

Modelos de Computación



Los Del DGIIM, losdelldgiim.github.io

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

Modelos de Computación

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Arturo Olivares Martos

Granada, 2024-2025

Índice general

1. Relaciones de Problemas	5
1.1. Introducción a la Computación	5
1.1.1. Cálculo de gramáticas	16
1.2. Autómatas Finitos	22

1. Relaciones de Problemas

1.1. Introducción a la Computación

Ejercicio 1.1.1. Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$V = \{S, X, Y\}$$

$$T = \{a, b\}$$

$$S = S$$

1. Describe el lenguaje generado por la gramática teniendo en cuenta que P viene descrito por:

$$S \rightarrow XYX$$

$$X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$$

$$Y \rightarrow bbb$$

Sea $L = \{ubbbv \mid u, v \in \{a, b\}^*\}$. Demostraremos mediante doble inclusión que $L = \mathcal{L}(G)$.

- ⊂) Sea $w \in L$. Entonces, $w = ubbbv$ con $u, v \in \{a, b\}^*$. Veamos que $S \xRightarrow{*} w$:

$$S \Rightarrow XYX \Rightarrow XbbbX$$

Además, es fácil ver que la regla de producción $X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$ nos permite generar cualquier palabra $u \in \{a, b\}^*$. Por tanto, tenemos que $X \xRightarrow{*} u$ y $X \xRightarrow{*} v$; teniendo así que $S \xRightarrow{*} ubbbv$.

- ⊃) Sea $w \in \mathcal{L}(G)$. Veamos la forma de w :

$$S \Rightarrow XYX \Rightarrow XbbbX \Rightarrow ubbbv \mid u, v \in \{a, b\}^*$$

donde en el último paso hemos empleado lo visto en el apartado anterior de la regla de producción $X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$. Por tanto, $w \in L$.

2. Describe el lenguaje generado por la gramática teniendo en cuenta que P viene descrito por:

$$S \rightarrow aX$$

$$X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$$

Sea $L = \{au \mid u \in \{a, b\}^*\}$. Demostraremos mediante doble inclusión que $L = \mathcal{L}(G)$.

⊂) Sea $w \in L$. Entonces, $w = au$ con $u \in \{a, b\}^*$. Veamos que $S \xRightarrow{*} w$:

$$S \Rightarrow aX \Rightarrow au$$

donde en el último paso hemos empleado lo visto respecto a la regla de producción $X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$. Por tanto, $w \in \mathcal{L}(G)$.

⊃) Sea $w \in \mathcal{L}(G)$. Veamos la forma de w :

$$S \Rightarrow aX \Rightarrow au \mid u \in \{a, b\}^*$$

donde en el último paso hemos empleado lo visto respecto a la regla de producción $X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$. Por tanto, $w \in L$.

3. Describe el lenguaje generado por la gramática teniendo en cuenta que P viene descrito por:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow XaXaX \\ X &\rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon \end{aligned}$$

Sea $L = \{uavawa \mid u, v, w \in \{a, b\}^*\}$. Demostraremos mediante doble inclusión que $L = \mathcal{L}(G)$.

⊂) Sea $z \in L$. Entonces, $z = uavawa$ con $u, v, w \in \{a, b\}^*$. Veamos que $S \xRightarrow{*} z$:

$$S \Rightarrow XaXaX \Rightarrow uavawa$$

donde en el último paso hemos empleado lo visto respecto a la regla de producción $X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$. Por tanto, $z \in \mathcal{L}(G)$.

⊃) Sea $z \in \mathcal{L}(G)$. Veamos la forma de z :

$$S \Rightarrow XaXaX \Rightarrow uavawa \mid u, v, w \in \{a, b\}^*$$

donde en el último paso hemos empleado lo visto respecto a la regla de producción $X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon$. Por tanto, $z \in L$.

4. Describe el lenguaje generado por la gramática teniendo en cuenta que P viene descrito por:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow SS \mid XaXaX \mid \varepsilon \\ X &\rightarrow bX \mid \varepsilon \end{aligned}$$

Sea el lenguaje $L = \{b^i ab^j ab^k \mid i, j, k \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}$. Demostraremos mediante doble inclusión que $L^* = \mathcal{L}(G)$.

⊂) Sea $z \in L^* = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} L^i$. Sea n el menor número natural tal que $z \in L^n$. Notando por $n_a(z)$ al número de a 's en z , tenemos que $n_a(z) = 2n$. Entonces, $z \in L \cdot \dots \cdot L$ (n veces), por lo que existen $i_1, j_1, k_1, \dots, i_n, j_n, k_n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ tales que $z = b^{i_1} ab^{j_1} ab^{k_1} \cdot \dots \cdot b^{i_n} ab^{j_n} ab^{k_n}$. Veamos que $S \xRightarrow{*} z$:

- Para conseguir el número de a 's deseado, empleamos la regla de producción $S \rightarrow SS$ y reemplazamos una de las S por $XaXaX$. Esto lo hacemos n veces.
 - Posteriormente, cada X la sustituiremos tantas veces como sea necesario por bX para conseguir el número de b 's deseado en cada posición, y finalizaremos con $X \rightarrow \varepsilon$.
- ▷) Sea $z \in \mathcal{L}(G)$, y sea $n_a(z)$ el número de a 's en z . Entonces, como el número de a siempre aumenta de dos en dos, tenemos que $n_a(z) = 2n$ para algún $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$. Veamos la forma de z :
- Para llegar a z , hemos tenido que emplear la regla de producción $S \rightarrow SS \rightarrow SXaXaX$ n veces. Una vez llegados aquí, para eliminar la S (ya que habremos llegado a $n_a(z)$ a 's), empleamos la regla de producción $S \rightarrow \varepsilon$.
 - Posteriormente, para cada X , tan solo podemos emplear la regla de producción $X \rightarrow bX \mid \varepsilon$ para conseguir el número de b 's deseado en cada posición.

Por tanto, es directo ver que $z \in L^n \subseteq L^*$.

Ejercicio 1.1.2. Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$. Determinar en cada caso el lenguaje generado por la gramática.

1. Tenga en cuenta que:

$$\begin{aligned}
 V &= \{S, A\} \\
 T &= \{a, b\} \\
 S &= S \\
 P &= \left\{ \begin{array}{ll} S & \rightarrow abAS \mid a \\ abA & \rightarrow baab \\ A & \rightarrow b \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

Sea $L = \{ua \mid u \in \{abb, baab\}^*\}$. Demostraremos mediante doble inclusión que $L = \mathcal{L}(G)$.

- ▷) Sea $w \in L$. Entonces, $w = ua$ con $u \in \{abb, baab\}^*$. Veamos que $S \xRightarrow{*} w$. Para ello, sabemos que $u \in \{abb, baab\}^* = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} \{abb, baab\}^i$. Sea n el menor número natural tal que $u \in \{abb, baab\}^n$, es decir, es una concatenación de n subcadenas, cada una de las cuales es o bien abb o bien $baab$. Veamos que S produce ambas subcadenas:

- Para producir abb , tenemos que $S \rightarrow abAS \rightarrow abbS$.
- Para producir $baab$, tenemos que $S \rightarrow abAS \rightarrow baabS$.

Como vemos, en cada caso podemos concatenar la subcadena necesaria, pero siempre nos quedará una S al final. Usamos la regla de producción $S \rightarrow a$ para eliminarla, llegando así a w , por lo que $S \xRightarrow{*} w$ y $w \in \mathcal{L}(G)$.

- ▷) Sea $w \in \mathcal{L}(G)$. Veamos la forma de w , para lo cual hay dos opciones:

- $S \rightarrow a$: En este caso, habremos finalizado la palabra con a , por lo que habremos añadido la subcadena a a la palabra al final.
- $S \rightarrow abAS$: En este caso, también hay dos opciones:
 - $S \rightarrow abAS \rightarrow baabS$: En este caso, habremos concatenado $baab$ con S , por lo que habremos añadido la subcadena $baab$ a la palabra.
 - $S \rightarrow abAS \rightarrow abbS$: En este caso, habremos concatenado abb con S , por lo que habremos añadido la subcadena abb a la palabra.

Por tanto, w es de la forma ua con u una concatenación de abb 's y $baab$'s, es decir, $u \in \{abb, baab\}^*$. Por tanto, $w \in L$.

2. Tenga en cuenta que:

$$\begin{aligned}
 V &= \{\langle \text{número} \rangle, \langle \text{dígito} \rangle\} \\
 T &= \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \\
 S &= \langle \text{número} \rangle \\
 P &= \left\{ \begin{array}{ll} \langle \text{número} \rangle & \rightarrow \langle \text{número} \rangle \langle \text{dígito} \rangle \\ \langle \text{número} \rangle & \rightarrow \langle \text{dígito} \rangle \\ \langle \text{dígito} \rangle & \rightarrow 0 \mid 1 \mid 2 \mid 3 \mid 4 \mid 5 \mid 6 \mid 7 \mid 8 \mid 9 \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

Tenemos que $\mathcal{L}(G)$ es el conjunto de los números naturales, permitiendo tantos ceros a la izquierda como se quiera. Es decir (usando la notación de potencia y concatenación vista para lenguajes):

$$L = \{0^i n \mid i \in \mathbb{N} \cup \{0\}, n \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}$$

Demostremoslo mediante doble inclusión que $L = \mathcal{L}(G)$.

⊂) Sea $w \in L$. Entonces, $w = 0^i n$ con $i \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ y $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$. Veamos que $\langle \text{número} \rangle \xRightarrow{*} w$:

- En primer lugar, aplicamos $|w| - 1$ veces la regla de producción $\langle \text{número} \rangle \rightarrow \langle \text{número} \rangle \langle \text{dígito} \rangle$ y la regla que lleva de $\langle \text{dígito} \rangle$ a uno de los símbolos terminales, consiguiendo así en cada etapa reemplazar la última variable presente en la cadena por un dígito.
- Finalmente, aplicamos la regla de producción $\langle \text{número} \rangle \rightarrow \langle \text{dígito} \rangle$ para reemplazar la última variable por un dígito, que será el primero del número formado.

Por tanto, $\langle \text{número} \rangle \xRightarrow{*} w$, teniendo que $w \in \mathcal{L}(G)$.

⊃) Sea $w \in \mathcal{L}(G)$. Como la única regla que aumenta la longitud es la regla de producción $\langle \text{número} \rangle \rightarrow \langle \text{número} \rangle \langle \text{dígito} \rangle$, tenemos que w tiene la forma:

$$\begin{aligned}
 \langle \text{número} \rangle &\xRightarrow{*} \langle \text{número} \rangle \langle \text{dígito} \rangle \xRightarrow{|w|-1 \text{ veces}} \\
 &\xRightarrow{*} \langle \text{número} \rangle \langle \text{dígito} \rangle \langle \text{dígito} \rangle \xRightarrow{|w|-1 \text{ veces}} \dots \langle \text{dígito} \rangle \xRightarrow{*} \\
 &\xRightarrow{*} \langle \text{dígito} \rangle \xRightarrow{|w| \text{ veces}} \dots \langle \text{dígito} \rangle
 \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que se trata una sucesión de $|w|$ dígitos, lo que nos lleva a que $w \in L$.

3. Tenga en cuenta que:

$$\begin{aligned} V &= \{A, S\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & aS \mid aA \\ A & \rightarrow & bA \mid b \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Sea $L = \{a^n b^m \in \{a, b\}^* \mid n, m \in \mathbb{N}\}$. Demostraremos mediante doble inclusión que $L = \mathcal{L}(G)$.

⊂) Sea $w \in L$. Entonces, $w = a^n b^m$ con $n, m \in \mathbb{N}$. Veamos que $S \xRightarrow{*} w$:

- En primer lugar, aplicamos $n-1$ veces la regla de producción $S \rightarrow aS$ para obtener $a^{n-1}S$,

$$S \xRightarrow{*} a^{n-1}S$$

- Para cambiar a la etapa de añadir b 's, aplicamos la regla de producción $S \rightarrow aA$, obteniendo así $a^n A$,
- Después, aplicamos $m-1$ veces la regla de producción $A \rightarrow bA$ para obtener $a^n b^{m-1} A$.
- Para finalizar, aplicamos la regla de producción $A \rightarrow b$ para obtener $a^n b^m$.

Por tanto, $S \xRightarrow{*} w$, teniendo que $w \in \mathcal{L}(G)$.

⊃) Sea $w \in \mathcal{L}(G)$. Vemos que en la palabra siempre va a haber tan solo una variable (ya sea S o A). Se empezará con la S , y en cierto momento se cambiará a la A , sin poder entonces volver a la S .

- Cuando se está en la etapa en la que hay S , tan solo se pueden añadir a 's, o bien cambiar a la A .
- Cuando se está en la etapa en la que hay A , tan solo se pueden añadir b 's.

Por tanto, tenemos que w estará formada por una sucesión de a 's seguida de una sucesión de b 's, lo que nos lleva a que $w \in L$.

Ejercicio 1.1.3. Encontrar gramáticas de tipo 2 para los siguientes lenguajes sobre el alfabeto $\{a, b\}$. En cada caso determinar si los lenguajes generados son de tipo 3, estudiando si existe una gramática de tipo 3 que los genera.

1. Palabras en las que el número de b no es tres.

Tenemos varias opciones:

- Que no tenga b 's.
- Que tenga una b .
- Que tenga dos b 's.
- Que tenga 4 o más b 's.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, A, X\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow A \mid AbA \mid AbAbA \mid XbXbXbXbX \\ A \rightarrow aA \mid \varepsilon \\ X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Esta gramática no obstante es de tipo 2. Busquemos otra que sea de tipo 3. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X, Y, Z, W\} \\ T' &= \{a, b\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow \varepsilon \mid aS \mid bX \\ X \rightarrow \varepsilon \mid aX \mid bY \\ Y \rightarrow \varepsilon \mid aY \mid bZ \\ Z \rightarrow aZ \mid bW \\ W \rightarrow \varepsilon \mid aW \mid bW \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Esta sí es de tipo 3, y genera el lenguaje deseado.

2. Palabras que tienen 2 ó 3 b .

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, A, B\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow AbAbABA \\ A \rightarrow aA \mid \varepsilon \\ B \rightarrow b \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Esta gramática no obstante es de tipo 2. Busquemos otra que sea de tipo 3. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X, Y, Z, W, V, T\} \\ T' &= \{a, b\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aS \mid X \\ X \rightarrow bY \\ Y \rightarrow aY \mid Z \\ Z \rightarrow bW \\ W \rightarrow aW \mid \varepsilon \mid V \\ V \rightarrow bT \\ T \rightarrow aT \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Esta gramática ya es de tipo 3, pero contiene un número elevado de variables. Veamos si podemos reducirlo: Sea la gramática $G'' = (V'', T'', P'', S'')$ dada por:

$$\begin{aligned} V'' &= \{S, X, Y, Z\} \\ T'' &= \{a, b\} \\ S'' &= S \\ P'' &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & aS \mid bX \\ X & \rightarrow & aX \mid bY \\ Y & \rightarrow & aY \mid \varepsilon \mid bZ \\ Z & \rightarrow & aZ \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que, en esta gramática de tipo 3, ya hemos conseguido el menor número de variables posibles, que representan las 4 etapas. Como la última es opcional, está la regla $Y \rightarrow \varepsilon$, para así no agregar la tercera b .

Ejercicio 1.1.4. Encontrar gramáticas de tipo 2 para los siguientes lenguajes sobre el alfabeto $\{a, b\}$. En cada caso determinar si los lenguajes generados son de tipo 3, estudiando si existe una gramática de tipo 3 que los genera.

1. Palabras que no contienen la subcadena ab .

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, A\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & aA \mid bS \mid \varepsilon \\ A & \rightarrow & aA \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos además que esta gramática es de tipo 3, y se tiene que:

$$\mathcal{L}(G) = \{b^i a^j \mid i, j \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}$$

2. Palabras que no contienen la subcadena baa .

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, B\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & aS \mid bB \mid \varepsilon \\ B & \rightarrow & bB \mid abB \mid a \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos además que esta gramática es de tipo 3.

Ejercicio 1.1.5. Encontrar una gramática libre de contexto que genere el lenguaje sobre el alfabeto $\{a, b\}$ de las palabras que tienen más a que b (al menos una más).

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, S'\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow S'aS' \\ S' \rightarrow S'aS' \mid aS'bS' \mid bS'aS' \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.1.6. Encontrar, si es posible, una gramática regular (o, si no es posible, una gramática libre del contexto) que genere el lenguaje L supuesto que $L \subset \{a, b\}^*$ y verifica:

1. $u \in L$ si, y solamente si, verifica que u no contiene dos símbolos b consecutivos.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \{ S \rightarrow aS \mid baS \mid b \mid \varepsilon \} \end{aligned}$$

2. $u \in L$ si, y solamente si, verifica que u contiene dos símbolos b consecutivos.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, B, F\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aS \mid bB \\ B \rightarrow bF \mid aS \\ F \rightarrow aF \mid bF \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que, en este caso, tenemos tres estados:

- S : No hemos encontrado dos b 's consecutivas.
- B : Hemos encontrado una b , y puede ser que nos encontremos la segunda b .
- F : Hemos encontrado dos b 's consecutivas; ya hay libertad.

Sí es cierto que usamos tres variables. Para usar solo dos variables, podemos hacer lo siguiente. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X\} \\ T' &= \{a, b\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aS \mid bS \mid bbX \\ X \rightarrow aX \mid bX \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.1.7. Encontrar, si es posible, una gramática regular (o, si no es posible, una gramática libre del contexto) que genere el lenguaje L supuesto que $L \subset \{a, b\}^*$ y verifica:

1. $u \in L$ si, y solamente si, verifica que contiene un número impar de símbolos a .

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aX \mid bS \\ X \rightarrow aS \mid bX \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

2. $u \in L$ si, y solamente si, verifica que no contiene el mismo número de símbolos a que de símbolos b .

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, A, B, X\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow AaA \mid BbB \\ A \rightarrow AaA \mid X \\ B \rightarrow BbB \mid X \\ X \rightarrow aXbX \mid bXaX \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.1.8. Dado el alfabeto $A = \{a, b\}$ determinar si es posible encontrar una gramática libre de contexto que:

1. Genere las palabras de longitud impar, y mayor o igual que 3, tales que la primera letra coincida con la letra central de la palabra.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X, A, B, C, D\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow A \mid B \\ A \rightarrow aCX \\ C \rightarrow a \mid XCX \\ B \rightarrow bDX \\ D \rightarrow b \mid XDX \\ X \rightarrow a \mid b \end{array} \right\} \end{aligned}$$

2. Genere las palabras de longitud par, y mayor o igual que 2, tales que las dos letras centrales coincidan.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow XSX \mid C \\ C \rightarrow aa \mid bb \\ X \rightarrow a \mid b \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.1.9. Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow SS \\ S \rightarrow XXX \\ X \rightarrow aX \mid Xa \mid b \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Determinar si el lenguaje generado por la gramática es regular. Justificar la respuesta.

Sea la siguiente gramática regular $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X\} \\ T' &= \{a, b\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aS \mid bX \\ X \rightarrow aX \mid bY \\ Y \rightarrow aY \mid bZ \\ Z \rightarrow aZ \mid bW \mid \varepsilon \\ W \rightarrow aW \mid bU \\ U \rightarrow aU \mid bV \\ V \rightarrow aV \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Tenemos que $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$, y como G' es una gramática regular, tenemos que $\mathcal{L}(G)$ es regular. Sí es cierto que en el tema 2 aprendemos otras maneras de demostrarlo más sencillas, como buscar un autómata finito que lo genere.

Ejercicio 1.1.10. Dado un lenguaje L sobre un alfabeto A , ¿es L^* siempre numerable? ¿nunca lo es? ¿o puede serlo unas veces sí y otras, no? Pon ejemplos en este último caso.

L^* es siempre numerable, veámos por qué. L^* es un lenguaje sobre el alfabeto A , por lo que $L^* \subseteq A^*$ y A^* es numerable (visto en teoría), luego L^* también lo es.

Ejercicio 1.1.11. Dado un lenguaje L sobre un alfabeto A , caracterizar cuando $L^* = L$. Esto es, dar un conjunto de propiedades sobre L de manera que L cumpla esas propiedades si y sólo si $L^* = L$.

$$L = L^* \iff \begin{cases} \varepsilon \in L \\ \wedge \\ u, v \in L \implies uv \in L \end{cases}$$

Es decir, $L = L^*$ si y solo si la cadena vacía está en L y además es cerrado para concatenaciones.

Demostración. Demostramos mediante doble implicación.

\Leftarrow) La inclusión $L \subseteq L^*$ es obvia, por lo que solo falta demostrar la otra inclusión.

Sea $v \in L^*$:

1. Si $v = \varepsilon \implies v \in L$ por hipótesis.
2. Si $v \neq \varepsilon$, $\exists n \in \mathbb{N}$ tal que

$$v = a_1 a_2 \dots a_n$$

con $a_i \in L \forall i \in \{1, \dots, n\}$, de donde tenemos que $v \in L$, por ser cerrado para concatenaciones. Luego $L^* \subseteq L$.

\implies) Hemos de probar dos cosas:

1. $\varepsilon \in L^* = L$.
2. Sean $u, v \in L = L^* \implies uv \in L^* = L$.

□

Ejercicio 1.1.12. Dados dos homomorfismos $f : A^* \rightarrow B^*$, $g : A^* \rightarrow B^*$, se dice que son iguales si $f(x) = g(x)$, $\forall x \in A^*$. ¿Existe un procedimiento algorítmico para comprobar si dos homomorfismos son iguales?

Sí, basta probar que su imagen coincide sobre un conjunto finito de elementos, los de A :

$$f(x) = g(x) \quad \forall x \in A^* \iff f(a) = g(a) \quad \forall a \in A$$

Demostración.

\Leftarrow) Sea $v \in A^*$, $\exists n \in \mathbb{N}$ tal que $v = a_1 a_2 \dots a_n$ con $a_i \in A \forall i \in \{1, \dots, n\}$

$$f(v) = f(a_1) f(a_2) \dots f(a_n) = g(a_1) g(a_2) \dots g(a_n) = g(v)$$

\implies) Sea $a \in A \implies a \in A^* \implies f(a) = g(a)$.

□

Ejercicio 1.1.13. Sea $L \subseteq A^*$ un lenguaje arbitrario. Sea $C_0 = L$ y definamos los lenguajes S_i y C_i , para todo $i \geq 1$, por $S_i = C_{i-1}^+$ y $C_i = \overline{S_i}$.

1. ¿Es S_1 siempre, nunca o a veces igual a C_2 ? Justifica la respuesta.
2. Demostrar que $S_2 = C_3$, cualquiera que sea L .

Observación. Demuestra que C_2 es cerrado para la concatenación.

Ejercicio 1.1.14. Demuestra que, para todo alfabeto A , el conjunto de los lenguajes finitos sobre dicho alfabeto es numerable.

Sea $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, con $n \in \mathbb{N}$. Definimos el siguiente conjunto:

$$\Gamma = \{L \subseteq A^* \mid L \text{ es finito}\}$$

Dado un símbolo $z \notin A$, definimos el conjunto $B = \{z\} \cup A$. Sea B^* numerable, y busquemos una inyección de Γ en B^* . Dado un lenguaje $L \in \Gamma$, sea $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$, con $m \in \mathbb{N}$ y $l_i \in A^* \forall i \in \{1, \dots, m\}$. Definimos la siguiente función:

$$\begin{aligned} f : \Gamma &\longrightarrow B^* \\ L &\longmapsto z l_1 z l_2 \dots z l_m z \end{aligned}$$

Veamos que f es inyectiva. Sean $L_1, L_2 \in \Gamma$ tales que $f(L_1) = f(L_2)$. Entonces,

$$z l_1 z l_2 \dots z l_k z = z l'_1 z l'_2 \dots z l'_{k'} z$$

Por ser ambas palabras iguales, tenemos que $k = k'$ y $l_i = l'_i \forall i \in \{1, \dots, k\}$, de donde $L_1 = L_2$. Por tanto, f es inyectiva, por lo que Γ es inyectivo con un subconjunto de B^* , que es numerable. Por tanto, Γ es numerable.

1.1.1. Cálculo de gramáticas

Ejercicio 1.1.15 (Complejidad: Sencilla). Calcula, de forma razonada, gramáticas que generen cada uno de los siguientes lenguajes:

1. $\{u \in \{0, 1\}^* \mid |u| \leq 4\}$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{0, 1\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow XXXX \\ X \rightarrow 0 \mid 1 \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

No obstante, esta gramática es de tipo 2. Busquemos una de tipo 3. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X, Y, Z\} \\ T' &= \{0, 1\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow 0X \mid 1X \mid \varepsilon \\ X \rightarrow 0Y \mid 1Y \mid \varepsilon \\ Y \rightarrow 0Z \mid 1Z \mid \varepsilon \\ Z \rightarrow 0 \mid 1 \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Tenemos que $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$, y es igual al lenguaje deseado. Tenemos por tanto que es un lenguaje regular.

2. Palabras con 0's y 1's que no contengan dos 1's consecutivos y que empiecen por un 1 y que terminen por dos 0's.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X, Y\} \\ T &= \{0, 1\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & 1X00 \\ X & \rightarrow & 0Y \mid \varepsilon \\ Y & \rightarrow & 0Y \mid 1X \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que esta gramática es de tipo 2 debido a la primera regla de producción. Busquemos una de tipo 3. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X, Y\} \\ T' &= \{0, 1\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & 1X \\ X & \rightarrow & 0Y \mid F \\ Y & \rightarrow & 0Y \mid 1X \mid F \\ F & \rightarrow & 00 \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Tenemos que $\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$, y es igual al lenguaje deseado. Tenemos por tanto que es un lenguaje regular. En esta última gramática, tenemos los siguientes estados:

- S : Es el estado inicial, empezamos con un 1.
- X : Acabamos de escribir un 1, por lo que ahora tan solo podemos escribir 0's.
- Y : Acabamos de escribir un 0, por lo que ahora podemos escribir tanto 0's como 1's.
- F : Ya hemos terminado, y escribimos los dos 0's finales por la restricción impuesta.

3. El conjunto vacío.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S\} \\ T &= \emptyset \\ S &= S \\ P &= \{ S \rightarrow S \} \end{aligned}$$

4. El lenguaje formado por los números naturales.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$V = \{\langle \text{número no iniciado} \rangle, \langle \text{dígito no cero} \rangle, \langle \text{dígito} \rangle, \langle \text{número iniciado} \rangle\}$$

$$T = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

$$S = \langle \text{número no iniciado} \rangle$$

$$P = \left\{ \begin{array}{ll} \langle \text{número no iniciado} \rangle & \rightarrow \langle \text{dígito no cero} \rangle \mid \langle \text{dígito no cero} \rangle \langle \text{número iniciado} \rangle \\ \langle \text{número iniciado} \rangle & \rightarrow \langle \text{dígito} \rangle \mid \langle \text{dígito} \rangle \langle \text{número iniciado} \rangle \\ \langle \text{dígito no cero} \rangle & \rightarrow 1 \mid 2 \mid 3 \mid 4 \mid 5 \mid 6 \mid 7 \mid 8 \mid 9 \\ \langle \text{dígito} \rangle & \rightarrow 0 \mid \langle \text{dígito no cero} \rangle \end{array} \right\}$$

Notemos que esta gramática es similar a la descrita en el Ejercicio 1.1.2.2, pero adaptada para que los números naturales no puedan empezar por 0. No obstante, esta gramática es de tipo 2. Busquemos una de tipo 3. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$V' = \{S, X, Y, Z\}$$

$$T' = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

$$S' = S$$

$$P' = \left\{ \begin{array}{ll} S & \rightarrow 0 \mid 1N \mid 2N \mid 3N \mid 4N \mid 5N \mid 6N \mid 7N \mid 8N \mid 9N \\ N & \rightarrow 0N \mid 1N \mid 2N \mid 3N \mid 4N \mid 5N \mid 6N \mid 7N \mid 8N \mid 9N \mid \varepsilon \end{array} \right\}$$

$$5. \{a^n \in \{a, b\}^* \mid n \geq 0\} \cup \{a^n b^n \in \{a, b\}^* \mid n \geq 0\}$$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$V = \{S, X, Y\}$$

$$T = \{a, b\}$$

$$S = S$$

$$P = \left\{ \begin{array}{ll} S & \rightarrow X \mid Y \mid \varepsilon \\ X & \rightarrow aX \mid \varepsilon \\ Y & \rightarrow aYb \mid \varepsilon \end{array} \right\}$$

$$6. \{a^n b^{2n} c^m \in \{a, b, c\}^* \mid n, m > 0\}$$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$V = \{S, X, Y, Z\}$$

$$T = \{a, b, c\}$$

$$S = S$$

$$P = \left\{ \begin{array}{ll} S & \rightarrow aXbbcY \\ X & \rightarrow aXbb \mid \varepsilon \\ Y & \rightarrow cY \mid \varepsilon \end{array} \right\}$$

$$7. \{a^n b^m a^n \in \{a, b\}^* \mid m, n \geq 0\}$$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aSa \mid bX \mid \varepsilon \\ X \rightarrow bX \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

8. Palabras con 0's y 1's que contengan la subcadena 00 y 11.

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{0, 1\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow X00X11X \mid X11X00X \\ X \rightarrow 0X \mid 1X \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que esta gramática es de tipo 2. Busquemos una de tipo 3. Sea la gramática $G' = (V', T', P', S')$ dada por:

$$\begin{aligned} V' &= \{S, X, A, B, F\} \\ T' &= \{0, 1\} \\ S' &= S \\ P' &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow 0S \mid 1S \mid X \\ X \rightarrow 00A \mid 11B \\ A \rightarrow 0A \mid 1A \mid 11F \\ B \rightarrow 0B \mid 1B \mid 00F \\ F \rightarrow 0F \mid 1F \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que:

- S : No hemos encontrado ninguna subcadena.
- X : Hemos encontrado una subcadena, y ahora buscamos la otra.
- A : Hemos encontrado la subcadena 00, y ahora buscamos la subcadena 11.
- B : Hemos encontrado la subcadena 11, y ahora buscamos la subcadena 00.
- F : Hemos encontrado ambas subcadenas.

9. Palíndromos formados con las letras a y b .

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X, Y\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{l} S \rightarrow aSa \mid bSb \mid \varepsilon \mid a \mid b \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que las reglas $S \rightarrow a \mid b$ se han añadido para añadir los palíndromos de longitud impar.

Ejercicio 1.1.16 (Complejidad: Media). Calcula, de forma razonada, gramáticas que generen cada uno de los siguientes lenguajes:

1. $\{uv \in \{0,1\}^* \mid u^{-1} \text{ es un prefijo de } v\}$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X, Y\} \\ T &= \{0, 1\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & XY \\ X & \rightarrow & 0X0 \mid 1X1 \mid \varepsilon \\ Y & \rightarrow & 0Y \mid 1Y \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Notemos que X deriva en el palíndromo, uu^{-1} , y Y en el resto de la palabra de v .

2. $\{ucv \in \{a,b,c\}^* \mid |u| = |v|\}$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{a, b, c\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & XSX \mid c \\ X & \rightarrow & a \mid b \mid c \end{array} \right\} \end{aligned}$$

3. $\{u1^n \in \{0,1\}^* \mid |u| = n\}$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{0, 1\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & XS1 \mid \varepsilon \\ X & \rightarrow & 0 \mid 1 \end{array} \right\} \end{aligned}$$

4. $\{a^n b^n a^{n+1} \in \{a,b\}^* \mid n \geq 0\}$ (observar transparencias de teoría)

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X, Y\} \\ T &= \{a, b\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{lcl} S & \rightarrow & a \mid abaa \mid aXbaa \\ Xb & \rightarrow & bX \\ Xa & \rightarrow & Ybaa \\ bY & \rightarrow & Yb \\ aY & \rightarrow & aa \mid aaX \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.1.17 (Complejidad: Difícil). Calcula, de forma razonada, gramáticas que generen cada uno de los siguientes lenguajes:

1. $\{a^n b^m c^k \in \{a, b, c\}^* \mid k = m + n\}$

Sea la gramática $G = (V, T, P, S)$ dada por:

$$\begin{aligned} V &= \{S, X\} \\ T &= \{a, b, c\} \\ S &= S \\ P &= \left\{ \begin{array}{ll} S & \rightarrow aSc \mid X \\ X & \rightarrow bXc \mid \varepsilon \end{array} \right\} \end{aligned}$$

2. Palabras que son múltiplos de 7 en binario.

Ejercicio 1.1.18 (Complejidad: Extrema (no son libres de contexto)). Calcula, de forma razonada, gramáticas que generen cada uno de los siguientes lenguajes:

1. $\{ww \mid w \in \{0, 1\}^*\}$
2. $\{a^{n^2} \in \{a\}^* \mid n \geq 0\}$
3. $\{a^p \in \{a\}^* \mid p \text{ es primo}\}$
4. $\{a^n b^m \in \{a, b\}^* \mid n \leq m^2\}$

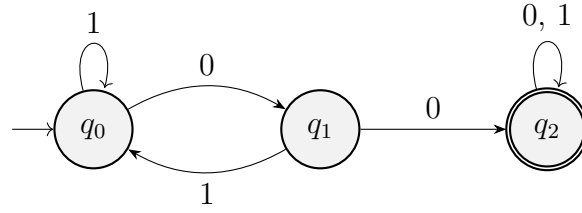


Figura 1.1: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.1

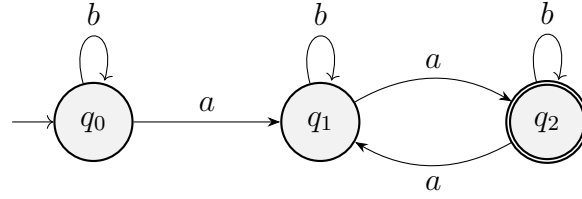


Figura 1.2: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.2

1.2. Autómatas Finitos

Ejercicio 1.2.1. Considera el siguiente Autómata Finito Determinista (AFD) dado por $M = (Q, A, \delta, q_0, F)$, donde:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $A = \{0, 1\}$
- La función de transición viene dada por:

$$\begin{array}{ll}
 \delta(q_0, 0) = q_1, & \delta(q_0, 1) = q_0 \\
 \delta(q_1, 0) = q_2, & \delta(q_1, 1) = q_0 \\
 \delta(q_2, 0) = q_2, & \delta(q_2, 1) = q_2
 \end{array}$$

- $F = \{q_2\}$

Describe informalmente el lenguaje aceptado.

Su representación gráfica está en la Figura 1.1.

Tenemos que el lenguaje aceptado por el autómata es el conjunto de todas las palabras que contienen la cadena 00 como subcadena. Es decir,

$$L = \{u_1 00 u_2 \in \{0, 1\}^* \mid u_1, u_2 \in \{0, 1\}^*\}.$$

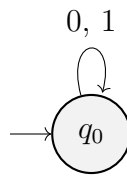
Ejercicio 1.2.2. Dado el AFD de la Figura 1.2, describir el lenguaje aceptado por dicho autómata.

El lenguaje aceptado por el autómata es el conjunto de todas las palabras que contienen un número par de a 's. Es decir,

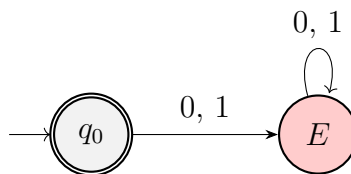
$$L = \{u \in \{a, b\}^* \mid n_a(u) \text{ es par, } n_a(u) > 0\},$$

Ejercicio 1.2.3. Dibujar AFDs que acepten los siguientes lenguajes con alfabeto $\{0, 1\}$:

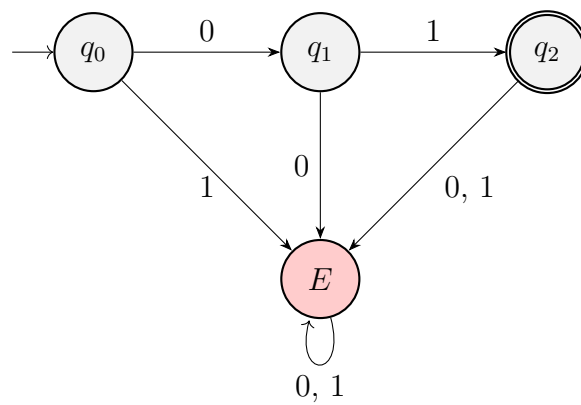
1. El lenguaje vacío,



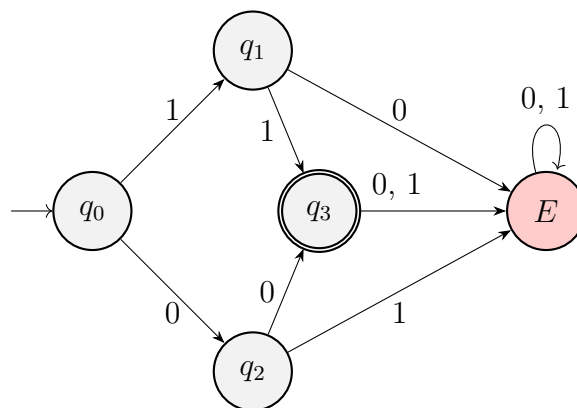
2. El lenguaje formado por la palabra vacía, es decir, $\{\varepsilon\}$,



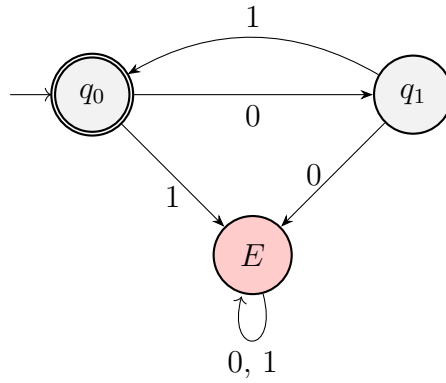
3. El lenguaje formado por la palabra 01, es decir, $\{01\}$,



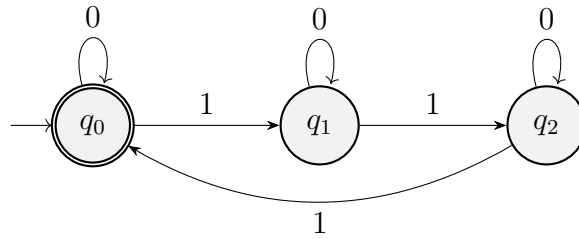
4. El lenguaje $\{11, 00\}$,



5. El lenguaje $\{(01)^i \mid i \geq 0\}$,



6. El lenguaje formado por las cadenas con 0's y 1's donde el número de unos es divisible por 3.



Ejercicio 1.2.4. Obtener a partir de la gramática regular $G = (\{S, B\}, \{1, 0\}, P, S)$, con

$$P = \begin{cases} S \rightarrow 110B \\ B \rightarrow 0B \mid 1B \mid \varepsilon \end{cases}$$

un AFND que reconozca el lenguaje generado por esa gramática.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.3.

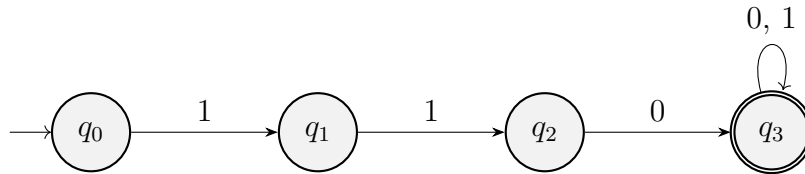


Figura 1.3: Autómata Finito No Determinista del Ejercicio 1.2.4

Ejercicio 1.2.5. Dada la gramática regular $G = (\{S\}, \{1, 0\}, P, S)$, con

$$P = \{S \rightarrow S10, S \rightarrow 0\},$$

obtener un AFD que reconozca el lenguaje generado por esa gramática.

El lenguaje es:

$$L = \{0(10)^n \mid n \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}.$$

El autómata obtenido es el de la Figura 1.4.

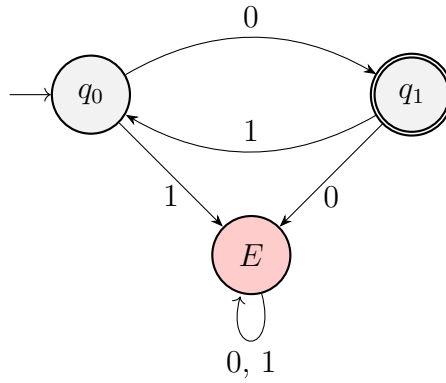


Figura 1.4: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.5

Ejercicio 1.2.6. Construir un AFND o AFD (dependiendo del caso) que acepte las cadenas $u \in \{0,1\}^*$ que:

1. AFND. Contengan la subcadena 010.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.5.

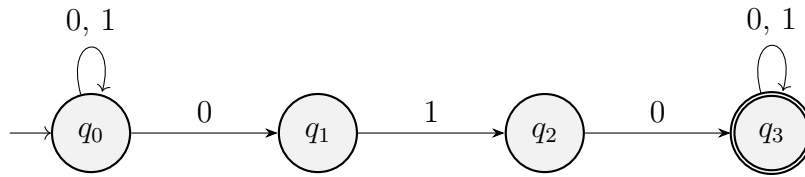


Figura 1.5: Autómata Finito No Determinista del Ejercicio 1.2.6 apartado 1.

2. AFND. Contengan la subcadena 110.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.6.

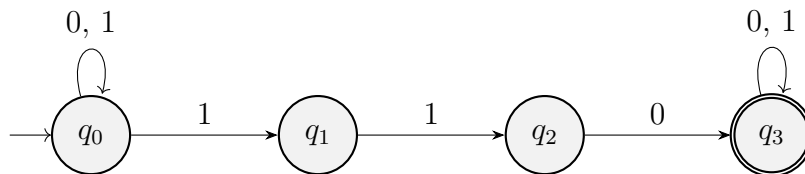


Figura 1.6: Autómata Finito No Determinista del Ejercicio 1.2.6 apartado 2.

3. AFD. Contengan simultáneamente las subcadenas 010 y 110.

El estado q_0 representa que no se ha empezado ninguna de las subcadenas, y el estado q_F representa que se han encontrado ambas cadenas. Hay dos opciones:

Opción 1 Primero se lee 010 y luego 110. Son los siguientes estados:

- q_0 : Estado inicial, no ha empezado la subcadena 010.
- q_1 : Se ha leído el 0 de la subcadena 010.
- q_2 : Se ha leído la subcadena 01 de la subcadena 010.
- q_3 : Se ha leído la subcadena 010. No ha empezado la subcadena 110.

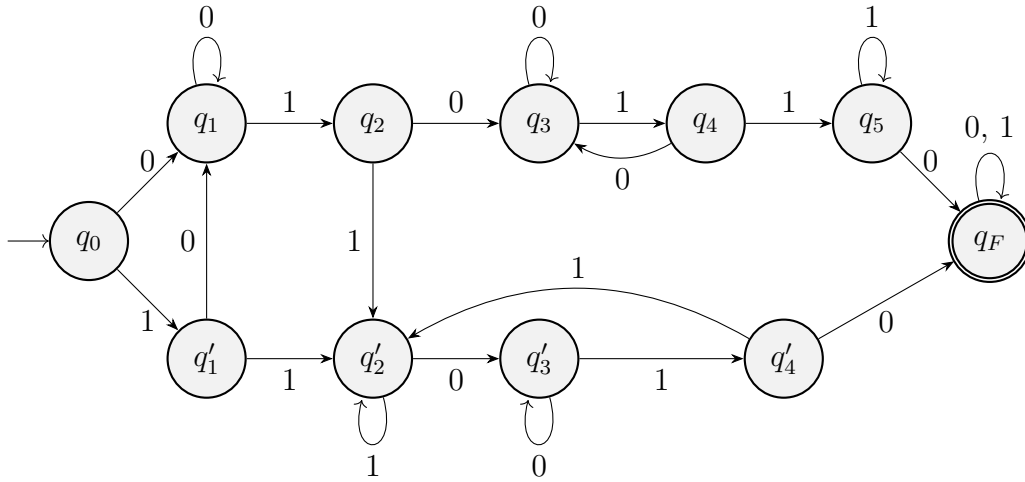


Figura 1.7: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.6 apartado 3.

- q_4 : Se ha leído el 1 de la subcadena 110.
- q_5 : Se ha leído la subcadena 11 de la subcadena 110.
- q_F : Se ha leído la subcadena 110. Se han leído ambas subcadenas.

Opción 2 Primero se lee 110 y luego 010. Son los siguientes estados:

- q_0 : Estado inicial, no ha empezado la subcadena 110.
- q'_1 : Se ha leído el 1 de la subcadena 110.
- q'_2 : Se ha leído la subcadena 11 de la subcadena 110.
- q'_3 : Se ha leído la subcadena 110. Se ha leído el 0 de la subcadena 010. Notemos que en este caso podemos agruparlo, puesto que el último carácter de la subcadena 110 es el mismo que el primero de la subcadena 010.
- q'_4 : Se ha leído la subcadena 01 de la subcadena 010.
- q_F : Se ha leído la subcadena 010. Se han leído ambas subcadenas.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.7.

Ejercicio 1.2.7. Construir un AFD que acepte el lenguaje generado por la siguiente gramática:

$$S \rightarrow AB, \quad A \rightarrow aA, \quad A \rightarrow c, \quad B \rightarrow bBb, \quad B \rightarrow b.$$

El lenguaje generado por la gramática es:

$$L = \{a^n cb^{2m+1} \mid n, m \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}.$$

El autómata obtenido es el de la Figura 1.8.

Ejercicio 1.2.8. Construir un AFD que acepte el lenguaje $L \subseteq \{a, b, c\}^*$ de todas las palabras con un número impar de ocurrencias de la subcadena abc .

El autómata tiene los siguientes estados:

- q_0 : Llevo un número par de ocurrencias de abc , y no he empezado la siguiente.

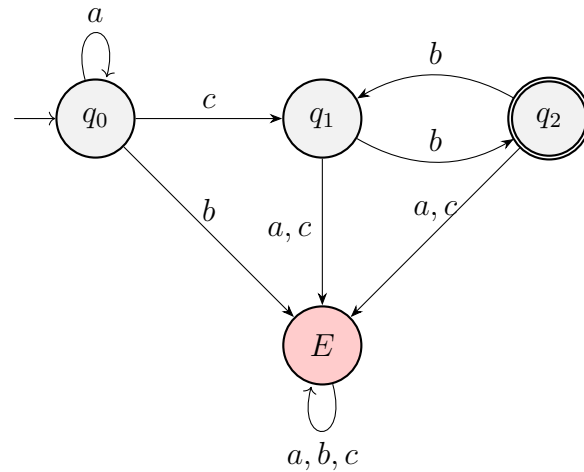


Figura 1.8: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.7

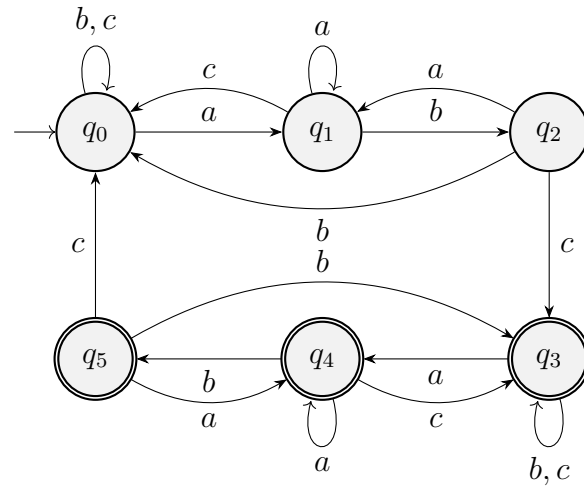


Figura 1.9: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.8

- q_1 : Acabo de empezar una ocurrencia impar de abc , llevo solo una a .
- q_2 : Estoy en una ocurrencia impar de abc , llevo ab .
- q_3 : Llevo un número impar de ocurrencias de abc , y no he empezado la siguiente.
- q_4 : Acabo de empezar una ocurrencia par de abc , llevo solo una a .
- q_5 : Estoy en una ocurrencia par de abc , llevo ab .

El autómata obtenido es el de la Figura 1.9.

Ejercicio 1.2.9. Sea L el lenguaje de todas las palabras sobre el alfabeto $\{0, 1\}$ que no contienen dos 1s que estén separados por un número impar de símbolos. Describir un AFD que acepte este lenguaje.

Ejercicio 1.2.10. Dada la expresión regular $(a + \varepsilon)b^*$, encontrar un AFND asociado y, a partir de este, calcular un AFD que acepte el lenguaje.

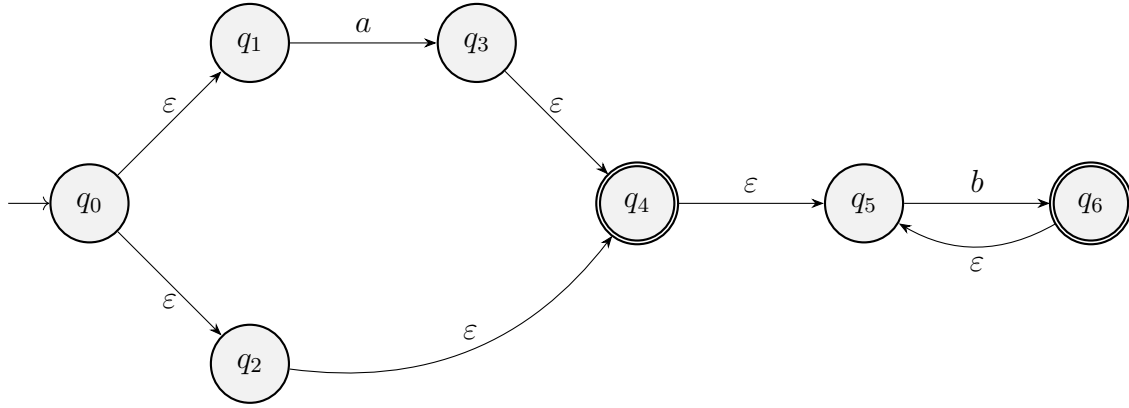


Figura 1.10: Autómata Finito No Determinista algorítmico del Ejercicio 1.2.10.

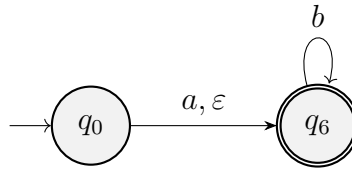


Figura 1.11: Autómata Finito No Determinista simplificado del Ejercicio 1.2.10.

El AFND con transiciones nulas obtenido (siguiendo el algoritmo) es el de la Figura 1.10.

Podemos simplificar este autómata para que así la transición al AFD sea más sencilla. El autómata simplificado es el de la Figura 1.11.

A partir de este autómata simplificado, obtenemos el AFD de la Figura 1.12.

Ejercicio 1.2.11. Obtener una expresión regular para el lenguaje complementario al aceptado por la gramática

$$S \rightarrow abA \mid B \mid baB \mid \varepsilon, \quad A \rightarrow bS \mid b, \quad B \rightarrow aS.$$

Observación. Construir un AFD asociado.

Esta gramática es lineal por la derecha. Algorítmicamente, obtenemos el autómata de la Figura 1.13 para el lenguaje generado por S , $\mathcal{L}(S)$.

Ejercicio 1.2.12. Dar expresiones regulares para los lenguajes sobre el alfabeto $\{a, b\}$ dados por las siguientes condiciones:

1. Palabras que no contienen la subcadena a ,

$$b^*$$

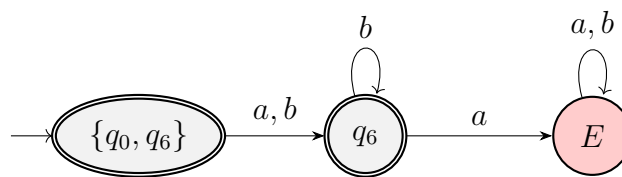


Figura 1.12: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.10.

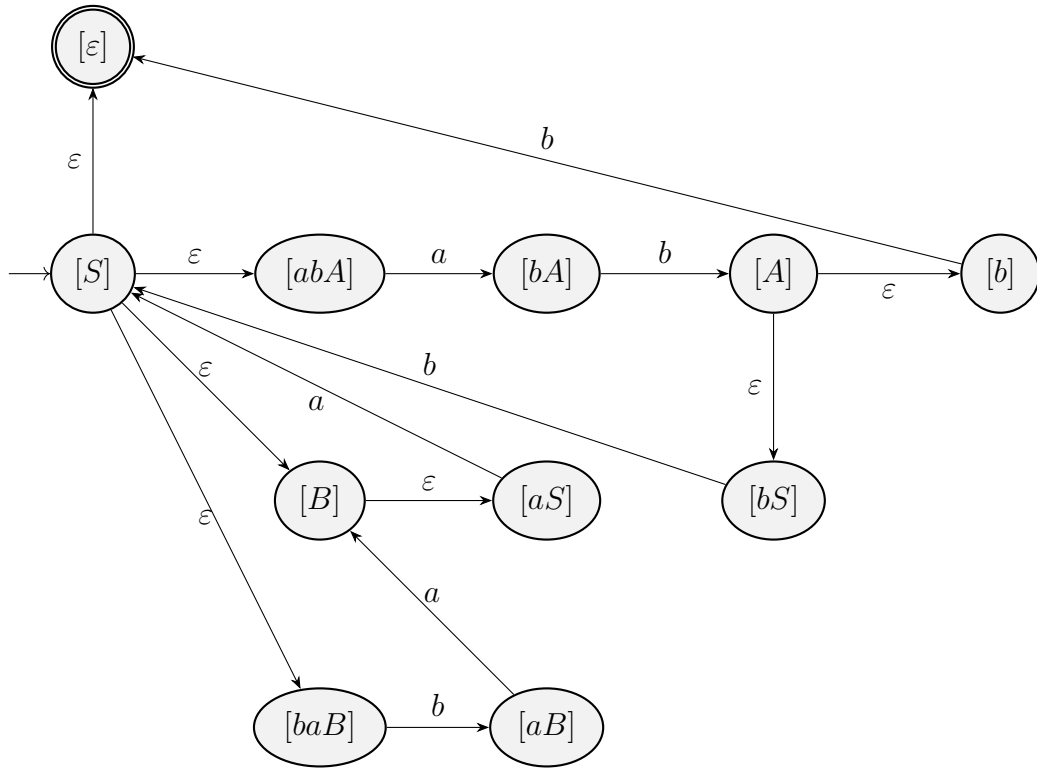


Figura 1.13: Autómata Finito Determinista del lenguaje $\mathcal{L}(S)$ del Ejercicio 1.2.11.

2. Palabras que no contienen la subcadena ab .

$$b^* a^*$$

3. Palabras que no contienen la subcadena aba .

Ejercicio 1.2.13. Determinar si el lenguaje generado por la siguiente gramática es regular:

$$S \rightarrow AabB, \quad A \rightarrow aA \mid bA \mid \varepsilon, \quad B \rightarrow Bab \mid Bb \mid ab \mid b.$$

En caso de que lo sea, encontrar una expresión regular asociada.

Es directo ver que el lenguaje generado por la gramática tiene como expresión regular asociada:

$$(a + b)^* ab(ab + b)^+.$$

Por tanto, el lenguaje es regular.

Ejercicio 1.2.14. Sobre el alfabeto $A = \{0, 1\}$ realizar las siguientes tareas:

1. Describir un autómata finito determinista que acepte todas las palabras que contengan a 011 o a 010 (o las dos) como subcadenas.

Tenemos los siguientes estados:

- $\underline{q_0}$: No se ha empezado ninguna subcadena.

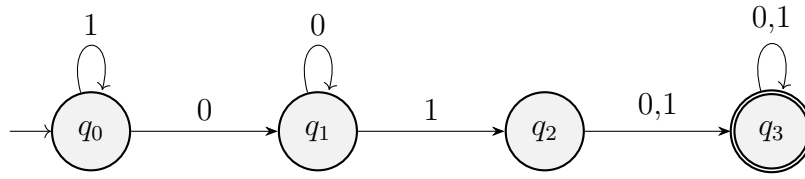


Figura 1.14: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.14 apartado 1.

- $\underline{q_1}$: Se ha empezado una subcadena deseada. Tengo el carácter 0.
- $\underline{q_2}$: Se continúa la subcadena deseada. Tengo los caracteres 01.
- $\underline{q_3}$: Se ha encontrado la subcadena deseada. Tengo los caracteres 011 o 010.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.14.

2. Describir un autómata finito determinista que acepte todas las palabras que empiecen o terminen (o ambas cosas) por 01.

Tenemos los siguientes estados:

- $\underline{q_0}$: No hemos leído nada.
- $\underline{q_1}$: Hemos empezado con un 0, por lo que puede comenzar por 01 (o terminar por 01).
- $\underline{q_2}$: Hemos empezado con 01, por lo que ya no hay más restricciones.
- $\underline{q_3}$: No hemos empezado por 01, por lo que ha de terminar por 01.
- $\underline{q_4}$: Ha de terminar por 01, y estamos en 0, por lo que si introduce un 1 puede terminar.
- $\underline{q_5}$: Ha de terminar por 01, y acabamos de leer 01, por lo que podemos terminar.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.15.

3. Dar una expresión regular para el conjunto de las palabras en las que hay dos ceros separados por un número de símbolos que es múltiplo de 4 (los símbolos que separan los ceros pueden ser ceros y puede haber otros símbolos delante o detrás de estos dos ceros).

$$(0 + 1)^* \textcolor{red}{0} ((0 + 1)(0 + 1)(0 + 1)(0 + 1))^* \textcolor{red}{0} (0 + 1)^*$$

Notemos que los dos 0's en cuestión están marcados en rojo para facilitar la comprensión.

4. Dar una expresión regular para las palabras en las que el número de ceros es divisible por 4.

En un primer momento, podríamos pensar en:

$$(1^*01^*01^*01^*01^*)^*$$

No obstante, una palabra con 1's y sin 0's, que es aceptada por el lenguaje, no está contemplada en la expresión regular. La expresión regular correcta es:

$$(1^*01^*01^*01^*0)^*1^*$$

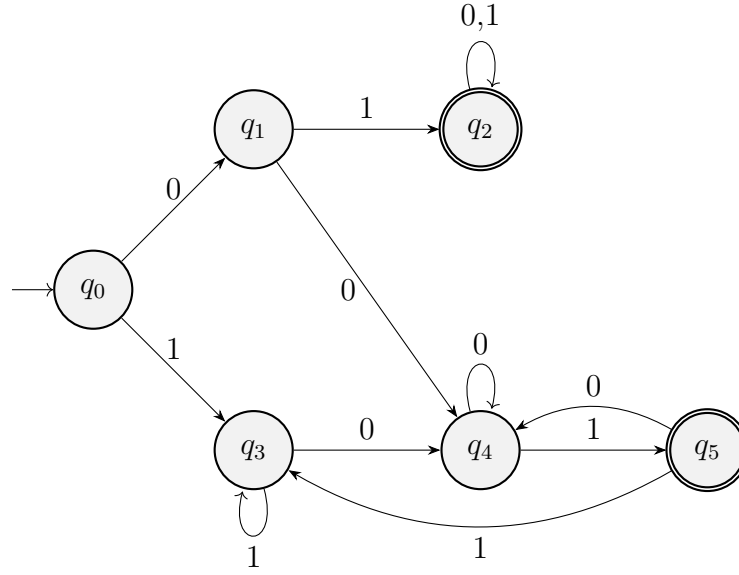


Figura 1.15: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.14 apartado 2.

Ejercicio 1.2.15. Construye una gramática regular que genere el siguiente lenguaje:

$$L_1 = \{u \in \{0, 1\}^* \mid \text{el número de 1's y de 0's es impar}\}.$$

Tenemos los siguientes estados:

- $\underline{E_{01}}$: Tenemos un error en 0 y 1, ya que el número de 0's y de 1's es par.
- $\underline{E_0}$: Tenemos un error en 0, ya que el número de 0's es par. El número de 1's es impar.
- $\underline{E_1}$: Tenemos un error en 1, ya que el número de 1's es par. El número de 0's es impar.
- \underline{X} : No tenemos errores. El número de 0's y de 1's es impar.

La gramática obtenida es $G = (\{E_{01}, E_0, E_1, X\}, \{0, 1\}, P, E_{01})$, donde P es:

$$\begin{aligned} E_{01} &\rightarrow 0E_1 \mid 1E_0, \\ E_0 &\rightarrow 0X \mid 1E_{01}, \\ E_1 &\rightarrow 0E_{01} \mid 1X, \\ X &\rightarrow 0E_0 \mid 1E_1 \mid \varepsilon \end{aligned}$$

Ejercicio 1.2.16. Encuentra una expresión regular que represente el siguiente lenguaje:

$$L_2 = \{0^n 1^m \mid n \geq 1, m \geq 0, n \text{ múltiplo de } 3 \text{ y } m \text{ es par}\}.$$

La expresión regular es:

$$(000)^*(11)^*$$

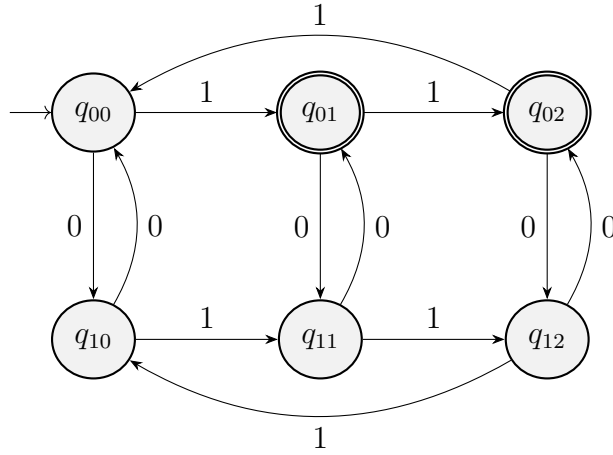


Figura 1.16: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.17

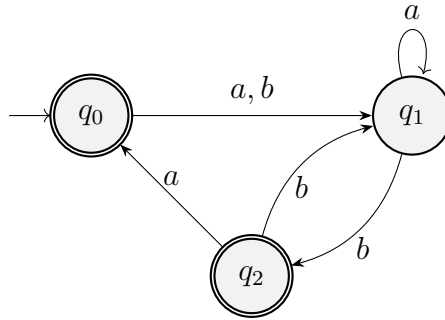


Figura 1.17: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.18

Ejercicio 1.2.17. Diseña un autómata finito determinista que reconozca el siguiente lenguaje:

$$L_3 = \{u \in \{0, 1\}^* \mid \text{el número de 1's no es múltiplo de 3 y el número de 0's es par}\}.$$

Sean n_0 el número de 0's y n_1 el número de 1's.

Tenemos la siguiente disposición de estados:

- Los estados de arriba representan $n_0 \bmod 2 = 0$.
- Los estados de abajo representan $n_0 \bmod 2 = 1$.
- Los estados de la primera columna representan $n_1 \bmod 3 = 0$.
- Los estados de la segunda columna representan $n_1 \bmod 3 = 1$.
- Los estados de la tercera columna representan $n_1 \bmod 3 = 2$.

El estado q_{ij} representa $n_0 \bmod 2 = i$ y $n_1 \bmod 3 = j$.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.16.

Ejercicio 1.2.18. Dar una expresión regular para el lenguaje aceptado por el autómata de la Figura 1.17.

Establecemos una ecuación por cada uno de los estados. El sistema inicial es:

$$\begin{cases} q_0 = \varepsilon + aq_1 + bq_1, \\ q_1 = aq_1 + bq_2, \\ q_2 = \varepsilon + aq_0 + bq_1. \end{cases}$$

Buscamos obtener la expresión regular asociada a q_1 :

$$\begin{aligned} q_1 &= aq_1 + b + baq_0 + bbq_1 = \\ &= baq_0 + b + (a + bb)q_1 \stackrel{(*)}{=} \\ &\stackrel{(*)}{=} (a + bb)^*(baq_0 + b) \end{aligned}$$

donde en $(*)$ hemos aplicado el Lema de Arden. Sustituyendo en la ecuación de q_0 obtenemos:

$$\begin{aligned} q_0 &= \varepsilon + (a + b)q_1 = \\ &= \varepsilon + (a + b)(a + bb)^*(baq_0 + b) = \\ &= \varepsilon + (a + b)(a + bb)^*b + (a + b)(a + bb)^*baq_0 \stackrel{(*)}{=} \\ &\stackrel{(*)}{=} ((a + b)(a + bb)^*ba)^*(\varepsilon + (a + b)(a + bb)^*b) \end{aligned}$$

donde, de nuevo, en $(*)$ hemos aplicado el Lema de Arden. Por tanto, la expresión regular asociada al autómata es:

$$((a + b)(a + bb)^*ba)^*(\varepsilon + (a + b)(a + bb)^*b).$$

Ejercicio 1.2.19. Dado el lenguaje

$$L = \{u110 \mid u \in \{1, 0\}^*\},$$

encontrar la expresión regular, la gramática lineal por la derecha, la gramática lineal por la izquierda y el AFD asociado. La expresión regular es:

$$(0 + 1)^*110.$$

La gramática lineal por la derecha es $G = (\{S, A\}, \{0, 1\}, P, S)$, donde P es:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow 0S \mid 1S \mid A \\ A &\rightarrow 110. \end{aligned}$$

La gramática lineal por la izquierda es $G = (\{S, A\}, \{0, 1\}, P', S)$, donde P' es:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow X110 \\ X &\rightarrow X0 \mid X1 \mid \varepsilon. \end{aligned}$$

El AFD asociado es el de la Figura 1.18. Sus estados son:

- q_0 : No estoy en la cadena 110 final.

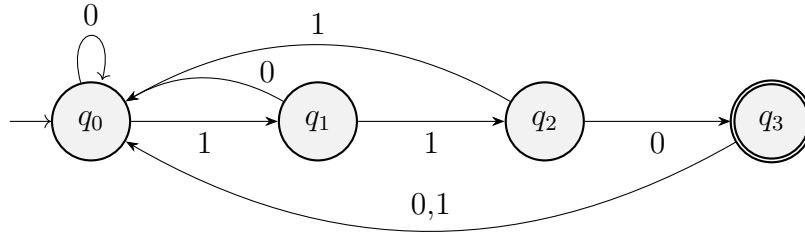


Figura 1.18: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.19

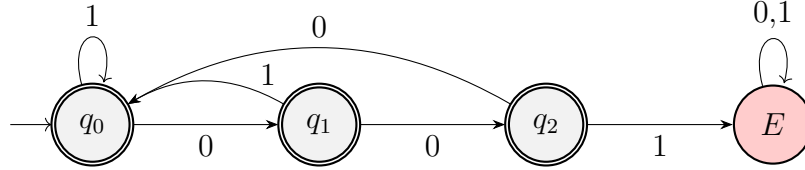


Figura 1.19: Autómata Finito Determinista del Ejercicio 1.2.21

- q₁: He leído un 1 de la cadena final.
- q₂: He leído un 11 de la cadena final.
- q₃: He leído un 110 de la cadena final.

Ejercicio 1.2.20. Dado un AFD, determinar el proceso que habría que seguir para construir una Gramática lineal por la izquierda capaz de generar el Lenguaje aceptado por dicho autómata.

Ejercicio 1.2.21. Construir un autómata finito determinista que acepte el lenguaje de todas las palabras sobre el alfabeto $\{0, 1\}$ que no contengan la subcadena 001. Construir una gramática regular por la izquierda a partir de dicho autómata.

Los estados son los siguientes:

- q₀: No se ha empezado la subcadena 001
- q₁: Se ha leído un 0 de la subcadena 001.
- q₂: Se ha leído un 00 de la subcadena 001.
- E: Se ha leído la subcadena 001, por lo que es el estado de error.

El autómata obtenido es el de la Figura 1.19.

Ejercicio 1.2.22. Sea $B_n = \{a^k \mid k \text{ es múltiplo de } n\}$. Demostrar que B_n es regular para todo n .

Fijado $n \in \mathbb{N}$, la expresión regular correspondiente es:

$$(a \overbrace{\dots}^{n \text{ veces}} a)^*.$$

Equivalentemente, usando la notación de las expresiones regulares de UNIX, la expresión regular sería:

$$(a\{n\})^*$$

Ejercicio 1.2.23. Sea A un alfabeto. Decimos que $u \in A^*$ es un prefijo de $v \in A^*$ si existe $w \in A^*$ tal que $uw = v$. Decimos que u es un prefijo propio de v si además $u \neq v$ y $u \neq \varepsilon$. Demostrar que si L es regular, también lo son los lenguajes siguientes:

1. $NOPREFIJO(L) = \{u \in L \mid \text{ningún prefijo propio de } u \text{ pertenece a } L\}$,
2. $NOEXTENSION(L) = \{u \in L \mid u \text{ no es un prefijo propio de ninguna palabra de } L\}$.

Ejercicio 1.2.24. Si $L \subseteq A^*$, define la relación \equiv en A^* como sigue: si $u, v \in A^*$, entonces $u \equiv v$ si y solo si para toda $z \in A^*$, tenemos que $(uz \in L \Leftrightarrow vz \in L)$.

1. Demostrar que \equiv es una relación de equivalencia.
2. Calcular las clases de equivalencia de $L = \{a^i b^i \mid i \geq 0\}$.
3. Calcular las clases de equivalencia de $L = \{a^i b^j \mid i, j \geq 0\}$.
4. Demostrar que L es aceptado por un autómata finito determinístico si y solo si el número de clases de equivalencia es finito.
5. ¿Qué relación existe entre el número de clases de equivalencia y el autómata finito minimal que acepta L ?

Ejercicio 1.2.25. Dada una palabra $u = a_1 \cdots a_n \in A^*$, se llama $Per(u)$ al conjunto

$$\{a_{\sigma(1)}, \dots, a_{\sigma(n)} \mid \sigma \text{ es una permutación de } \{1, \dots, n\}\}.$$

Dado un lenguaje L , se llama $Per(L) = \bigcup_{u \in L} Per(u)$. Dar expresiones regulares y autómatas minimales para $Per(L)$ en los siguientes casos:

1. $L = (00 + 1)^*$,
2. $L = (0 + 1)^* 0$,
3. $L = (01)^*$.

¿Es posible que, siendo L regular, $Per(L)$ no lo sea?