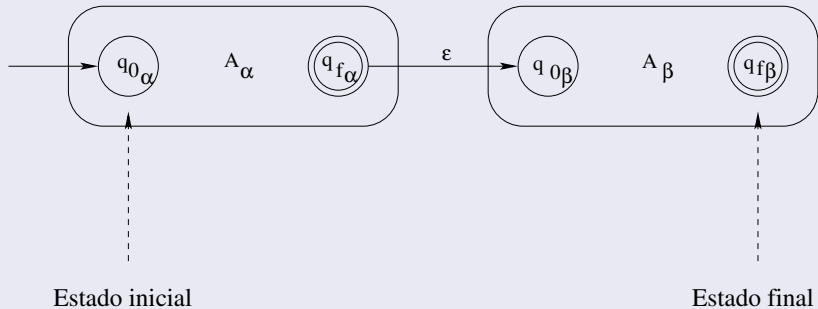
*AFN equivalente a la expresión regular  $\alpha + \beta$ .*



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Algoritmo (Thompson)

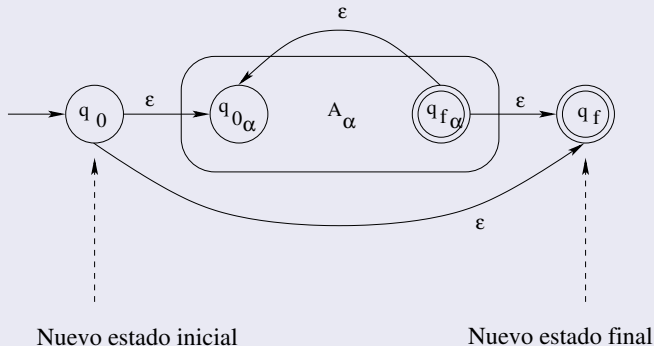


*AFN equivalente a la expresión regular  $\alpha\beta$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Algoritmo (Thompson)



*AFN equivalente a la expresión regular  $\alpha^*$ .*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Algoritmo (Thompson)

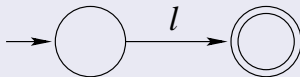
Nota

$$L((\alpha)) = L(\alpha) = L(A_N)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

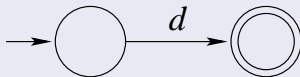
## Ejemplo (Algoritmo de Thompson)

*AFN equivalente a  $\alpha = l(l + d)^*$* **Paso 1:** *AFN equivalente a  $l$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

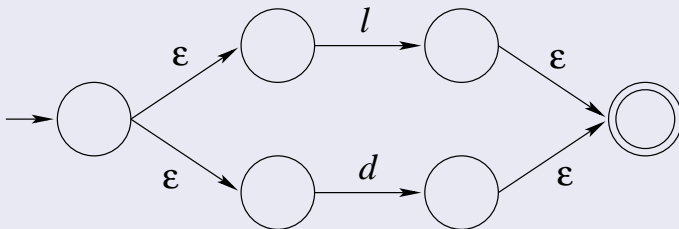
## Ejemplo (Algoritmo de Thompson)

*AFN equivalente a  $\alpha = l(l + d)^*$* **Paso 2:** *AFN equivalente a  $d$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Algoritmo de Thompson)

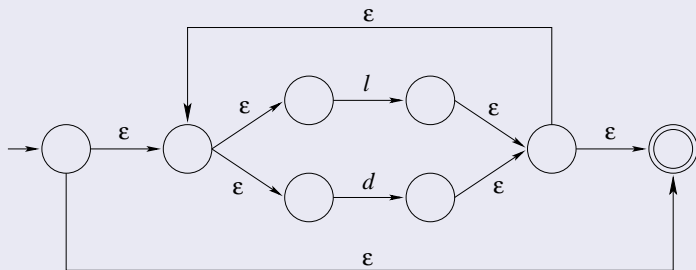
*AFN equivalente a  $\alpha = l(l + d)^*$* **Paso 3:** *AFN equivalente a  $l + d$*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Algoritmo de Thompson)

*AFN equivalente a  $\alpha = l(l + d)^*$*



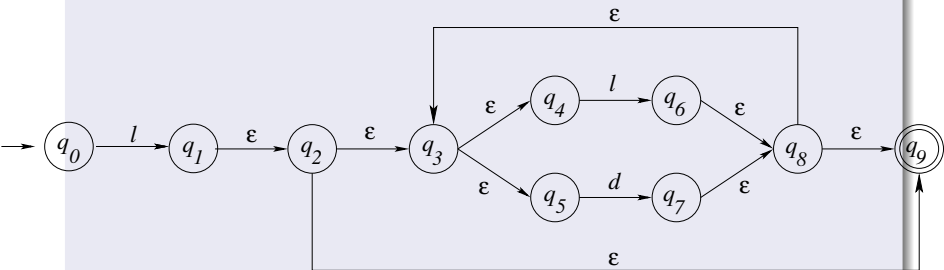
**Paso 4:** *AFN equivalente a  $(l + d)^*$*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo (Algoritmo de Thompson)

*AFN equivalente a  $\alpha = l(l + d)^*$*



**Paso 5:** *AFN equivalente a  $l(l + d)^*$*



# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## EXPRESIÓN REGULAR

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

EXPRESIÓN REGULAR



Algoritmo de Thompson

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

EXPRESIÓN REGULAR



Algoritmo de Thompson



AFN

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

EXPRESIÓN REGULAR



Algoritmo de Thompson



AFN



Algoritmo de Construcción de subconjuntos

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

EXPRESIÓN REGULAR



Algoritmo de Thompson



AFN



Algoritmo de Construcción de subconjuntos



AFD

## Reconocimiento de componentes léxicos

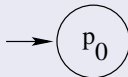
Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 0:** Estado inicial del AFD:

$$p_0 = \text{clausura} - \epsilon(q_0) = \{q_0\}$$
$$Q_D = \{p_0\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD)**Paso 0:** *estado inicial  $p_0$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0\}$ *Se marca el estado*  $p_0$ :

$$Q_D = \{\underline{p}_0\}$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0\}$ 

$$\text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_0, l)) =$$

$$= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_0} \delta_N(q, l)\right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in \{q_0\}} \delta_N(q, l)\right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_0, l))$$

$$= \text{clausura} - \epsilon(\{q_1\})$$

$$= \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\} = p_1$$

Por tanto,  $\delta_D(p_0, l) = p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0\}$ Como  $p_1 \notin Q_D$ :

$$Q_D = Q_D \cup \{p_1\} = \{\underline{p}_0, p_1\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo**  $(\alpha = l(l + d)^*)$ : paso de AFN a AFD**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_0 = \{q_0\}$ 

$$\text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_0, d)) =$$

$$= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_0} \delta_N(q, d)\right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in \{q_0\}} \delta_N(q, d)\right)$$

$$= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_0, d))$$

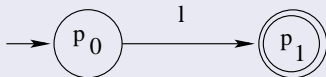
$$= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset)$$

$$= \emptyset$$

$$\delta_D(p_0, l) = -$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l+d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 1:** *transiciones de  $p_0$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 2:** *Transiciones de*  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\}$ *Se marca el estado*  $p_1$ :

$$Q_D = \{p_0, p_1\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD)**Paso 2:** Transiciones de  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_1, l)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_1} \delta(q, l)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_1, l) \cup \dots \cup \delta_N(q_8, l)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \emptyset \cup \{q_5\} \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\} = p_2
 \end{aligned}$$

Por tanto,  $\delta_D(p_1, l) = p_2$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 1:** *Transiciones de*  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\}$ Como  $p_2 \notin Q_D$ :

$$Q_D = Q_D \cup \{p_2\} = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, p_2\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD)**Paso 2:** Transiciones de  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_1, d)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_1} \delta(q, d)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_1, d) \cup \dots \cup \delta_N(q_8, d)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \{q_6\} \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_6\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\} = p_3
 \end{aligned}$$

Por tanto,  $\delta_D(p_1, d) = p_3$



## Reconocimiento de componentes léxicos

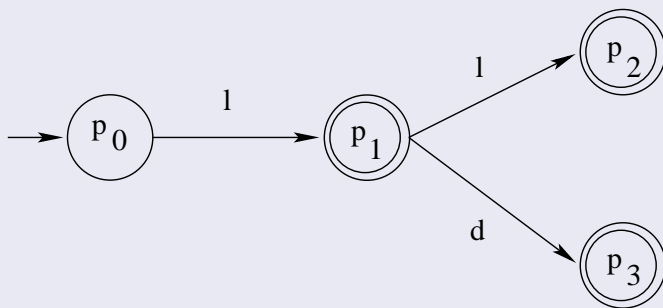
Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 2:** *Transiciones de*  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\}$ Como  $p_3 \notin Q_D$ :

$$Q_D = Q_D \cup \{p_3\} = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, p_2, p_3\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 2:** *transiciones de  $p_1$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 3:** *Transiciones de*  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\}$ *Se marca el estado*  $p_2$ :

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, p_3\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD)**Paso 3:** Transiciones de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_2, l)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_2} \delta_N(q, l)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, l) \cup \dots \cup \delta_N(q_8, l)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \{q_5\} \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\} = p_2
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_2, l) = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

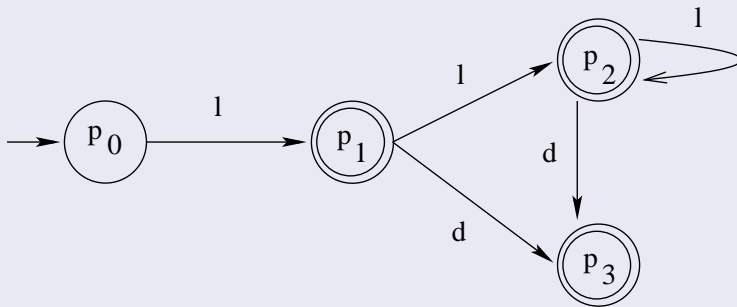
**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD)**Paso 3:** Transiciones de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(p_2, d)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_2} \delta_N(q, d)\right) \\
 &= \dots \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, d) \cup \dots \cup \delta_N(q_8, d)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \emptyset \cup \{q_6\} \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\} = p_3
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_2, d) = p_3$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 3:** *transiciones de  $p_2$*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 4:** *Transiciones de*  $p_3 = \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\}$ *Se marca el estado*  $p_3$ :

$$Q_D = \{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, \underline{p}_3\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD**Paso 4:** Transiciones de  $p_3 = \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\}$ 

$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta(p_3, l)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_3} \delta(q, l)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, l) \cup \dots \cup \delta_N(q_8, l)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \{q_5\} \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_5\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\} = p_2
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_3, l) = p_2$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)**Paso 4:** *Transiciones de*  $p_3 = \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\}$ 

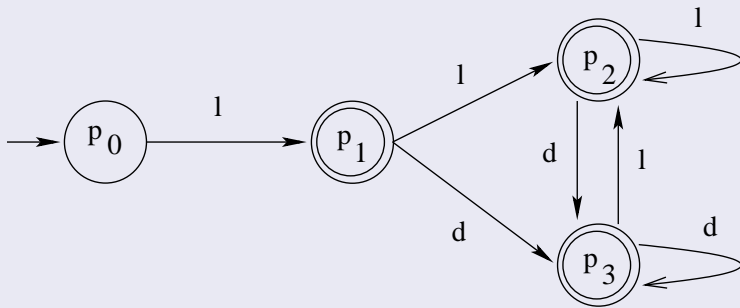
$$\begin{aligned}
 \text{clausura} - \epsilon(\delta(p_3, d)) &= \text{clausura} - \epsilon\left(\bigcup_{q \in p_3} \delta(q, d)\right) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\delta_N(q_2, d) \cup \dots \cup \delta_N(q_8, d)) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\emptyset \cup \emptyset \cup \{q_6\} \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset) \\
 &= \text{clausura} - \epsilon(\{q_6\}) \\
 &= \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\} = p_3
 \end{aligned}$$

$$\delta_D(p_3, d) = p_3$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)



**Paso 4:** *transiciones de p<sub>3</sub>*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)

**Nota**

*El algoritmo finaliza al estar marcados todos los estados de  $Q_D$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

Ejemplo ( $\alpha = l(l + d)^*$ ): paso de AFN a AFD)

Función de transición del AFD

	$\delta$	$l$	$d$
$\rightarrow$	$p_0$	$p_1$	—
$\leftarrow$	$p_1$	$p_2$	$p_3$
$\leftarrow$	$p_2$	$p_2$	$p_3$
$\leftarrow$	$p_3$	$p_2$	$p_3$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

**Ejemplo** ( $\alpha = l(l + d)^*$ : paso de AFN a AFD)*Estados finales:*  $p_1, p_2$  y  $p_3$ 

$$p_1 \cap F_N = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_8\} \cap \{q_8\} = \{q_8\} \neq \emptyset$$

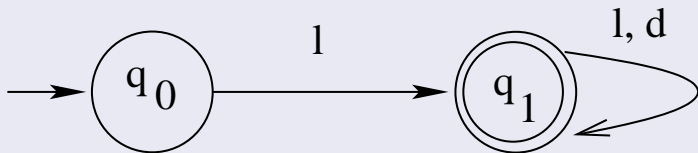
$$p_2 \cap F_N = \{q_2, q_3, q_4, q_5, q_7, q_8\} \cap \{q_8\} = \{q_8\} \neq \emptyset$$

$$p_3 \cap F_N = \{q_2, q_3, q_4, q_6, q_7, q_8\} \cap \{q_8\} = \{q_8\} \neq \emptyset$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Autómatas finitos NO deterministas: AFN

## Ejemplo



*AFD más simple y equivalente a  $\alpha = l(l + d)^*$*

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
  - Autómatas finitos
  - Autómatas finitos deterministas: AFD
  - Autómatas finitos NO deterministas: AFN
  - Minimización de autómatas finitos deterministas
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Definición

*Dos autómatas son equivalentes si reconocen el mismo lenguaje:*

$$A \equiv A' \Leftrightarrow L(A) = L(A')$$



# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Razones para minimizar un AFD

- Un lenguaje **regular** puede ser reconocido por **varios** autómatas finitos deterministas **equivalentes**.
- Se debe usar el AFD con el **menor** número de estados.
- La **Minimización** permite generar el AFD que reconoce un lenguaje regular con el menor número de estados.
- La minimización está basada en una **relación de equivalencia** entre estados.
- El **autómata cociente** de la relación de equivalencia es el **AFD mínimo**.

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Definición (Equivalencia entre estados)

Se dice que dos **estados**  $q, q' \in Q$  son **equivalentes** ( $qEq'$ ) si se verifica que:

$$\forall x \in \Sigma^* (\hat{\delta}(q, x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q', x) \in F)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

 $E$  es una relación de equivalencia $\forall x \in \Sigma^* \wedge \forall q, q' \in Q:$ 

- **Reflexiva:**  $qEq \hat{\delta}(q, x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q, x) \in F$
- **Simétrica:**  $qEq' \Rightarrow q'Eq$

$$(\hat{\delta}(q, x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q', x) \in F) \Rightarrow (\hat{\delta}(q', x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q, x) \in F)$$

- **Transitiva:**  $qEq' \wedge q'Eq'' \Rightarrow qEq''$

$$\left. \begin{array}{l} (\hat{\delta}(q, x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q', x) \in F) \\ (\hat{\delta}(q', x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q'', x) \in F) \end{array} \right\} \Rightarrow (\hat{\delta}(q, x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q'', x) \in F)$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

**Definición** (Clase de equivalencia de un estado)

Si  $q \in Q$ , la **clase de equivalencia** de  $q$  respecto de la relación  $E$  se define como:

$$E[q] = \{q' \mid qEq'\} = \{q' \mid \forall x \in \Sigma^* (\hat{\delta}(q, x) \in F \Leftrightarrow \hat{\delta}(q', x) \in F)\}$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

Propiedades de la relación de equivalencia  $E$ 

- $\forall q \in Q \quad q \in E[q]$
- Si  $q' \notin E[q]$  entonces  $E[q'] \cap E[q] = \emptyset$
- $Q = \bigcup_{q \in Q} E[q]$
- $|Q|_E \leq |Q|$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Definición (Autómata cociente)

$$A_{|E} = (Q_{|E}, \Sigma, \delta_{|E}, E[q_0], F_{|E})$$

- $Q_{|E} = \{E[q] | q \in Q\}$
- La función de transición  $\delta_{|E}$  se define como:

$$\delta_{|E} : Q_{|E} \times \Sigma \longrightarrow Q_{|E}$$

$$\delta_{|E}(p, \sigma) = p' \in Q_{|E} \iff \begin{cases} \exists q, q' \in Q \\ p = E[q] \wedge p' = E[q'] \\ \wedge \delta(q, \sigma) = q' \end{cases}$$

- $E[q_0]$  es el estado inicial y
- $F_{|E} = \{E[q_f] | q_f \in F\}$ ,

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Nota

*La función  $\hat{\delta}_{|E}$  se define de manera similar a  $\hat{\delta}$ .*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Teorema

*Todo AFD es equivalente a su autómata cociente:*

$$L(A) = L(A|_E)$$

## Demostración

$$\begin{aligned}x \in L(A) &\Leftrightarrow \hat{\delta}(q_0, x) \in F \\&\Leftrightarrow \exists q_f \in F \hat{\delta}(q_0, x) = q_f \\&\Leftrightarrow p_0 = E[q_0] \wedge \exists q_f \in F p_f = E[q_f] \wedge \hat{\delta}|_E(p_0, x) = p_f \\&\Leftrightarrow \hat{\delta}|_E(p_0, x) = p_f \in F|_E \\&\Leftrightarrow x \in L(A|_E)\end{aligned}$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Teorema

*Todo AFD es equivalente a su autómata cociente:*

$$L(A) = L(A|_E)$$

## Demostración

$$\begin{aligned}
 x \in L(A) &\Leftrightarrow \hat{\delta}(q_0, x) \in F \\
 &\Leftrightarrow \exists q_f \in F \hat{\delta}(q_0, x) = q_f \\
 &\Leftrightarrow p_0 = E[q_0] \wedge \exists q_f \in F p_f = E[q_f] \wedge \hat{\delta}|_E(p_0, x) = p_f \\
 &\Leftrightarrow \hat{\delta}|_E(p_0, x) = p_f \in F|_E \\
 &\Leftrightarrow x \in L(A|_E)
 \end{aligned}$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Demostración

### Algoritmo (Construcción del Autómata Cociente)

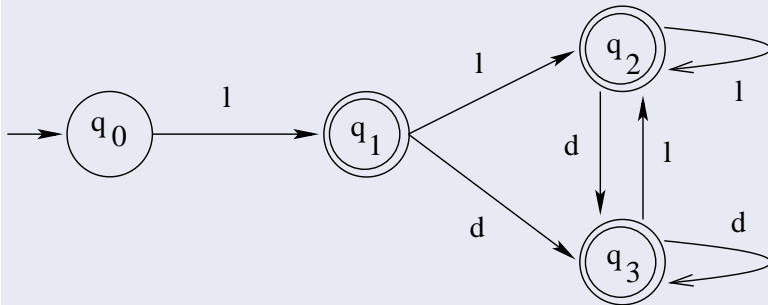
- *Entrada:*  $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ .
- *Salida:*  $A|_E = (Q|_E, \Sigma, \delta|_E, E[q_0], F|_E)$ , **Autómata cociente**

**Algoritmo** (Construcción del Autómata Cociente)**inicio** $p_0 \leftarrow Q - F, p_1 \leftarrow F$  $Nuevo \leftarrow \{p_0, p_1\}$  y  $p_0$  y  $p_1$  no marcados**mientras**  $\exists p \in Nuevo$  no marcado **hacer**    Marcar a  $p$     **para** cada  $\sigma \in \Sigma$  **hacer**        *Dividir*  $p$  en subconjuntos de forma que sus estados         $q_i$  y  $q_j$  estarán en el mismo subconjunto        si  $\delta(q_i, \sigma)$  y  $\delta(q_j, \sigma)$  pertenecen al mismo subconjunto    **fin para**    **si** se ha dividido  $p$  en subconjuntos        **entonces**            *Sustituir*  $p$  por los nuevos subconjuntos            *Desmarcar* todos los estados de  $Nuevo$     **fin si**  **fin mientras****fin**

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)



*AFD original que reconoce identificadores de Pascal.*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)

- *Estados no finales:*  $p_0 = Q - F = \{q_0\}$
- *Estados finales:*  $p_1 = F = \{q_1, q_2, q_3\}$
- *Nuevo* =  $\{p_0, p_1\}$
- *Los estados de Nuevo no están marcados.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)

**Paso 1:** Análisis de  $p_0 = \{q_0\}$ 

- Se marca  $p_0$ : Nuevo =  $\{\underline{p}_0, p_1\}$
- $p_0$  sólo contiene un estado y no se puede descomponer más.
- Transiciones “provisionales” de  $p_0$ :

$$\delta|_E(p_0, l) = E[\delta(q_0, l)] = E[q_1] = p_1$$

$$\delta|_E(p_0, d) = E[\delta(q_0, d)] = E[-] = -$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)

**Paso 2:** Análisis de  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3\}$ 

- Se marca  $p_1$ : Nuevo =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1\}$
- Se comprueban que los estados de  $p_1$  son homogéneos:

$p_1$	$l$	$d$
$q_1$	$p_1$	$p_1$
$q_2$	$p_1$	$p_1$
$q_3$	$p_1$	$p_1$

- Transiciones de  $p_1$ :  $\delta_{|E}(p_1, l) = p_1, \delta_{|E}(p_1, d) = p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)

- El algoritmo **finaliza** porque todos los **estados** de Nuevo están **marcados**.
- Los estados generados son:
  - +  $p_0 = \{q_0\}$
  - +  $p_1 = \{q_1, q_2, q_3\}$
- El estado **inicial** es  $p_0$  porque  $q_0 \in p_0$ .
- $F|_E = \{p_1\}$  porque  $p_1 \cap F = \{q_1, q_2, q_3\} \neq \emptyset$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)

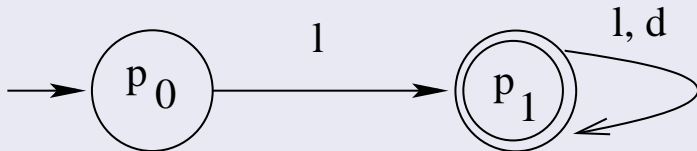
- *Función de transición del autómata minimizado*

$\delta$	$l$	$d$
$\leftarrow p_0$	$p_1$	$-$
$\rightarrow p_1$	$p_1$	$p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (1.- Minimización de AFD)

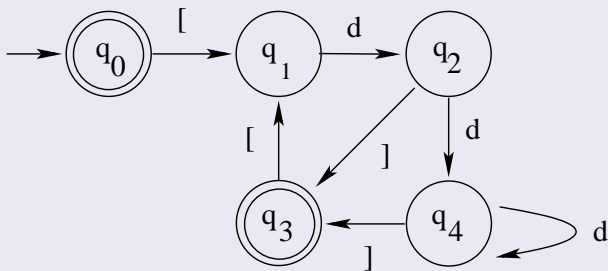


*AFD minimizado que reconoce identificadores de Pascal.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)



*AFD original que reconoce componentes de arrays.*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

- *Estados no finales:*  $p_0 = Q - F = \{q_1, q_2, q_4\}$
- *Estados finales:*  $p_1 = F = \{q_0, q_3\}$
- *Nuevo* =  $\{p_0, p_1\}$
- *Los estados*  $p_0$  *y*  $p_1$  **no están marcados**

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

### Nota

*El estado inicial  $q_0$  pertenece a  $p_1$  porque también es un estado final*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

**Paso 1:** Análisis de  $p_0 = \{q_1, q_2, q_4\}$ 

- Se marca  $p_0$ : Nuevo =  $\{\underline{p}_0, p_1\}$
- Se comprueban las transiciones de los estados de  $p_0$ :

$\delta$	[	d	]
$q_1$	—	$p_0$	—
$q_2$	—	$p_0$	$p_1$
$q_4$	—	$p_0$	$p_1$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

**Paso 1:** Análisis de  $p_0 = \{q_1, q_2, q_4\}$

- $q_1$  **no** es equivalente a  $q_2$  y  $q_4$ .
- El antiguo estado  $p_0$  se divide en dos nuevos estados:

$$p_0 = \{q_1\}$$

$$p_2 = \{q_2, q_4\}$$

- Nuevo =  $\{p_0, p_1, p_2\}$
- Todos los estados están desmarcados.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

**Paso 2: Segundo análisis de  $p_0 = \{q_1\}$** 

- Se marca  $p_0$ : Nuevo =  $\{\underline{p}_0, p_1, p_2\}$
- $p_0$  sólo contiene un estado y no se puede descomponer más.
- Transiciones “provisionales” de  $p_0$ :

$$\delta_{|E}(p_0, []) = E[\delta(q_1, [])] = E[-] = -$$

$$\delta_{|E}(p_0, d) = E[\delta(q_1, d)] = E[q_2] = p_2$$

$$\delta_{|E}(p_0, ]) = E[\delta(q_1, )]] = E[-] = -$$



## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

**Paso 3:** Análisis de  $p_1 = \{q_0, q_3\}$ 

- Se marca  $p_1$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, p_2\}$
- Se comprueban que los estados de  $p_1$  son homogéneos:

$\delta$	[	d	]
$q_0$	$p_0$	-	-
$q_3$	$p_0$	-	-

- Transiciones "*provisionales*" de  $p_1$ :

$$\delta|_E(p_1, [) = E[\delta(q_0, [)] = E[q_1] = p_0$$

$$\delta|_E(p_1, d) = E[\delta(q_0, d)] = E[-] = -$$

$$\delta|_E(p_1, ]) = E[\delta(q_0, )]] = E[-] = -$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

**Paso 4:** Análisis de  $p_2 = \{q_2, q_4\}$ 

- Se marca  $p_2$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2\}$
- Se comprueban que los estados de  $p_1$  son homogéneos:

$\delta$	[	d	]
$q_2$	-	$p_2$	$p_1$
$q_4$	-	$p_2$	$p_1$

- *Transiciones de  $p_2$ :*

$$\delta|_E(p_1, [) = E[\delta(q_2, [)] = E[-] = -$$

$$\delta|_E(p_1, d) = E[\delta(q_2, d)] = E[q_4] = p_2$$

$$\delta|_E(p_1, ]) = E[\delta(q_2, )]) = E[q_3] = p_1$$

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

- El algoritmo **finaliza** porque todos los **estados** de Nuevo están **marcados**.
- Los estados generados son:
  - +  $p_0 = \{q_1\}$
  - +  $p_1 = \{q_0, q_3\}$
  - +  $p_2 = \{q_2, q_4\}$
- El estado inicial es  $p_1$  porque  $q_0 \in p_1$ .
- $F|_E = \{p_1\}$  porque  $p_1 \cap F = \{q_0, q_3\} \neq \emptyset$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

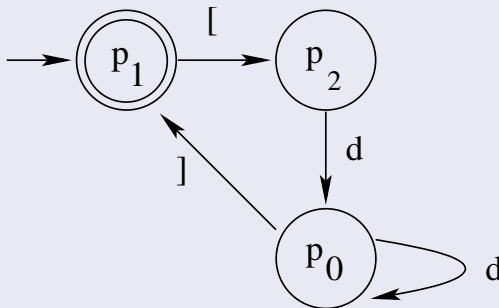
- *Función de transición del autómata minimizado*

$\delta$	[	d	]
$p_0$	—	$p_2$	—
→ $p_1$ ←	$p_0$	—	—
$p_2$	—	$p_2$	$p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (2.- Minimización de AFD)

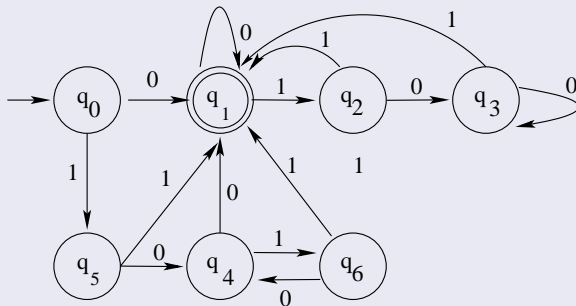


*Autómata cociente (autómata mínimo).*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)



*AFD que se va a minimizar.*

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

- *Estados no finales:*  $p_0 = Q - F = \{q_0, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}$
- *Estados finales:*  $p_1 = F = \{q_1\}$
- *Nuevo* =  $\{p_0, p_1\}$
- *Los estados  $p_0$  y  $p_1$  no están marcados*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 1:** Análisis de  $p_0 = \{q_0, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}$ 

- Se marca  $p_0$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, p_1\}$
- Se comprueban las transiciones de los estados de  $p_0$ :

$\delta$	0	1
$q_0$	$p_1$	$p_0$
$q_2$	$p_0$	$p_1$
$q_3$	$p_0$	$p_1$
$q_4$	$p_1$	$p_0$
$q_5$	$p_0$	$p_1$
$q_6$	$p_0$	$p_1$



# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso número 1:** Análisis de  $p_0 = \{q_0, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}$

- $q_0$  y  $q_4$  tienen transiciones diferentes de los otros estados
- El antiguo estado  $p_0$  se divide en dos nuevos estados:

$$p_0 = \{q_0, q_4\}$$

$$p_2 = \{q_2, q_3, q_5, q_6\}$$

- Nuevo =  $\{p_0, p_1, p_2\}$
- Todos los estados están desmarcados.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 2: Segundo análisis de  $p_0 = \{q_0, q_4\}$** 

- Se marca  $p_0$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, p_1, p_2\}$
- Se comprueban si las transiciones de los estados contenidos en  $p_0$  son homogéneas:

$\delta$	0	1
$q_0$	$p_1$	$p_2$
$q_4$	$p_1$	$p_2$

- Transiciones “provisionales” de  $p_0$ :

$$\delta_{|E}(p_0, 0) = E[\delta(q_0, 0)] = E[q_1] = p_1$$

$$\delta_{|E}(p_0, 1) = E[\delta(q_0, 1)] = E[q_5] = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 3:** Análisis de  $p_1 = \{q_1\}$ 

- Se marca  $p_1$ : Nuevo =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, p_2\}$
- $p_1$  sólo contiene un estado y no se puede descomponer más.
- Transiciones “provisionales” de  $p_1$ :

$$\delta|_E(p_1, 0) = E[\delta(q_1, 0)] = E[q_0] = p_1$$

$$\delta|_E(p_1, 1) = E[\delta(q_1, 1)] = E[q_2] = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 4:** Análisis de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_5, q_6\}$ 

- Se marca  $p_2$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2\}$
- Se comprueban si son homogéneas las transiciones de los estados contenidos en  $p_2$ :

$\delta$	0	1
$q_2$	$p_2$	$p_1$
$q_3$	$p_2$	$p_1$
$q_5$	$p_0$	$p_1$
$q_6$	$p_0$	$p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 4:** Análisis de  $p_2 = \{q_2, q_3, q_5, q_6\}$ 

- $q_2$  y  $q_3$  tienen transiciones diferentes de los otros estados
- El antiguo estado  $p_2$  se divide en dos nuevos estados:

$$p_2 = \{q_2, q_3\}$$

$$p_3 = \{q_5, q_6\}$$

- Nuevo =  $\{p_0, p_1, p_2, p_3\}$
- Todos los estados están desmarcados.

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 5: Tercer análisis de  $p_0 = \{q_0, q_4\}$** 

- Se marca  $p_0$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, p_1, p_2, p_3\}$
- Se comprueban si las transiciones de los estados contenidos en  $p_0$  son homogéneas:

$\delta$	0	1
$q_0$	$p_1$	$p_3$
$q_4$	$p_1$	$p_3$

- Transiciones “provisionales” de  $p_0$  han cambiado:

$$\delta_{|E}(p_0, 0) = E[\delta(q_0, 0)] = E[q_1] = p_1$$

$$\delta_{|E}(p_0, 1) = E[\delta(q_0, 1)] = E[q_5] = p_3$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso 6:** Segundo análisis de  $p_1 = \{q_1\}$ 

- Se marca  $p_1$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, p_2, p_3\}$
- El estado  $p_1$  no se puede dividir porque sólo contiene a  $q_1$
- Se comprueba si han cambiado las transiciones "*provisionales*" de  $p_1$ :

$$\delta|_E(p_1, 0) = E[\delta(q_1, 0)] = E[q_1] = p_1$$

$$\delta|_E(p_1, 1) = E[\delta(q_1, 1)] = E[q_2] = p_2$$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso número 7: Segundo análisis de  $p_2 = \{q_2, q_3\}$**

- Se marca  $p_2$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, p_3\}$
- Se comprueban si son homogéneas las transiciones de los estados contenidos en  $p_2$ :

$\delta$	0	1
$q_2$	$p_2$	$p_1$
$q_3$	$p_2$	$p_1$

- Los estados  $q_2$  y  $q_3$  son equivalentes y no se requiere ninguna división.



## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

**Paso número 8:** *Ánálisis de*  $p_3 = \{q_5, q_6\}$ 

- Se marca  $p_3$ : *Nuevo* =  $\{\underline{p}_0, \underline{p}_1, \underline{p}_2, \underline{p}_3\}$
- Se comprueban si son homogéneas las transiciones de los estados contenidos en  $p_3$ :

$\delta$	0	1
$q_5$	$p_0$	$p_1$
$q_6$	$p_0$	$p_1$

- Los estados  $q_5$  y  $q_6$  son equivalentes y no se requiere ninguna división.

# Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

- El algoritmo **finaliza** porque todos los **estados** de Nuevo están **marcados**.
- Los estados generados son:
  - +  $p_0 = \{q_0, q_4\}$
  - +  $p_1 = \{q_1\}$
  - +  $p_2 = \{q_2, q_3\}$
  - +  $p_3 = \{q_5, q_6\}$
- El estado inicial es  $p_0$  porque  $q_0 \in p_0$ .
- $F|_E = \{p_1\}$  porque  $p_1 \cap F = \{q_1\} \neq \emptyset$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

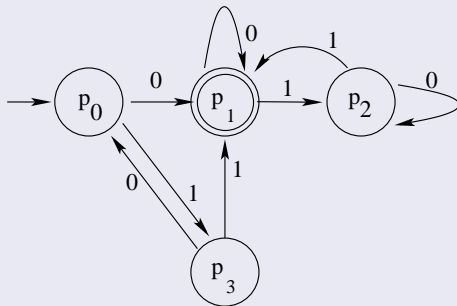
- *Función de transición del autómata minimizado*

$\delta_{ E}$	0	1
→ $p_0$	$p_1$	$p_3$
← $p_1$	$p_1$	$p_2$
$p_2$	$p_2$	$p_1$
$p_3$	$p_0$	$p_1$

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)

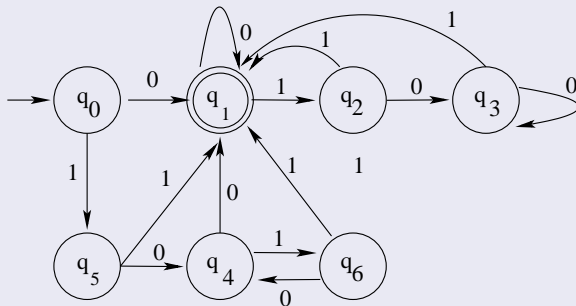


*Representación gráfica del AFD minimizado.*

## Reconocimiento de componentes léxicos

Minimización de autómatas finitos deterministas

## Ejemplo (3.- Minimización de AFD)



*AFD que se ha minimizado.*

# Contenido del tema

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos**
- 5 Detección y recuperación de errores

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
  - Introducción
  - Codificación manual del analizador léxico
  - Generación automática del analizador léxico
- 5 Detección y recuperación de errores

# Implementación de los analizadores léxicos

## Introducción

### Definición

Se denomina *implementación* de un analizador léxico a su *codificación* en un lenguaje de programación.



# Implementación de los analizadores léxicos

## Introducción

### Nota

*Se recuerda que el **analizador léxico** suele ser una función o procedimiento **auxiliar** del **analizador sintáctico**.*

# Implementación de los analizadores léxicos

## Introducción

### Tareas del analizador léxico

- Reconocer **todos** los componentes léxicos:
  - + Palabras reservadas
  - + Identificadores
  - + números
  - + Operadores aritméticos, relacionales, etc.
  - + Etc.
- Enviar al analizador sintáctico los componentes léxicos reconocidos.
- Procesar los errores léxicos **que pueda detectar**.

# Implementación de los analizadores léxicos

## Introducción

**Nota** (Primer paso para implementar el analizador léxico)

*Definir una expresión regular  
para **denotar** cada componente léxico*

# Implementación de los analizadores léxicos

## Introducción

### Tipo de reconocimiento de las palabras reservadas

- **Implícito**
  - + Se pre-instalan en la tabla de símbolos.
  - + Se procesan inicialmente como identificadores.
  - + Se reconocen como palabras claves al buscarlas en la tabla de símbolos.
- **Explícito**
  - + Se reconocen de forma independiente a los identificadores
  - + Siempre se utiliza el lexema más largo: `if - ifa`
  - + En caso de igualdad de longitudes, se escoge el componente léxico que se haya especificado en primer lugar.

# Implementación de los analizadores léxicos

## Introducción

### Métodos de implementación del Analizador Léxico

- Codificación **manual** utilizando un lenguaje de programación.
- Utilización de un **generador automático** del analizador léxico:
  - + LEX
  - + Pclex
  - + Jlex
  - + Etc.

## Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
  - Introducción
  - Codificación manual del analizador léxico
  - Generación automática del analizador léxico
- 5 Detección y recuperación de errores

# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Características

- Se utiliza un lenguaje de programación:
  - + Alto nivel: C, C++, Pascal, Java, etc.
  - + Bajo nivel: ensamblador.
- Se codifica una función que **combina** todos los AFDs transformados.

# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Lenguaje de programación de **alto** nivel

- **Ventajas**
  - + Computacionalmente eficiente
  - + Permite la detección y recuperación específica de errores
- **Inconvenientes**
  - + Requiere un gran esfuerzo de programación.
  - + Las modificaciones pueden ser dificultosas.



# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Lenguaje de programación de **bajo** nivel

- **Ventajas**
  - + Computacionalmente **muy** eficiente: permite controlar de forma directa la Entrada / Salida
  - + Permite la detección y recuperación específica de errores
- **Inconvenientes**
  - + Requiere un esfuerzo de programación muy elevado.
  - + Las modificaciones son muy dificultosas.

# Implementación de los analizadores léxicos

## Codificación manual del analizador léxico

### Combinación de los Autómatas Finitos Deterministas transformados

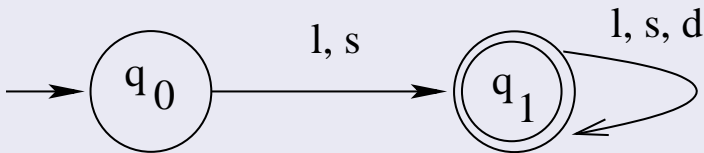
- Se transforma cada AFD para que:
  - + reconozca el componente léxico
  - + compruebe si es necesario procesar el símbolo que sigue al componente léxico:
    - Si el símbolo es correcto, se devuelve al “buffer” de entrada.
    - Si el símbolo es incorrecto, se procesa el error detectado.
  - + devuelva el componente léxico reconocido.
  - + y continúe el análisis léxico.
- Se combinan **todos** los Autómatas Finitos Deterministas transformados.

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

Ejemplo (1.- Transformación de AFD:

1/3)



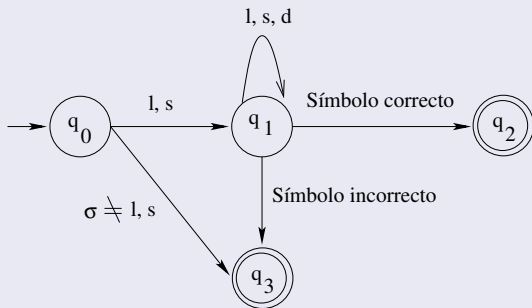
*AFD que reconoce identificadores del lenguaje C.*

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

Ejemplo (1.- Transformación de AFD:

2/3)

*AFD transformado.*

# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Ejemplo (1.- Transformación de AFD:

3/3)

- *El estado  $q_2$  debe:*
  - + *Devolver el componente léxico reconocido.*
  - + *Devolver al "buffer" de entrada el símbolo correcto que no pertenece al identificador de C:*
    - *espacio en blanco*
    - *punto y coma,*
    - *etc.*
- *El estado  $q_3$  debe procesar el error detectado.*

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Nota

Las celdas vacías de la función de transición se completan con "rutinas" de tratamiento de errores:

	$\delta$	$\dots$	$\sigma_j$	$\dots$
→	$q_0$			
	$\dots$			
	$q_i$		Error	
	$\dots$			

*Error* representa una función o procedimiento que permite el tratamiento del error detectado.

# Implementación de los analizadores léxicos

## Codificación manual del analizador léxico

### Nota

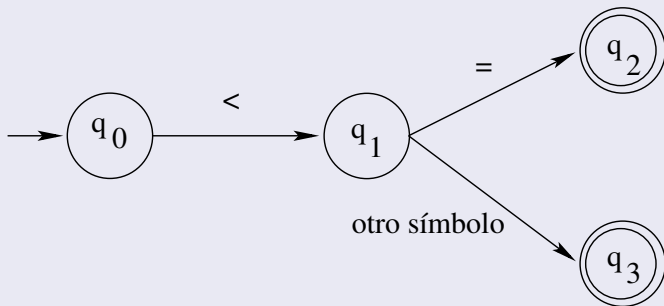
- *Algunas veces no es necesario comprobar el símbolo que sigue al componente léxico.*
- *Suele ocurrir con los componentes léxicos más simples:*
  - *Punto y coma*
  - *Espacio en blanco, tabular o salto de línea*
  - *Operadores aritméticos*
  - *Etc.*

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

Ejemplo (2.- Transformación AFD:

1/2)



*AFD transformado que reconoce los componentes léxicos MENOR o MENOR IGUAL.*



# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Ejemplo (2.- Transformación AFD:

2/2)

- $q_2$  reconoce el componente léxico *MENOR IGUAL*
  - + No se necesita procesar el símbolo siguiente, porque no ha sido leído.
- $q_3$  reconoce el componente léxico *MENOR*.
  - + El "otro símbolo" debe ser devuelto al "buffer" de entrada.

# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Estrategias de la codificación manual

- Utilizar directamente las **tablas** de la función de transición de los AFDs.
- Simular el funcionamiento de los AFDs mediante **sentencias de control**.

# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Ejemplo (Uso de la tabla de la función de transición)

**INICIO** ESTADO  $\leftarrow$  INICIAL

LEER (CARÁCTER)

**MIENTRAS** (FINAL(ESTADO) = FALSO **Y** CARÁCTER  $\neq$  FIN-DE-FICHERO)

**HACER**

ESTADO  $\leftarrow$  M(ESTADO, CARÁCTER)

LEER (CARÁCTER)

**FIN MIENTRAS**

**SI** ERROR(ESTADO) = VERDADERO **ENTONCES**

PROCESAR-ERROR(ESTADO)

**SI NO**

**SI** DEVOLVER-CARÁCTER(ESTADO) **ENTONCES**

DEVOLVER (CARÁCTER)

**FIN SI**

COMPONENTE-LÉXICO(ESTADO)

**FIN**

# Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

## Ejemplo (Uso de la tabla de la función de transición)

**INICIO** ESTADO  $\leftarrow$  INICIAL

LEER (CARÁCTER)

**MIENTRAS** (FINAL(ESTADO) = FALSO **Y** CARÁCTER  $\neq$  FIN-DE-FICHERO)

**HACER**

ESTADO  $\leftarrow$  M(ESTADO, CARÁCTER)

LEER (CARÁCTER)

**FIN MIENTRAS**

**SI** ERROR(ESTADO) = VERDADERO **ENTONCES**

PROCESAR-ERROR(ESTADO)

**SI NO**

**SI** DEVOLVER-CARÁCTER(ESTADO) **ENTONCES**

DEVOLVER (CARÁCTER)

**FIN SI**

COMPONENTE-LÉXICO(ESTADO)

**FIN**

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

Ejemplo (Simulación con sentencias de control:

1/3)

```
yylex()
{
  int c;
  /* Salta blancos y tabuladores */
  while((c=getchar())==' ' || c=='\t' ); /* Sentencia nula */
  if (c == EOF)
  {
    printf("\n Fin de la ejecución de %s \n", progname);
    return 0;
  }
  else if (c == '.' || isdigit(c))
  { /* El símbolo leído se devuelve al buffer de entrada
    para leerlo como parte de un número */
    ungetc(c,stdin);
    /* Lee el número */
    scanf("%lf",&yylval.val);
    return NUMBER;
  }
}
```

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

Ejemplo (Simulación con sentencias de control:

2/3)

```
else if (isalpha(c))
{ /* comprueba si lee un identificador */
  Symbol *s;
  char sbuf[100],*p=sbuf;
  do {
    *p++=c;
  } while((c=getchar()) != EOF && isalnum(c));
  /* Devuelve el símbolo que no pertenece al identificador */
  ungetc(c,stdin);
  /* Cadena correcta: carácter nulo al final */
  *p='\0';
  /* Si no está en la tabla de símbolos, lo instala */
  if ((s=lookup(sbuf))==0) s = install(sbuf,INDEFINIDA,0.0);
  yylval.sym=s;
  return s->tipo==INDEFINIDA ? VAR : s->tipo;
}
```

## Implementación de los analizadores léxicos

Codificación manual del analizador léxico

Ejemplo (Simulación con sentencias de control:

3/3)

```
else if (c=='\n')
{
    lineno++;
    return FIN;
}
else if (c==';') return FIN;
/* Devuelve el código ASCII de los demás caracteres */
return c;
}
```

## Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
  - Introducción
  - Codificación manual del analizador léxico
  - Generación automática del analizador léxico
- 5 Detección y recuperación de errores



# Implementación de los analizadores léxicos

## Generación automática del analizador léxico

### Características de la generación automática

- Los componentes léxicos se denotan mediante expresiones regulares.
- El generador léxico crea automáticamente el código a partir de las expresiones regulares.
- Generadores léxicos: lex, flex, plex, jlex, ...

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## COMPONENTES LÉXICOS

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

COMPONENTES LÉXICOS



EXPRESIONES REGULARES

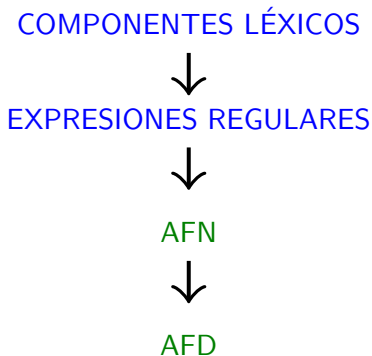
# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico



# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico



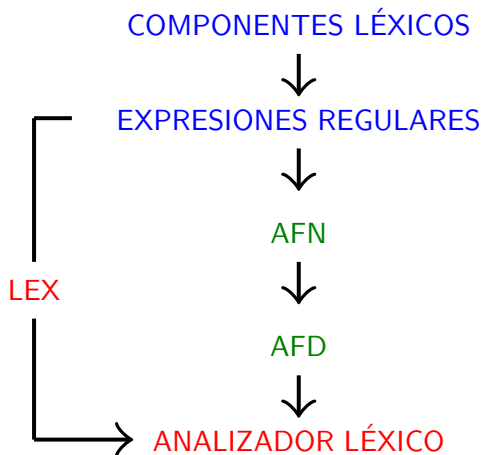
# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico



## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico



# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## LEX

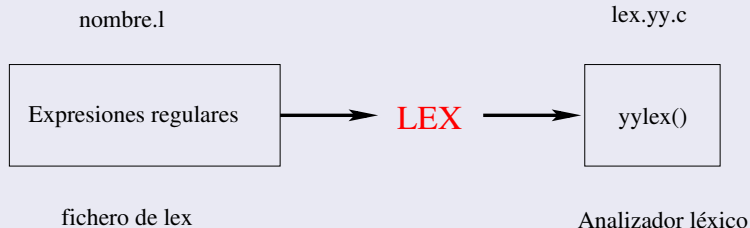
- Creado por M. E. Lesk y E. Schmidt (Bell Laboratories).
- Genera analizadores léxicos para C, Fortran, Raftor.
- Hay versiones para Unix, Linux, DOS, etc.



## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Funcionamiento de LEX



# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Estructura del fichero de LEX

**declaraciones** (opcional)

**% %**

**reglas de traducción de las expresiones regulares**

**% %**

**funciones auxiliares** (opcional)

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## LEX: expresiones regulares

- Símbolos especiales:

- + | : disyunción
- + ( ) : agrupación de expresiones regulares
- + \* : repetición de un patrón cero o más veces.
- + + : repetición de un patrón una o más veces.
- + ? : el patrón puede aparecer cero o una vez.
- + " " : delimitadores de cadenas
- + . : cualquier carácter distinto del salto de línea ( $\backslash n$ ).
- +  $\backslash n$  : salto de línea
- + \$ : carácter de final de línea
- + [ ] : delimitadores de clases de caracteres
- + ^ : inicio de línea y complementario de una clase.

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

LEX: expresiones regulares

## Nota

*Si se antepone la barra \ delante de un símbolo especial entonces sólo se representa a sí mismo:*

*\. → sólo representa el punto.*

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (LEX: expresiones regulares)

1 / 3)

Expresión regular	Significado
$a b$	$a, b$
$[ab]$	$a, b$
$ab$	$ab$
$ab+$	$ab, abb, abbb, \dots$
$(ab)+$	$ab, abab, ababab, \dots$
$ab^*$	$a, ab, abb, \dots$
$(ab)^*$	$\epsilon, ab, abab, \dots$
$ab\{1,3\}$	$ab, abb, abbb$

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (LEX: expresiones regulares

2 / 3)

Expresión regular	Significado
$[a-z]$	$a, b, c, \dots, z$
$[a \setminus -z]$	$a, -, z$
$[-az]$	$-, a, z$
$[az-]$	$a, z, -$
$[a-zA-Z]$	$a, b, \dots, z, A, B, \dots, Z$
$[a-zA-Z0-9]$	$a, b, \dots, z, A, B, \dots, Z, 0, 1, \dots, 9$
$[a-zA-Z0-9]^*$	<i>cero o más veces</i> $a, b, c, \dots, 9$
$[a-zA-Z0-9]^+$	<i>una o más veces</i> $a, b, c, \dots, 9$

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (LEX: expresiones regulares)

3 / 3

Expresión regular	Significado
$[\ \backslash t \backslash n]$	<i>espacio en blanco, tabulador y salto de línea</i>
$[\wedge ab]$	<i>cualquier carácter distinto de <math>a</math> o <math>b</math></i>
$[a \wedge b]$	<i><math>a</math>, acento circunflejo, <math>b</math></i>
$a/b$	<i><math>a</math> sólo si va seguido de <math>b</math></i>
$a\$$	<i><math>a</math> si va seguido del carácter <math>\backslash n</math></i>
$a/\backslash n$	<i><math>a</math> si va seguido del carácter <math>\backslash n</math></i>
$\wedge abc$	<i><math>abc</math> si está escrito al principio de la línea</i>

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## LEX: Zona de declaraciones

(opcional)

- Código extendido de lenguaje C delimitado por `%{ y }%`
  - + Ficheros de cabecera.
  - + Macros.
  - + Prototipos de funciones.
  - + Variables globales
  - + Etc.
- Directivas de lex: `%a, %n %o, %p, ...`
- Declaración de definiciones regulares.



# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (Definiciones regulares)

1/2

<b>numero</b>	<code>[0-9]</code>
<b>letra</b>	<code>[a-zA-Z]</code>
<b>identificador</b>	<code>{letra}({letra} {numero})*</code>

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (Definiciones regulares

2/2)

La definición regular **identificador** definida como

$$\{letra\}(\{letra\}|\{numero\})^*$$

es transformada en

$$[a - zA - Z]([a - zA - Z]|[0 - 9])^*$$

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## LEX: Zona de reglas de traducción

expresión regular 1	sentencias 1 de lenguaje C
expresión regular 2	sentencias 2 de lenguaje C
...	
expresión regular n	sentencias n de lenguaje C

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (Lex: zona de reglas)

```
%%  
{numero}+\.?|{numero}*{numero}+ {  
    sscanf(yytext, "%lf",&yylval.val);  
    return NUMBER;  
}  
  
{identificador} { Symbol *s;  
    if ((s=lookup(yytext)) == 0)  
        s = install (yytext, INDEFINIDA, 0.0);  
    yyval.sym = s;  
    return s->tipo == INDEFINIDA ? VAR : s->tipo;  
}
```

# Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## LEX: Zona de funciones auxiliares

(opcional)

- Código de funciones auxiliares utilizadas por las reglas de traducción
- También se pueden incluir
  - + Ficheros de cabecera.
  - + Macros.
  - + Prototipos de funciones.
  - + Declaración de variables globales
  - + Etc.

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

Ejemplo (Lex: zona de declaraciones

1/3)

```
%{  
#include "macros.h"  
#include "hoc3.h"  
#include "y.tab.h"  
extern char *prognose;  
extern int  lineno;  
%}  
  
/* definiciones regulares */  
numero      [0-9]  
letra       [a-zA-Z]  
identificador {letra}({letra}|{numero})*
```

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (Lex: zona de reglas

2/3)

```

%%
[ \t]          { ; } /* saltar los espacios y los tabuladores */
{numero}+\.\?—{numero}*{numero}+  {
    sscanf(yytext, "%lf",&yyval.val);
    return NUMBER;
}
{identificador} { Symbol *s;
    if ((s=lookup(yytext)) == 0)
        s = install (yytext, INDEFINIDA, 0.0);
    yyval.sym = s;
    return s->tipo == INDEFINIDA ? VAR : s->tipo;
}
;          {return FIN ;}
\n        {lineno++; return FIN;}
.          {return yytext[0];} /* todo lo demás */

```

## Implementación de los analizadores léxicos

Generación automática del analizador léxico

## Ejemplo (Lex: zona de funciones auxiliares)

3/3

```
/***** Zona de funciones auxiliares *****/  
extern FILE *yyin, *yyout;  
main(int cantidad, char *palabras[])  
{  
    switch(cantidad)  
    {  
        case 2: yyin=fopen(palabras[1], 'r');  
            break;  
        case 3: yyin=fopen(palabras[1], 'r');  
                yyout=fopen(palabras[2], 'w');  
    }  
yylex();  
}
```



## Contenido del tema

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores

## Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores
  - Clasificación de los errores del proceso de traducción
    - Errores léxicos
    - Tratamiento de los errores
    - Métodos de recuperación de los errores léxicos

# Detección y recuperación de errores

Clasificación de los errores del proceso de traducción

## Tipos de errores

- **Invisibles:** errores que **no** pueden ser detectados por el procesador de lenguajes
- **Visibles:** errores que **sí** pueden ser detectados

# Detección y recuperación de errores

Clasificación de los errores del proceso de traducción

## Ejemplo (Error invisible)

*Se ha tecleado*

$$a = b + c$$

*en vez*

$$a = b * c$$

# Detección y recuperación de errores

Clasificación de los errores del proceso de traducción

## Errores **invisibles**

- Suelen ser errores **“conceptuales”** o **“algorítmicos”**
- **No pueden ser detectados** porque no infringen ninguna norma del lenguaje de programación.
- Podrían ser detectados si se incluyen **técnicas de verificación** en el procesador de lenguajes:
  - + Poseen gran complejidad
  - + Su coste computacional es muy elevado
- En la práctica, estos errores son **“detectados”** y **“corregidos”** **manualmente**

# Detección y recuperación de errores

Clasificación de los errores del proceso de traducción

## Errores **visibles**

- Pueden ser **detectados**:
  - + durante el proceso de traducción
  - + o durante la ejecución del programa ejecutable.
- Son producidos porque no se ha tenido suficiente “**cuidado**” al programar:
  - + **falta de comprensión o desconocimiento** de las características del lenguaje
  - + o **confusión** con las características de otro lenguaje.
- Se caracterizan por
  - + Ser errores de **ortografía**
  - + Ser errores que **omiten** requisitos formales del lenguaje de programación.

# Detección y recuperación de errores

Clasificación de los errores del proceso de traducción

## Errores **visibles**

Se clasifican según **la fase** en que son detectados:

- **Errores léxicos:** no se reconoce un componente léxico correcto.
- **Errores sintácticos:**
  - + Sentencia que no respeta las reglas gramaticales del lenguaje de programación
  - + Se origina al procesar un componente léxico “**inesperado**”
- **Errores semánticos:** el significado de un componente léxico es incorrecto o inapropiado.
- **Errores de ejecución:**
  - + Funcionamiento incorrecto del programa.
  - + No detectables durante el proceso de compilación.

# Detección y recuperación de errores

Clasificación de los errores del proceso de traducción

## Ejemplos (Errores *visibles*)

- *Errores léxicos:*
  - + *Componente léxico mal escrito.*
  - + *Componente léxico con símbolos no permitidos.*
- *Errores sintácticos:*
  - + *Sentencias de control incompletas o mal escritas.*
  - + *Parámetros incorrectos, paréntesis no balanceados, ...*
- *Errores semánticos:*
  - + *Identificador usado incorrectamente o no declarado.*
  - + *Valor fuera de rango, ...*
- *Errores de ejecución:*
  - + *Bucles infinitos.*
  - + *Flujo de control incorrecto, ...*



# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores
  - Clasificación de los errores del proceso de traducción
  - Errores léxicos
  - Tratamiento de los errores
  - Métodos de recuperación de los errores léxicos

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Tipos de errores léxicos

#### Componentes léxicos

- con símbolos ilegales.
- incompletos o muy largos.
- mal escritos: infrigen alguna restricción del lenguaje de programación

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplos (Errores léxicos)

1/3

- *Componentes léxicos con símbolos ilegales*
  - + *Símbolo no permitido en un identificador: dato\$*
  - + *Símbolo no permitido en un número: 3.17#10*

## Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

## Ejemplos (Errores léxicos)

2/3

• *Componentes léxicos incompletos*

- + *Cadenas de caracteres no cerradas*

```
/* faltan las comillas finales */  
static char *nombre = ‘‘Almudena ... ;
```

- + *Comentarios no cerrados.*

```
/* Este es un ejemplo maravilloso de comentario  
que no tiene cierre final
```

## Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

## Ejemplos (Errores léxicos)

3/3

- Componentes léxicos mal escritos

Lenguaje	Componente léxico	<i>Incorrecto</i>	<i>Correcto</i>
C	IDENTIFICADOR	1dato-	dato_1
C	NÚMERO	3.14.15	3.1415
C	MENOR IGUAL	=<	<=
Prolog	MENOR IGUAL	<=	=<
Fortran	MENOR IGUAL	.le	.le.

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Características de los **errores** de los **componentes léxicos**

- Son provodados por una **escritura incorrecta**.
- Son los más **frecuentes**.
- El Análisis Léxico **no puede detectar** todos los errores de los componentes léxicos.
- Muchos **errores** de los componentes **léxicos** son **detectados** durante **las demás fases**.
- Pueden **provocar errores** sintácticos, semánticos o de ejecución.

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplo (1.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Palabra reservada mal escrita*

```
fi (x >= 0) valor_absoluto = x;  
    else valor_absoluto = -x;
```

### Nota

- *El análisis léxico genera para **fi** el componente léxico IDENTIFICADOR en vez de IF.*
- *Este error podrá ser detectado durante el análisis sintáctico*

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplo (1.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Palabra reservada mal escrita*

```
fi (x >= 0) valor_absoluto = x;  
    else valor_absoluto = -x;
```

### Nota

- El análisis léxico genera para *fi* el componente léxico *IDENTIFICADOR* en vez de *IF*.
- Este error podrá ser detectado durante el análisis *sintáctico*



# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplo (2.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Omisión de símbolo de fin de sentencia*

```
/* falta el punto y coma */  
if (x >= 0) valor_absoluto = x  
else valor_absoluto = -x;
```

### Nota

*Este error puede ser detectado durante el análisis sintáctico.*

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplo (2.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Omisión de símbolo de fin de sentencia*

```
/* falta el punto y coma */  
if (x >= 0) valor_absoluto = x  
    else valor_absoluto = -x;
```

### Nota

*Este error puede ser detectado durante el análisis *sintáctico*.*

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

**Ejemplo** (3.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Índice de un array que posee un valor que fuera de rango*

```
a[-999999] = 10;
```

Nota

*Este error puede ser detectado durante el análisis semántico.*

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

**Ejemplo** (3.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Índice de un array que posee un valor que fuera de rango*

```
a[-999999] = 10;
```

**Nota**

*Este error puede ser detectado durante el análisis **semántico**.*

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplo (4.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Argumento erróneo de una función*

```
valor = log(-10);
```

### Nota

- *Este error se detectará durante la ejecución.*
- *Podría ser detectado con técnicas de verificación*

# Detección y recuperación de errores

## Errores léxicos

### Ejemplo (4.- Error no detectable durante el análisis léxico)

*Argumento erróneo de una función*

```
valor = log(-10);
```

### Nota

- *Este error se detectará durante la **ejecución**.*
- *Podría ser detectado con técnicas de **verificación***

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores
  - Clasificación de los errores del proceso de traducción
  - Errores léxicos
  - Tratamiento de los errores
  - Métodos de recuperación de los errores léxicos

# Detección y recuperación de errores

## Tratamiento de los errores

### Criterios “generales” para el tratamiento de los errores

- Informar del error
  - + Localización: ubicación del error dentro del código.
  - + Descripción: motivo o características del error
- Evitar la cascada de errores
  - + Informar una sola vez de cada error.
  - + Si un error es producido por otro entonces sólo se debe informar del primero.
- Reparar el error, si es posible, e informar de la corrección realizada.
- Continuar con el proceso de traducción para detectar otros posibles errores.



# Detección y recuperación de errores

## Tratamiento de los errores

### Criterios “generales” para el tratamiento de los errores

- Informar del error
  - + Localización: ubicación del error dentro del código.
  - + Descripción: motivo o características del error
- Evitar la cascada de errores
  - + Informar una sola vez de cada error.
  - + Si un error es producido por otro entonces sólo se debe informar del primero.
- Reparar el error, si es posible, e informar de la corrección realizada.
- Continuar con el proceso de traducción para detectar otros posibles errores.

# Detección y recuperación de errores

## Tratamiento de los errores

### Criterios “generales” para el tratamiento de los errores

- Informar del error
  - + Localización: ubicación del error dentro del código.
  - + Descripción: motivo o características del error
- Evitar la cascada de errores
  - + Informar una sola vez de cada error.
  - + Si un error es producido por otro entonces sólo se debe informar del primero.
- Reparar el error, si es posible, e informar de la corrección realizada.
- Continuar con el proceso de traducción para detectar otros posibles errores.

# Detección y recuperación de errores

## Tratamiento de los errores

### Criterios “generales” para el tratamiento de los errores

- Informar del error
  - + Localización: ubicación del error dentro del código.
  - + Descripción: motivo o características del error
- Evitar la cascada de errores
  - + Informar una sola vez de cada error.
  - + Si un error es producido por otro entonces sólo se debe informar del primero.
- Reparar el error, si es posible, e informar de la corrección realizada.
- Continuar con el proceso de traducción para detectar otros posibles errores.

# Detección y recuperación de errores

## Tratamiento de los errores

### Nota

*Los criterios “**generales**” para el tratamiento de los errores son aplicables a **todos** los tipos de errores.*

# Detección y recuperación de errores

## Tratamiento de los errores

### Nota (Reparación del error)

- **Siempre** *debe ser revisada después por el programador.*
- Sólo **propone** *una solución, que no tiene por qué ser la correcta.*
- Sólo *pretende que el proceso de traducción **continúe** ... para detectar más errores.*

# Contenido de la sección

- 1 Introducción
- 2 Especificación de componentes léxicos
- 3 Reconocimiento de componentes léxicos
- 4 Implementación de los analizadores léxicos
- 5 Detección y recuperación de errores
  - Clasificación de los errores del proceso de traducción
  - Errores léxicos
  - Tratamiento de los errores
  - Métodos de recuperación de los errores léxicos

# Detección y recuperación de errores

Métodos de recuperación de los errores léxicos

## Métodos de procesamiento de los errores léxicos

- Modo de **pánico o de sincronización**
- Método de **la mínima distancia**

## Detección y recuperación de errores

Métodos de recuperación de los errores léxicos

### Modo de pánico o de sincronización

- Se **eliminan** los caracteres de la entrada hasta que se encuentra un componente léxico bien formado
- Es **sencillo** de aplicar
- Puede **provocar** errores en el análisis sintáctico al suprimir otros componentes léxicos correctos.
- Es útil en un entorno **interactivo**.



# Detección y recuperación de errores

Métodos de recuperación de los errores léxicos

## Método de la mínima distancia

- **Supone** que la mayoría de los errores léxicos son provocados por una **única** transformación.
- Se realizan transformaciones relativamente simples:
  - + **Eliminar** un carácter: `dato$1`  $\implies$  `dato1`
  - + **Insertar** un carácter: `include`  $\implies$  `#include`
  - + **Permutar** dos caracteres: `=>`  $\implies$  `>=`
  - + **Modificar** un carácter: `/#`  $\implies$  `/*`
- Es **costoso** de implementar.
- Es adecuado para un entorno local o **interactivo**.

## Detección y recuperación de errores

Métodos de recuperación de los errores léxicos

### Nota

- *Se debe informar de la transformación realizada.*
- *La transformación no pretende corregir el error, sino continuar con el análisis léxico.*
- *Posteriormente, el programador deberá supervisar la transformación realizada.*

# PROCESADORES DE LENGUAJES

## TEMA II: ANÁLISIS LÉXICO

Prof. Dr. Nicolás Luis Fernández García

Departamento de Informática y Análisis Numérico  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Córdoba

Curso académico 2009 - 2010