

Linguaggi e Computabilità

UniShare

Davide Cozzi
@dlcgold

Gabriele De Rosa
@derogab

Federica Di Lauro
@f_dila

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Definizioni	2
1.1.1	Alberi Sintatici	14
1.1.2	Grammatiche ambigue	18
1.1.3	Grammatiche Regolari	20
1.1.4	Espressioni Regolari (Regex)	23
1.2	Automati	29
1.2.1	Automati deterministici	30
1.2.2	Automati non deterministici	36
1.2.3	Da espressioni regolari a automi E-NFA	50

Capitolo 1

Introduzione

Questi appunti sono presi a lezione. Per quanto sia stata fatta una revisione è altamente probabile (praticamente certo) che possano contenere errori, sia di stampa che di vero e proprio contenuto. Per eventuali proposte di correzione effettuare una pull request. Link: <https://github.com/dlclgold/Appunti>.

Grazie mille e buono studio!

1.1 Definizioni

- un **linguaggio** è un insieme di stringhe che può essere generato mediante un dato meccanismo con delle date caratteristiche; un linguaggio può essere riconosciuto, ovvero dando in input una stringa un meccanismo può dirmi se appartiene o meno ad un linguaggio. I meccanismi che generano linguaggi si chiamano *grammatiche*, quelli che li riconoscono *automi*. I linguaggi formali fanno parte dell'informatica teorica (*TCS*)
- si definisce **alfabeto** come un insieme finito e non vuoto di simbolo (come per esempio il nostro alfabeto o le cifre da 0 a 9). Solitamente si indica con Σ o Γ
- si definisce **stringa** come una sequenza finita di simboli (come per esempio una parola o una sequenza numerica). La stringa vuota è una sequenza di 0 simboli, e si indica con ε o λ
- si definisce **lunghezza di una stringa** il numero di simboli che la compone (ovviamente contando ogni molteplicità). Se si ha $w \in \Sigma^*$ è una stringa w con elementi da Σ^* (insieme di tutte le stringhe di tutte le lunghezze possibili fatte da Σ), allora $|w|$ è la lunghezza di w , inoltre $|\varepsilon| = 0$.

- si definisce **potenza di un alfabeto** Σ^k come l'insieme di tutte le sequenze (espressi come stringhe e non simboli) di lunghezza $k \in \mathbb{N}$, $k > 0$ ottenibili da quell'alfabeto (se Σ^2 si avranno tutte le sequenze di 2 elementi etc...). Se ho $k = 1$ si ha $\Sigma^1 \neq \Sigma$ in quanto ora ho stringhe e non simboli. Se ho $k = 0$ ho $\Sigma^0 = \varepsilon$. Dato k ho $|\Sigma|$ che è la cardinalità dell'insieme Σ (e non la sua lunghezza come nel caso delle stringhe); sia $w \in \Sigma^k = a_1, a_2, \dots, a_k$, $a_i \in \Sigma$ e $|\Sigma| = q$ ora:

$$|\Sigma^k| = q^k$$

- si definisce Σ^* come **chiusura di Kleene** che è l'unione infinita di Σ^k ovvero

$$\Sigma^* = \Sigma^0 \cup \Sigma^1 \cup \dots \cup \Sigma^k$$

- si ha che Σ^+ è l'unione per $k \geq 1$ di Σ^k ovvero:

$$\Sigma^+ = \Sigma^1 \cup \Sigma^2 \cup \dots \cup \Sigma^k = \Sigma^* - \Sigma^0$$

per esempio, per l'insieme $\{0, 1\}$ si ha:

$$\Sigma^* = \{\varepsilon, 0, 1, 00, 01, 10, 100, 000, \dots\}$$

- quindi un **linguaggio** L è un insieme di stringhe e:

$$L \subseteq \Sigma^*$$

si hanno sottoinsiemi particolari, come l'insieme vuoto, che resta però un linguaggio, il **linguaggio vuoto** e $\emptyset \in \Sigma^k$, $|\emptyset| = 0$ che è diverso dal linguaggio che contiene la stringa vuota $|\varepsilon| = 1$ (che conta come una stringa). Inoltre $\Sigma^* \subseteq \Sigma^*$ che ha lunghezza infinita. Posso concatenare due stringhe con un punto: $a \cdot b \cdot c = abc$ e $a \cdot \varepsilon = a$. Ovviamente la stringa concatenata è lunga come la somma delle lunghezze delle stringhe che la compongono. Vediamo qualche esempio di linguaggio:

- il linguaggio di tutte le stringhe che consistono in n 0 seguiti da n 1:

$$\{\varepsilon, 01, 0011, 000111, \dots\}$$

- l'insieme delle stringhe con un uguale numero di 0 e di 1:

$$\{\varepsilon, 01, 10, 0011, 0101, 1001, \dots\}$$

- l'insieme dei numeri binari il cui valore è un numero primo:

$$\{\varepsilon, 10, 11, 101, 111, 1011, \dots\}$$

- Σ^* è un linguaggio per ogni alfabeto Σ
- \emptyset , il linguaggio vuoto, e $\{\varepsilon\}$ sono un linguaggio rispetto a qualunque alfabeto

Prendiamo un alfabeto $\Sigma = \{0, 1\}$ con la sua chiusura di Kleen $\Sigma = \{0, 1\}^*$. Quando si ha un input si può avere un problema di decisione, P , che dia come output "si" o "no". Posso avere un problema di decisione (o *membership*) su $w \in \Sigma = \{0, 1\}^*$, con w stringa, che dia in output "si" o "no". Un linguaggio L sarà:

$$L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid P(w) = \text{si}\}$$

quindi si ha che:

$$\Sigma^* \setminus L = \{P(w) = \text{no}\}$$

Vediamo ora un esempio di *Context Free Language (CFL)*, costruito a partire da una *Context Free Grammar (CFG)*:

Esempio 1. Sia $\Sigma = \{0, 1\}$ e $L_{pal} = \text{"stringhe palindrome binarie"}$. Quindi, per esempio, $0110 \in L$, $11011 \in L$ ma $10010 \notin L$. Si ha che ε , la stringa vuota, appartiene a L . Diamo una definizione ricorsiva:

- **base:** $\varepsilon, 0, 1 \in L_{pal}$
- **passo:** se w è palindroma allora $0w0$ è palindromo e $1w1$ è palindromo

una variabile generica S può sottostare alle regole di produzione di una certa grammatica. In questo caso si ha uno dei seguenti:

$$S \rightarrow \varepsilon, S \rightarrow 0, S \rightarrow 1, S \rightarrow 0S0, S \rightarrow 1S1$$

Si ha che una grammatica G è una quadrupla $G = (V, T, P, S)$ con:

- V simboli variabili
- T simboli terminali, ovvero i simboli con cui si scrivono le stringhe alla fine
- P regole di produzione
- S variabile di partenza *start*

riprendiamo l'esempio sopra:

Esempio 2.

$$G_{pal} = (V = \{S\}, T = \{0, 1\}, P, S)$$

con:

$$P = \{S \rightarrow \varepsilon, S \rightarrow 0, S \rightarrow 1, S \rightarrow 0S0, S \rightarrow 1S1\}$$

Si può ora costruire un algoritmo per creare una stringa palindroma a partire dalla grammatica G :

$$\underbrace{S}_{\text{start applico una regola}} \xrightarrow{\quad} 1S1 \rightarrow 01S10 \rightarrow \underbrace{01010}_{\text{sostituisco variabile}}$$

con S , $1S1$ e $01S10$ che sono forme sentenziali. Posso così ottenere tutte le possibili stringhe. Esiste anche una forma abbreviata:

$$S \rightarrow \varepsilon | 0 | 1 | 0S0 | 1S1$$

Non si fanno sostituzioni in parallelo, prima una S e poi un'altra

Si hanno 4 grammatiche formali, *gerarchia di Chomsky*:

- **tipo 0:** non si hanno restrizioni sulle regole di produzione, $\alpha \rightarrow \beta$. Sono linguaggi ricorsivamente numerabili e sono rappresentati dalle *macchine di Turing*, deterministiche o non deterministiche (la macchina di Turing è un automa)
- **tipo 1:** il lato destro della produzione ha lunghezza almeno uguale a quello sinistro. Sono grammatiche dipendenti dal contesto (*contestuali*) e come automa hanno *la macchina di Turing che lavora in spazio lineare*:

$$\alpha_1 A \alpha_2 \rightarrow \alpha_1 B \alpha_2$$

con α_1 e α_2 detti *contesto* e $\alpha_1, \alpha_2, \beta \in (V \cup T)^*$

- **tipo 2:** sono quelle libere dal contesto, context free. Come regola ha $A \rightarrow \beta$ con $A \in V$ e $\beta \in V \cup T)^*$ e come automa ha gli *automi a pila non deterministici*
- **tipo 3:** sono le grammatiche *regolari*. Come regole ha $A \rightarrow \alpha B$ (o $A \rightarrow B\alpha$) e $A \rightarrow \alpha$ con $A, B \in V$ e $\alpha \in T$. Come automi ha gli *automi a stato finito deterministici o non deterministici*

Esempio 3. Sia $G = (V, T, O, E)$, con $V = \{E, I\}$ e $T = \{a, b, 0, 1, (,), +, *\}$ quindi ho le seguenti regole, è di tipo 3:

1. $E \rightarrow I$
2. $E \rightarrow E + E$
3. $E \rightarrow E * E$
4. $E \rightarrow (E)$
5. $I \rightarrow a$
6. $I \rightarrow b$
7. $I \rightarrow Ia$
8. $I \rightarrow Ib$
9. $I \rightarrow I0$
10. $I \rightarrow I1$

voglio ottenere $a*(a+b00)$ sostituisco sempre a destra (*right most derivation*)

$$E \rightarrow E * E \rightarrow E * (E) \rightarrow E * (E + E) \rightarrow E * (E + I) \rightarrow E + (E + I0) \\ \rightarrow R + (I + b00) \rightarrow E * (a + b00) \rightarrow I * (a + b00) \rightarrow a * (a + b00)$$

usiamo ora l'inferenza ricorsiva:

passo	stringa ricorsiva	var	prod	passo stringa impiegata
1	a	I	5	\
2	b	I	6	\
3	b0	I	9	2
4	b00	I	9	3
5	a	E	1	1
6	b00	E	1	4
7	a+b00	E	2	5,6
8	(a+b00)	E	4	7
9	a*(a+b00)	E	3	5, 8

definisco formalmente la derivazione \rightarrow :

Definizione 1. Prendo una grammatica $G = (V, T, P, S)$, grammatica CFG. Se $\alpha A \beta$ è una stringa tale che $\alpha, \beta \in (V \cup T)^*$, appartiene sia a variabili che terminali. Sia $A \in V$ e sia $a \rightarrow \gamma$ una produzione di G . Allora scriviamo:

$$\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$$

con $\gamma \in (V \cup T)^*$.

Le sostituzioni si fanno indipendentemente da α e β . Questa è quindi la definizione di derivazione.

Definizione 2. Definisco il simbolo \rightarrow_* , ovvero il simbolo di derivazioni in 0 o più passi. Può essere definito in modo ricorsivo. Per induzione sul numero di passi.

- la base dice che $\forall \alpha \in (V \cup T)^*, \alpha \rightarrow_* \alpha$
- il passo è: se $\alpha \rightarrow_G * \beta$ e $\beta \rightarrow_G * \gamma$ allora $\alpha \rightarrow_* \gamma$

Si può anche dire che $\alpha \rightarrow_G * \beta$ sse esiste una sequenza di stringhe $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ con $n \geq 1$ tale che $\alpha = \gamma_1$, $\beta = \gamma_n$ e $\forall i, 1 < i < n - 1$ si ha che $\gamma_i \rightarrow \gamma_{i+1}$ la derivazione in 0 o più passi è la chiusura transitiva della derivazione

Definizione 3. avendo ora definito questi simboli possiamo definire una forma sentenziale. Infatti è una stringa α tale che:

$$\forall \alpha \in (V \cup T)^* \text{ tale che } S \rightarrow_G * \alpha$$

Definizione 4. data $G = (V, T, P, S)$ si ha che $L(G) = \{w \in T^* \mid S \rightarrow_G * w\}$ ovvero composto da stringhe terminali che sono derivabili o 0 o più passi.

Esempio 4. formare una grammatica CFG per il linguaggio:

$$L = \{0^n 1^n \mid n \geq 1\} = \{01, 0011, 000111, \dots\}$$

con x^n intendo una concatenazione di n volte x (che nel nostro caso sono 0 e 1).

posso scrivere:

$$0^n 1^n = 00^{n-1} 1^{n-1} 1$$

il nostro caso base sarà la stringa 01, Poi si ha: $G = (V, T, P, S)$, $T = \{0, 1\}$, $V = \{S\}$, il caso base $S \rightarrow 01$ e $S \rightarrow 0S1$ il caso passo è quindi: se $w = 0^{n-1} 1^{n-1} \in L$ allora $0w1 \in L$.

Ora voglio dimostrare che $000111 \in L$, ovvero $S \rightarrow_* 000111$:

$$S \rightarrow 0S1 \rightarrow 00S11 \rightarrow 000S111$$

Teorema 1. data la grammatica $G = \{V, T, P, S\}$ CFG e $\alpha \in (V \cup T)^*$. Si ha che vale $S \rightarrow * \alpha$ sse $S \rightarrow_{lm} * \alpha$ sse $S \rightarrow_{rm} * \alpha$. Con $\rightarrow_{lm} *$ simbolo di left most derivation e $\rightarrow_{rm} *$ simbolo di right most derivation

Esempio 5. formare una grammatica CFG per il linguaggio:

$$L = \{0^n 1^n | n \geq 0\} = \{\varepsilon, 01, 0011, 000111, \dots\}$$

stavolta abbiamo anche la stringa vuota. Il caso base stavolta è $S \rightarrow \varepsilon | 0S1$

Esempio 6. Fornisco una CFG per $L = \{a^n | n \geq 1\} = \{a, aa, aaa, \dots\}$. La base è a

il passo è che se $a^{n-1} \in L$ allora $a^{n-1}a \in L$ (o che $aa^{n-1} \in L$).

Si ha la grammatica $G = \{V, T, P, S\}$, $V = \{S\}$, $T = \{a\}$ e si hanno $S \rightarrow a | Sa$ (o $S \rightarrow a | aS$). Dimostro che $a^3 \in L$.

$$S \rightarrow Sa \rightarrow Saa \rightarrow aaa$$

oppure

$$S \rightarrow aS \rightarrow aaS \rightarrow aaa$$

Esempio 7. trovo una CFG per $L = \{(ab)^n | n \geq 1\} = \{ab, abab, ababab, \dots\}$

La base è ab

il passo è che se $(ab)^{n-1} \in L$ allora $(ab)^{n-1}ab \in L$.

Si ha la grammatica $G = \{V, T, P, S\}$, $V = \{S\}$, $T = \{a, b\}$ (anche se in realtà $T = \{ab\}$) e si hanno $S \rightarrow ab | Aab$. Poi dimostro come l'esempio sopra

Esempio 8. trovo una CFG per $L = \{a^n cb^n | n \geq 1\} = \{acb, aacbb, aaacbbb, \dots\}$

Il caso base è acb il passo è che se $a^{n-1}cb^{n-1} \in L$ allora $a^{n-1}cb^{n-1}acb \in L$

Si ha la grammatica $G = \{V, T, P, S\}$, $V = \{S\}$, $T = \{a, b, c\}$ e si hanno $S \rightarrow aSb | acb$.

dimostro che $aaaacbbbbb \in L$:

$$S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow aaaaSbbb \rightarrow aaaacbbbbb$$

provo a usare anche una grammatica regolare, con le regole $S \rightarrow aS | c$, $c \rightarrow cB$ e $B \rightarrow bB | b$;

$$S \rightarrow aS \rightarrow aaS \rightarrow aaC \rightarrow aacB \rightarrow aacb \dots$$

non si può dimostrare in quanto non si può imporre una regola adatta

Esempio 9. $L = \{a^n cb^{n-1} | n \geq 2\}$, con $a^n cb^{n-1} = a^{n-1}acb^{n-1}$. $S \rightarrow aSb | aacb$. Quindi:

$$S \rightarrow aSb \rightarrow aaacbb \in L$$

Esempio 10. cerco CFG per $L = \{a^n c^k b^n \mid n, k > 0\}$. a e b devono essere uguali, uso quindi una grammatica context free, mentre c genera un linguaggio regolare.

Si ha la grammatica $G = \{V, T, P, S\}$, $V = \{S, C\}$, $T = \{a, b, c\}$ e si hanno $S \rightarrow aSb \mid aCb$ e $C \rightarrow cC \mid c$. dimostro che $aaaccbbb \in L$, $n = 3$, $k = 2$:

$$S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow aaaCbbb \rightarrow aaacCbbb \rightarrow aaaccbbb$$

Esempio 11. scrivere CFG per $L = \{a^n b^n c^k b^k \mid n, k \geq 0\}$

$$= \{w \in \{a, b, c, d\}^* \mid a^n b^n c^k b^k \mid n, k \geq 0\}$$

quindi L concatena due linguaggi $L1$ e $L2$, $X = \{a^n b^n\}$ e $Y = \{c^k d^k\}$:

$$X \rightarrow aXb \mid \varepsilon$$

$$Y \rightarrow cYd \mid \varepsilon$$

$$S \rightarrow XY$$

voglio derivare $abcd$:

$$S \rightarrow XY \rightarrow XcYd \rightarrow aXbcYd \rightarrow aXbc\varepsilon d \rightarrow a\varepsilon bc\varepsilon d \rightarrow abcd$$

voglio derivare cd

$$S \rightarrow XY \rightarrow Y \rightarrow cYd \rightarrow cd$$

Quindi se ho $w \in L1, L2$, ovvero appartenente ad una concatenazione di linguaggi prima uso le regole di un linguaggio, poi dell'altro e infine ottengo il risultato finale.

Esempio 12. scrivere CFG per $L = \{a^n b^k c^k d^n \mid n > 0, k \geq 0\}$.

$$S \rightarrow aSd \mid aXd$$

$$X \rightarrow bXc \mid \varepsilon$$

derivo $aabcbdd$:

$$S \rightarrow aSd \rightarrow aaXdd \rightarrow aabXcdd \rightarrow aabcbdd$$

Esempio 13. scrivere CFG per $L = \{a^n c b^n c^m a d^m \mid n > 0, m \geq 1\}$.

$$S \rightarrow XY$$

$$X \rightarrow aXb \mid c$$

$$Y \rightarrow cUd \mid cad$$

$$S \rightarrow XY \rightarrow cY \rightarrow ccad$$

Esempio 14. scrivere CFG per $L = \{a^{n+m}xc^nyd^m \mid n, m \geq 0\}$. $a^{n+m} = a^n a^m$ o $a^m a^n$. Si hanno 2 casi:

$$1. L = \{a^n a^m x c^n y d^m \mid n, m \geq 0\}$$

$$2. L = \{a^m a^n x c^n y d^m \mid n, m \geq 0\}$$

ma solo $L = \{a^m a^n x c^n y d^m \mid n, m \geq 0\}$ può generare una CFG (dove non si possono fare incroci, solo concatenazioni e inclusioni/innesti).

$$S \rightarrow aSd \mid Y$$

$$Y \rightarrow Xy$$

$$X \rightarrow aXc \mid x$$

si può fare in 2:

$$S \rightarrow aSd \mid Xy$$

$$X \rightarrow aXc \mid x$$

derivo con $m = n = 1$, $aa x c y d$:

$$S \rightarrow aSd \rightarrow aXyd \rightarrow aaXcyd \rightarrow aa x c y d$$

Esempio 15. scrivere CFG per $L = \{a^n b^m \mid n \geq m \geq 0\}$.

$$L = \{\varepsilon, a, ab, aa, aab, aabb, aaa, aaab, aaabb, aaabbb, \dots\}$$

Se $n \geq m$ allora $\exists k \geq 0 \rightarrow n = m + k$. Quindi:

$$l = \{a^{m+k} b^m \mid m, k \geq 0\}$$

si può scrivere in 2 modi:

$$1. l = \{a^m a^k b^m \mid m, k \geq 0\} \text{ quindi con innesto}$$

$$2. l = \{a^k a^m b^m \mid m, k \geq 0\} \text{ quindi con concatenazione}$$

entrambi possibili per una CFG:

1.

$$S \rightarrow XY$$

$$X \rightarrow aX \mid \varepsilon \text{ si può anche scrivere } X \rightarrow Xa \mid \varepsilon$$

$$Y \rightarrow aYb \mid \varepsilon$$

oppure

$$S \rightarrow aS \mid X$$

$$X \rightarrow aXb \mid \varepsilon$$

2.

$$S \rightarrow aSb|\varepsilon$$

$$X \rightarrow aX|\varepsilon$$

Esempio 16. scrivere CFG per $L = \{a^n b^{m+n} c^h \mid m > h \geq 0, n \geq 0\}$.
Se $n > h$ allora $\exists k \rightarrow n = h + k$, quindi:

$$L = \{a^n b^{m+h+k} c^h \mid m > h \geq 0, n \geq 0\}$$

. ovvero:

$$L = \{a^n b^n b^k b^h c^h \mid m \geq 0, k > 0, h \geq 0\}$$

si ha:

$$S \rightarrow XYZ$$

$$X \rightarrow aXb|\varepsilon$$

$$Y \rightarrow Yb|b$$

$$Z \rightarrow bZc|\varepsilon$$

si può anche fare:

$$S \rightarrow XY$$

$$X \rightarrow aXb|\varepsilon$$

$$Y \rightarrow bYc|Z$$

$$Z \rightarrow bZ|b$$

Esempio 17. scrivere CFG per $L = \{a^n b^m c^k \mid k > n + m, n, m \geq 0\}$.
per $n = m = 0, k = 1$ avrò la stringa c . se $k > n + m$ allora $\exists l > 0 \rightarrow k = n + m + l$ quindi:

$$L = \{a^n b^m c^{n+m+l} \mid l > 0, n, m \geq 0\}$$

$$= L = \{a^n b^m c^n c^m c^l \mid l > 0, n, m \geq 0\}$$

sistemando:

$$= L = \{a^n b^m c^l c^m c^n c^l \mid l > 0, n, m \geq 0\}$$

quindi:

$$S \rightarrow aSc|X$$

$$X \rightarrow bXc|Y$$

$$Y \rightarrow cY|c$$

Esempio 18. scrivere CFG per $L = \{a^n x c^{n+m} y^h z^k d^{m+h} \mid n, m, k, h \geq 0\}$.
ovvero:

$$L = \{a^n x c^n c^m y^h z^k d^h d^m \mid n, m, k, h \geq 0\}$$

quindi avrò:

$$S \rightarrow XY$$

$$X \rightarrow aXc \mid x$$

$$Y \rightarrow cYd \mid W$$

$$W \rightarrow yWd \mid X$$

$$Z \rightarrow zZ \mid \varepsilon$$

Esempio 19. vediamo un esempio di grammatica dipendente dal contesto:

$$L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 1\}$$

$G = \{V, T, P, S\} = \{(S, B, C, X)\} = \{(a, b, c), P, S\}$ ecco le regole di produzione (qui posso scambiare variabili a differenza delle context free):

$$1. S \rightarrow aSBC$$

$$2. S \rightarrow aBC$$

$$3. CB \rightarrow XB$$

$$4. XB \rightarrow XC$$

$$5. XC \rightarrow BC$$

$$6. aB \rightarrow ab$$

$$7. bB \rightarrow bb$$

$$8. bC \rightarrow bc$$

$$9. cC \rightarrow cc$$

vediamo un esempio di derivazione: per $n = 1$ ho abc ovvero:

$$S \rightarrow aBC \rightarrow abC \rightarrow abc$$

con $n = 2$ ho $aabbcc$: $S \rightarrow aSBC \rightarrow aaBCBC \rightarrow aaBXBC \rightarrow aaBXCC \rightarrow aaBBCC \rightarrow aabBCC \rightarrow aabbCC \rightarrow aabbccC \rightarrow aabbcc$

Esempio 20. vediamo un esempio di grammatica dipendente dal contesto:

$$L = \{a^n b^m c^n d^m \mid n, m \geq 1\}$$

Si ha:

$$G = (\{S, X, C, D, Z\}, \{a, b, c, d\}, P, S)$$

con le seguenti regole di produzione:

- $S \rightarrow aSc \mid aXc$
- $X \rightarrow bXD \mid bD$
- $DC \rightarrow CD$
- $DC \rightarrow DZ$
- $DZ \rightarrow CZ$
- $XZ \rightarrow CD$
- $bC \rightarrow bc$
- $cC \rightarrow cc$
- $cD \rightarrow cd$
- $dD \rightarrow dd$

provo a derivare $aabbccddd$ quindi con $n = 2, m = 3$:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow aSC \rightarrow aaXCC \rightarrow aabXDCC \rightarrow aabbXDDCC \rightarrow \\ &aabbbDDDCC \rightarrow aabbbCCDDD \rightarrow aabbccddd \end{aligned}$$

Esempio 21. Sia $L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w \text{ contiene lo stesso numero di } a \text{ e } b\}$:

$$S \rightarrow aSbS \mid bSaS \mid \varepsilon$$

dimostro per induzione che è corretto:

- **caso base:** $|w| = 0 \rightarrow w = \varepsilon$

- **caso passo:** si supponga che G produca tutte le stringhe (di lunghezza $< n$) di $\{a, b\}^*$ con lo stesso numero di a e b e dimostro che produce anche quelle di lunghezza n , sia:

$w \in \{a, b\}^* \mid |w| = n$ con a e b in egual numero, $m(a) = m(b)$ con $m()$ che indica il numero

quindi si ha che:

$$w = aw_1bw_2 \text{ o } w = bw_1aw_2$$

sia.

$$k_1 = m(a) \in w_1 = m(b) \in w_1$$

$$k_2 = m(a) \in w_2 = m(b) \in w_2$$

allora:

$$k_1 + k_2 + 1 = m(a) \in w = m(b) \in W$$

sapendo che $|w_1| < n$ e $|w_2| < n$ allora w_1 e w_2 sono egnerati da G per ipotesi induttiva

1.1.1 Alberi Sintatici

Definizione 5. Data una grammatica CFG, $G = \{V, T, P, S\}$ un **albero sintattico** per G soddisfa le seguenti condizioni:

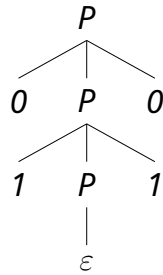
- ogni nodo interno è etichettato con una variabile
- ogni foglia è anch'essa etichettata con una variabile o col simbolo di terminale T o con la stringa vuota ε (in questo caso la foglia è l'unico figlio del padre)
- se un nodo interno è etichettato con A i suoi figli saranno etichettati con X_1, \dots, X_k e $A \rightarrow X_1, \dots, X_k$ sarà una produzione di G . Se un X_i è ε sarà l'unica figlio e $A \rightarrow \varepsilon$ sarà comunque una produzione di G

La concatenazione in ordine delle foglie viene detto **prodotto dell'albero**

Esempio 22. Usiamo l'esempio delle stringhe palindrome:

$$P \rightarrow 0P0 \mid 1P1 \mid \varepsilon$$

sia il seguente albero sintattico:

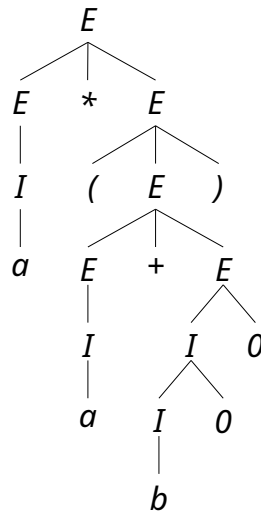


Esempio 23. Si ha:

$$E \rightarrow I \mid E + E \mid E * E \mid (E)$$

$$I \rightarrow a \mid b \mid Ia \mid Ib \mid I0 \mid I1$$

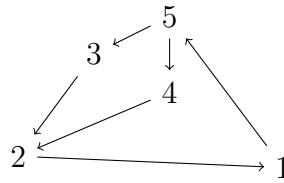
un albero sintattico per $a * (a + b00)$ può essere:



Data una CFG si ha che i seguenti cinque enunciati si equivalgono:

1. la procedura di inferenza ricorsiva stabilisce che una stringa w di simboli terminali appartiene al linguaggio $L(A)$ con A variabile
2. $A \rightarrow^* w$
3. $A \rightarrow_{lm}^* w$
4. $A \rightarrow_{rm}^* w$
5. esiste un albero sintattico con radice A e prodotto w

queste 5 proposizioni si implicano l'uni l'altra:



vediamo qualche dimostrazione di implicazione tra queste proposizioni:

da 1 a 5. si procede per induzione:

- **caso base:** ho un livello solo (una sola riga), $\exists A \rightarrow w$:

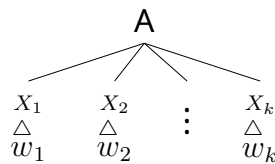
$$\begin{array}{c} A \\ \triangle \\ w \end{array}$$

- **caso passo:** suppongo vero per un numero di righe $\leq n$, lo dimostro per $n + 1$ righe:

$$A \rightarrow X_1, X_2, \dots, X_k$$

$$w = w_1, w_2, \dots, w_k$$

ovvero, in meno di $n + 1$ livelli:



□

da 5 a 3. procedo per induzione:

- **caso base (n=1):** $\exists A \rightarrow w$ quindi $A \rightarrow_{lm} w$, come prima si ha un solo livello:

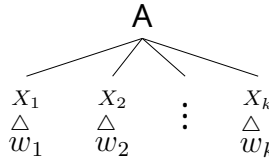
$$\begin{array}{c} A \\ \triangle \\ w \end{array}$$

- **caso passo:** suppongo che la proprietà valga per ogni albero di profondità minore uguale a n , dimostro che valga per gli alberi profondi $n + 1$:

$$A \rightarrow X_1, X_2, \dots, X_k$$

$$w = w_1, w_2, \dots, w_k$$

ovvero, in meno di $n + 1$ livelli:



$$A \rightarrow_{lm} X_1, X_2, \dots, X_k$$

$x_1 \rightarrow_{lm}^* w_1$ per ipotesi induttiva si ha un albero al più di n livelli quindi:

$$A \rightarrow_{lm} X_1, \dots, X_k \rightarrow_{lm}^* w_1, X_2, \dots, X_k \rightarrow_{lm}^* \dots \rightarrow_{lm}^* w_1, \dots, w_k = w$$

Esempio 24.

$$E \rightarrow I \rightarrow Ib \rightarrow ab$$

$$\alpha E \beta \rightarrow \alpha I \beta \rightarrow \alpha Ib \beta \rightarrow \alpha ab \beta, \quad \alpha, \beta \in (V \cup T)^*$$

□

Esempio 25. Mostro l'esistenza di una derivazione sinistra dell'albero sintattico di $a * (a + b00)$:

$$\begin{aligned} E &\rightarrow_{lm}^* E * E \rightarrow_{lm}^* I * E \rightarrow_{lm}^* a * E \rightarrow_{lm}^* a * (E) \rightarrow_{lm}^* a * (E + E) \rightarrow_{lm}^* \\ a * (I + E) &\rightarrow_{lm}^* a * (a + E) \rightarrow_{lm}^* a * (a + I) \rightarrow_{lm}^* a + (a + I0) \rightarrow_{lm}^* a * (a + I00) \rightarrow_{lm}^* a * (a + b00) \end{aligned}$$

1.1.2 Grammatiche ambigue

Definizione 6. Una grammatica è definita ambigua se esiste una stringa w di terminali che ha più di un albero sintattico

Esempio 26. vediamo un esempio:

1. $E \rightarrow E + E \rightarrow E + E * E$ ovvero:



2. $E \rightarrow E * E \rightarrow E + E * E$ ovvero:



si arriva a due stringhe uguali ma con alberi diversi. Introduciamo delle categorie sintattiche, dei vincoli alla produzione delle regole:

1. $E \rightarrow T \mid E + T$
2. $T \rightarrow F \mid T * F$
3. $F \rightarrow I \mid (E)$
4. $I \rightarrow a \mid b \mid Ia \mid Ib \mid I0 \mid I1$

Possono esserci più derivazioni di una stringa ma l'importante è che non ci siano alberi sintattici diversi. Capire se una CFG è ambigua è un problema indecidibile

Esempio 27. vediamo un esempio:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid SS \mid iS \mid iSeS$$

con S =statement, i =if e e =else. Considero due derivazioni:

1. $S \rightarrow iSeS \rightarrow iiSeS \rightarrow iie$:



2. $S \rightarrow iS \rightarrow iiSeS \rightarrow iieS \rightarrow iie$:



Si ha quindi una grammatica ambigua

Teorema 2. Per ogni CFG, con $G = (V, T, P, S)$, per ogni stringa w di terminali si ha che w ha due alberi sintattici distinti sse ha due derivazioni sinistre da S distinte.

Se la grammatica non è ambigua allora esiste un'unica derivazione sinistra da S

Linguaggi inerentemente ambigui

Definizione 7. Un linguaggio L è inerentemente ambiguo se tutte le grammatiche CFG per tale linguaggio sono a loro volta ambigue

Esempio 28. Sia $L = \{a^n b^n c^m d^m \mid n, m \geq 1\} \cup \{a^n b m n c^m d^n \mid n, m \geq 1\}$ si ha quindi un CFL formato dall'unione di due CFL. L è inerentemente ambiguo e generato dalla seguente grammatica:

- $S \rightarrow AB \mid C$

- $A \rightarrow aAb \mid ab$
- $B \rightarrow cBd \mid cd$
- $C \rightarrow aCd \mid aDd$
- $D \rightarrow bDc \mid bc$

si possono avere due derivazioni:

1. $S \rightarrow_{lm} AB \rightarrow_{lm} aAbB \rightarrow_{lm} aabbB \rightarrow_{lm} aabbcBd \rightarrow_{lm} aabbccdd$
2. $S \rightarrow_{lm} C \rightarrow_{lm} aCd \rightarrow_{lm} aaBdd \rightarrow_{lm} aabBcdd \rightarrow_{lm} aabbccdd$

a generare problemi sono le stringhe con $n=m$ perché possono essere prodotte in due modi diversi da entrambi i sottolinguaggi. Dato che l'intersezione tra i due sottolinguaggi non è vuota si ha che L è ambiguo

1.1.3 Grammatiche Regolari

Sono le grammatiche che generano i linguaggi regolari (quelli del terzo tipo) che sono casi particolari dei CFL.

Si ha la solita grammatica $G = (V, T, P, S)$ con però vincoli su P :

- ε si può ottenere solo con $S \rightarrow \varepsilon$
- le produzioni sono tutte lineari a destra ($A \rightarrow aA$ o $A \rightarrow a$) o a sinistra ($A \rightarrow Ba$ o $A \rightarrow a$)

Esempio 29. $I \rightarrow a \mid b \mid Ia \mid Ib \mid I0 \mid I1$ è una grammatica con le produzioni lineari a sinistra.

Potremmo pensarlo a destra $I \rightarrow a \mid b \mid aI \mid bI \mid 0I \mid 1I$.

Vediamo esempi di produzione con queste grammatiche:

- con $I \rightarrow a \mid b \mid Ia \mid Ib \mid I0 \mid I1$ possiamo derivare $ab01b0$:

$$I \rightarrow I0 \rightarrow Ib0 \rightarrow I1b0 \rightarrow I01b0 \rightarrow Ib01b0 \rightarrow ab01b0$$

- con $I \rightarrow a \mid b \mid aI \mid bI \mid 0I \mid 1I$ invece non riusciamo a generare nulla:

$$I \rightarrow 0I \rightarrow 0a$$

definisco quindi un'altra grammatica (con una nuova categoria sintattica):

$$I \rightarrow aJ \mid bJ$$

$$J \rightarrow a \mid b \mid aJ \mid bJ \mid 0J \mid 1J$$

che però non mi permette di terminare le stringhe con 0 e 1, la modifico ancora ottenendo:

$$I \rightarrow aJ \mid bJ$$

$$J \rightarrow a \mid b \mid aJ \mid bJ \mid 0J \mid 1J \mid 0 \mid 1$$

e questo è il modo corretto per passare da lineare sinistra a lineare destra

Esempio 30. Sia $G = (\{S\}, \{0, 1\}, P, S)$ con $S \rightarrow \varepsilon \mid 0 \mid 1 \mid 0S \mid 1S$. Si ha quindi:

$$L(G) = \{0, 1\}^*$$

si hanno comunque due proposizioni ridondanti, riducendo trovo:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid 0S \mid 1S$$

con solo produzioni lineari a destra. Con produzioni lineari a sinistra ottengo:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid S0 \mid S1$$

Esempio 31. Trovo una grammatica lineare destra e una sinistra per $L = \{a^n b^m \mid n, m \geq 0\}$:

- **lineare a destra:** si ha $G = (\{S, B\}, \{a, b\}, P, S)$ e quindi:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid aS \mid bB$$

$$B \rightarrow bB \mid b$$

ma non si possono generare stringhe di sole b , infatti:

$$S \rightarrow aS \rightarrow abB \rightarrow abbB \rightarrow abbb$$

ma aggiungere ε a B **non è lecito**. posso però produrre la stessa stringa da due derivazioni diverse:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid aS \mid bB \mid b$$

$$B \rightarrow bB \mid b$$

che risulta quindi la nostra lineare a destra

- **lineare a sinistra:** si ha $G = (\{S, A\}, \{a, b\}, P, S)$ e quindi:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid Sb \mid Ab \mid a$$

$$A \rightarrow Aa \mid a$$

Esempio 32. Trovo una grammatica lineare destra e una sinistra per $L = \{ab^n cd^m e \mid n \geq 0, m > 0\}$:

- **lineare a destra:** si ha $G = (\{S, A, B, E\}, \{a, b, c, d, e\}, P, S)$ e quindi:

$$S \rightarrow aA$$

$$A \rightarrow bA \mid cB$$

$$B \rightarrow dB \mid dE$$

$$E \rightarrow e$$

- **lineare a sinistra:** si ha $G = (\{S, X, Y, Z\}, \{a, b, c, d, e\}, P, S)$ e quindi:

$$S \rightarrow Xe$$

$$A \rightarrow Xd \mid Yd$$

$$B \rightarrow Zc$$

$$E \rightarrow a \mid Zb$$

quindi se per esempio ho la stringa "ciao" si ha:

- **lineare a destra:**

$$S \rightarrow Ao$$

$$A \rightarrow Ba$$

$$B \rightarrow Ei$$

$$E \rightarrow c$$

- **lineare a sinistra:**

$$S \rightarrow cA$$

$$A \rightarrow iB$$

$$B \rightarrow aE$$

$$E \rightarrow o$$

Esempio 33. A partire da $G = (\{S, T\}, \{0, 1\}, P, S)$ con:

$$S \rightarrow \varepsilon \mid 0S \mid 1T$$

$$T \rightarrow 0T \mid 1S$$

trovo come è fatto $L(G)$:

$$L(G) = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ ha un numero di 1 pari}\}$$

Esempio 34. fornire una grammatica regolare a destra e sinistra per:

$$L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ ha almeno uno 0 o almeno un 1}\}$$

Si ha che tutte le stringhe tranne quella vuota contengono uno 0 o un 1 quindi $G = (\{S\}, \{0, 1\}, P, S)$:

- **lineare a destra:**

$$S \rightarrow 0 \mid 1 \mid 0S \mid 1S$$

- **lineare a sinistra:**

$$S \rightarrow 0 \mid 1 \mid S0 \mid S1$$

1.1.4 Espressioni Regolari (Regex)

le regex sono usate per la ricerca di un pattern in un testo o negli analizzatori lessicali. Una regex denota il linguaggio e non la grammatica. Si hanno le seguenti operazioni tra due linguaggi L e M :

- **unione:** dati $L, M \in \Sigma^*$, l'unione $L \cup M$ è l'insieme delle stringhe che si trovano in entrambi i linguaggi o solo in uno dei due

Esempio 35.

$$L = \{001, 10, 111\}$$

$$M = \{\varepsilon, 001\}$$

$$L \cup M = \{\varepsilon, 01, 10, 111, \varepsilon\}$$

si ha che:

$$L \cup M = M \cup L$$

- **concatenazione:** dati $L, M \in \Sigma^*$, la concatenazione $L \cdot M$ (o LM) è l'insieme di tutte le stringhe ottenibili concatenandone una di L a una di M

Esempio 36.

$$L = \{001, 10, 111\}$$

$$M = \{\varepsilon, 001\}$$

$$L \cdot M = \{001, 001001, 10, \dots\}$$

si ha che:

$$L \cdot M \neq M \cdot L$$

- si definiscono:

$$- L \cdot L = L^2, L \cdot L \cdot L = L^3 \text{ etc...}$$

$$- L^1 = L$$

$$- L^0 = \{\varepsilon\}$$

- **chiusura di Kleene:** dato $L \subseteq \Sigma^*$ si ha che la chiusura di Kleene di L è:

$$L^* = \bigcup_{i \geq 0} L^i$$

ricordando che $L^0 = \varepsilon$

Esempio 37. Sia $L = \{0, 11\}$, si ha:

$$L^0 = \varepsilon$$

$$L^1 = L = \{0, 11\}$$

$$L^2 = L \cdot L = \{00, 011, 110, 1111\}$$

$$L^3 = L \cdot L \cdot L = L^2 \cdot L = \{000, 0110, 1100, 11110, 0011, 01111, 11011, 111111\}$$

vediamo dei casi particolari:

- $L = \{0^n \mid n \geq 0\}$ implica $|L| = \infty$ e quindi, essendo $L^i = L$, $i \geq 1$ e quindi $|L^i| = \infty$, $|L^*| = \infty$. Si ha quindi:

$$L^* = L^0 \cup L^1 \cup \dots \cup L^i = L$$

- $L = \emptyset$ implica $L^0 = \{\varepsilon\}$, $L^2 = L \cdot L = \emptyset$ e così via per ogni concatenazione di L . Si ha quindi:

$$L^* = L^0 = \{\varepsilon\}$$

– $L = \{\varepsilon\}$ implica $L^0 = \{\varepsilon\} = L = L^1 = L^2 = \dots$, si ha quindi:

$$L^* = \{\varepsilon\} = L$$

L'insieme vuoto e l'insieme contenente la stringa vuota hanno le uniche chiusure di Kleene finite

Definizione 8. *Si riporta la definizione ricorsiva di un'espressione regolare:*

• **casi base:** *si hanno tre casi base:*

1. ε e \emptyset sono espressioni regolari
2. se $a \in \Sigma$ a è un'espressione regolare, $L(a) = \{a\}$
3. le variabili che rappresentano linguaggi regolari sono espressioni regolari, $L(L) = L$

• **casi passo:** *si hanno i 4 casi passo:*

1. **unione:** se E e F sono espressioni regolari allora anche $E + F = E \cup F$ è un'espressione regolare e si ha:

$$L(E + F) = L(E) \cup L(F)$$

2. **concatenazione:** se E e F sono espressioni regolari allora anche $EF = E \cdot F$ è un'espressione regolare e si ha:

$$L(EF) = L(E) \cdot L(F)$$

3. **chiusura:** se E è un'espressione regolare allora E^* è un'espressione regolare e si ha:

$$L(E^*) = (L(E))^*$$

4. **parentesi:** se E è un'espressione regolare allora (E) è un'espressione regolare e si ha:

$$L((E)) = L(E)$$

Esempio 38. *trovo regex per l'insieme di stringhe in $\{0,1\}^*$ che consistono in 0 e 1 alternati:*

$$01 \rightarrow \{01\}$$

$$(01)^* \rightarrow \{\varepsilon, 01, 0101, 010101, \dots\}$$

$$(01)^* + (10)^* \rightarrow \{\varepsilon, 01, 10, 0101, 1010, \dots\}$$

ma posso volere diverse quantità di 0 e 1, sempre mantenendo l'alternanza, metto o uno 0 o un 1 davanti a quanto ottenuto appena sopra:

$$(01)^* + (10)^* + 0(10)^* + 1(01)^* \rightarrow \{\varepsilon, 01, 10, 010, 101, \dots\}$$

non è comunque l'unica soluzione, si può avere:

$$(\varepsilon + 1)(01)^*(\varepsilon + 0) \rightarrow \{\varepsilon, 01, 10, 010, 101, \dots\}$$

oppure ancora:

$$(\varepsilon + 0)(10)^*(\varepsilon + 1)$$

Si ha una precedenza degli operatori, in ordine di precedenza (si valuta da sinistra a destra):

1. chiusura di Kleene $*$
2. concatenazione \cdot , che è associativo $((E \cdot F) \cdot G = E \cdot (F \cdot G))$ ma non è commutativo $(E \cdot F \neq F \cdot E)$
3. unione $+$ che è associativa $((E+F)+G = E+(F+G))$ ed è commutativo $(E + F = F + E)$
4. infine le parentesi

si hanno anche delle proprietà algebriche:

- due espressioni regolari sono equivalenti se denotano lo stesso linguaggio
- due espressioni regolari con variabili sono equivalenti se lo sono \forall assegnamento alle variabili
- l'unione è commutativa e associativa, la concatenazione è solo associativa
- si definiscono:

- **identità:** ovvero un valore unito all'identità è pari a se stesso (elemento neutro della somma $0 + x = x + 0 = x$). \emptyset è identità per l'unione ($\emptyset + L = L + \emptyset = L$), $\{\varepsilon\}$ è identità per la concatenazione ($\varepsilon L = L\varepsilon = L$)
- **annichilitore:** ovvero un valore concatenato all'annichilitore da l'annichilitore (l'elemento nullo del prodotto $0x = x0 = 0$). \emptyset è l'annichilitore per la concatenazione ($\emptyset L = L\emptyset = \emptyset$)
- **distributività:** dell'unione rispetto alla concatenazione (che non è commutativa):
 - **distributività sinistra:** $L(M + N) = LM + LN$
 - **distributività destra:** $(M + N)L = ML + NL$
- **idempotenza:** $L + L = L$
- $(L^*)^* = L^*$
- $\emptyset^* = \varepsilon$ infatti $L(\emptyset) = \{\varepsilon\} \cup L(\emptyset) \cup L(\emptyset) \cdot L(\emptyset) \cup \dots = \{\varepsilon\} \cup \emptyset \cup \emptyset \dots = \varepsilon$
- $\varepsilon^* = \varepsilon$ infatti $L(\varepsilon) = \{\varepsilon\} \cup L(\varepsilon) \cup L(\varepsilon) = \{\varepsilon\} \cup \{\varepsilon\} \cup \dots = \{\varepsilon\} = L(\varepsilon)$
- $L^+ = L \cdot L^* = L^* \cdot L$ (quindi con almeno un elemento che non sia la stringa vuota)
- $L^* = l^+ + \varepsilon$

Esempio 39. *Ho $ER = (0 + 1)^*0^*(01)^*$:*

- *001 fa parte del linguaggio? Si: $\varepsilon \cdot 0 \cdot 01$*
- *1001 fa parte del linguaggio? Si: $1 \cdot 0 \cdot 01$*
- *0101 fa parte del linguaggio? Si: $\varepsilon \cdot \varepsilon \cdot 0101$*
- *0 fa parte del linguaggio? Si: $\varepsilon \cdot 0 \cdot \varepsilon$*
- *10 fa parte del linguaggio? Si: $1 \cdot 0 \cdot \varepsilon$*

$L((0+1)^*) = (L(0+1))^* = (L(0)+L(1))^* = (\{0\} \cup \{1\})^* = (\{0, 1\})^* = \{0, 1\}^*$
 ovvero tutte le combinazioni di 0 e 1

Si ricorda che:

$$(0 + 1)^* \neq 0^* + 1^*$$

Esempio 40. *ho* $ER = ((01)^* \cdot 10 \cdot (0 + 1)^*)^*$

- *0101 fa parte del linguaggio? No*
- *01000 fa parte del linguaggio? No*
- *01011 fa parte del linguaggio? No*
- *10111 fa parte del linguaggio? Si, $\varepsilon \cdot 10 \cdot 111$*
- *101010 fa parte del linguaggio? Si, prendo $10 \cdot 1010$*
- *101101 fa parte del linguaggio? Si, $\varepsilon \cdot 10 \cdot 1$ due volte*
- *0101100011 fa parte del linguaggio? Si, $0101 \cdot 10 \cdot 0011$ (0011 lo posso prendere da $(0 + 1)^*$)*

Esempio 41. *ho* $ER = ((01)^* \cdot 10 \cdot (0 + 1))^*$

- *0101 fa parte del linguaggio? No*
- *01000 fa parte del linguaggio? No*
- *01011 fa parte del linguaggio? No*
- *10111 fa parte del linguaggio? No*
- *101010 fa parte del linguaggio? No*
- *101101 fa parte del linguaggio? Si, $\varepsilon \cdot 10 \cdot 1$ due volte*
- *0101100011 fa parte del linguaggio? No*

Esempio 42. *Da* $L \subseteq \{0, 1\}^*$ *stringhe contenenti almeno una volta 01 quindi:*

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

Esempio 43. *ho* $ER = (00^*1^*)^*$, *quindi:*

$$L = \{\varepsilon, 0, 01, 000, 001, 010, 011\} = \{\varepsilon\} \cup \{w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ che inizia con } 0\}$$

Esempio 44. *ho* $ER = a(a + b)^*b$, *quindi:*

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w \text{ inizia con } a \text{ e termina con } b\}$$

Esempio 45. *ho* $ER = (0^*1^*)^*000(0 + 1)^*$, *quindi, sapendo che* $\{0, 1\}^*$ *mi permette tutte le combinazioni che voglio come* $(0 + 1)^*$:

$$L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w \text{ come voglio con tre } 0 \text{ consecutivi}\}$$

Esempio 46. ho $ER = a(a+b)^*c(a+b)^*c(a+b)^*b$, quindi:

$L = \{w \in \{a, b, c\}^* \mid w \text{ inizia con } a, \text{ termina con } b \text{ e contiene almeno due } c, \\ \text{eventualmente non adiacenti}\}$

Esempio 47. Da $L \subseteq \{0, 1\}^*$ ogni 1 è seguito da 0, a meno che non sia l'ultimo carattere, ovvero 11 non compare quindi:

$$(10 + 0)^*(\varepsilon + 1)^*$$

Esempio 48. cerco ER per $L \subseteq \{0, 1\}^*$ stringhe contenenti un numero pari di 1:

$$(0^*10^*1)^*0^*$$

oppure:

$$(0 + 10^*1)^*$$

Esempio 49. cerco ER per $L \subseteq \{0, 1\}^*$ stringhe contenenti un numero dispari di 1:

$$(0^*10^*)^*0^*10^*$$

oppure:

$$(0 + 10^*1)^*10^*$$

Esempio 50. cerco ER per $L \subseteq \{0, 1\}^*$ stringhe contenenti un numero divisibile per 3 di 0:

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

Esempio 51. cerco ER per $L \subseteq \{0, 1\}^*$ stringhe contenenti al più una coppia di 1 consecutivi:

$$(10 + 0)^*(11 + 1 + \varepsilon)(01 + 0)^*$$

Esempio 52. cerco ER per $L \subseteq \{a, b, c\}^*$ stringhe contenenti almeno una a e almeno una b :

$$c^*(a(a+c)^*b + b(b+c)^*a)(a+b+c)^*$$

1.2 Automi

un automa a stati finiti ha un insieme di stati e un controllo che si muove da stato a stato in risposta a input esterni. Si ha una distinzione:

- **automi deterministici:** dove l'automa non può essere in più di uno stato per volta
- **automi non deterministici:** dove l'automa può trovarsi in più stati contemporaneamente

1.2.1 Automi deterministici

Un automa a stati finiti deterministico (*DFA*), un automa che dopo aver letto una qualunque sequenza di input si trova in un singolo stato. Il termine *deterministico* concerne il fatto che per ogni input esiste un solo stato verso il quale l'automa passa dal suo stato corrente. Un automa a stati finiti deterministico consiste nelle seguenti parti:

- un insieme finito di stati, spesso indicato con Q
- un insieme finito di simboli di input, spesso indicato con Σ
- una funzione di transizione, che prende come argomento uno stato e un simbolo di input e restituisce uno stato. La funzione di transizione sarà indicata comunemente con δ . Nella rappresentazione grafica informale di automi δ è rappresentata dagli archi tra gli stati e dalle etichette sugli archi. Se q è uno stato e a è un simbolo di input, $\delta(q, a)$ è lo stato p tale che esiste un arco etichettato con a da q a p ²
- uno stato iniziale, uno degli stati in Q
- un insieme di stati finali, o accettanti, F . L'insieme F è un sottoinsieme di Q

Nel complesso un DFA è rappresentato in maniera concisa con l'enumerazione dei suoi elementi, quindi con la quintupla:

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

con A nome del DFA, Q insieme degli stati, Σ rappresentante i simboli di input, δ la sua funzione di transizione, q_0 il suo stato iniziale e F l'insieme degli stati accettanti.

Vediamo come decidere se accettare o meno una stringa (sequenza di caratteri) in input mediante un DFA.

Ho una sequenza in input $a_1 \dots a_n$. Parto dallo stato iniziale q_0 , consultando la funzione di transizione δ , per esempio $\delta(q_0, a_1) = q_1$ e trovo lo stato in cui il DFA entra dopo aver letto a_1 . Poi passo a $\delta(q_1, a_2) = q_2$ e così via, $\delta(q_{i-1}, a_i) = q_i$ fino a ottenere q_n . Se q_n è elemento di F allora $a_1 \dots a_n$ viene accettato, altrimenti viene rifiutato.

Esempio 53. *specifico DFA che accetta tutte le stringhe binarie in cui compare la sequenza 01:*

$$L = \{w \mid w \text{ è della forma } x01y, \text{ con } x \text{ e } y \text{ pari a } 0 \text{ o } 1\} = \{01, 11010, 100011, \dots\}$$

o anche:

$$L = \{x01y | x, y \in \{0, 1\}^*\}$$

abbiamo quindi:

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

ragioniamo sul fatto che A :

1. se ha "già visto" 01 , accetterà qualsiasi input
2. pur non avendo ancora visto 01 , l'input più recente è stato 0 , cosicché se ora vede un 1 avrà visto 01
3. non ha ancora visto 01 , ma l'input più recente è nullo (siamo all'inizio), in tal caso A non accetta finché non vede uno 0 e subito dopo un 1

la terza condizione rappresenta lo stato iniziale. All'inizio bisogna vedere uno 0 e poi un 1 . Ma se nello stato q_0 si vede per primo un 1 allora non abbiamo fatto alcun passo verso 01 , e dunque dobbiamo permanere nello stato q_0 , $\delta(q_0, 1) = q_0$. D'altra parte se nello stato iniziale vedo 0 siamo nella seconda condizione, uso quindi q_2 per questa condizione, si avrà quindi $\delta(q_0, 0) = q_2$. Vedo ora le transizioni di q_2 , se vedo 0 ho che 0 è l'ultimo simbolo incontrato quindi uso nuovamente q_2 , $\delta(q_2, 0) = q_2$, in attesa di un 1 . Se arriva 1 passo allo stato accertante q_1 corrispondente alla prima condizione, $\delta(q_2, 1) = q_1$. Ora abbiamo incontrato 01 quindi può succedere qualsiasi cosa e dopo qualsiasi cosa accada potremo nuovamente aspettarci qualsiasi cosa, ovvero $\delta(q_1, 0) = \delta(q_1, 1) = q_1$. Si deduce quindi che:

$$Q = \{q_0, q_1, q_2\} \text{ e } F = \{q_1\}$$

quindi:

$$A = \{\{q_0, q_1, q_2\}, \{0, 1\}, \delta, q_0, \{q_1\}\}$$

con in totale le seguenti transizioni:

$$\delta(q_0, 1) = q_0$$

$$\delta(q_0, 0) = q_2$$

$$\delta(q_2, 0) = q_2$$

$$\delta(q_2, 1) = q_1$$

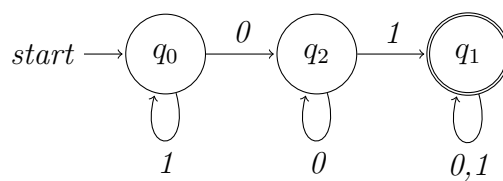
$$\delta(q_1, 0) = q_1$$

$$\delta(q_1, 1) = q_1$$

posso rappresentarle in maniera tabulare, con lo stato iniziale indicato da \rightarrow e quelli accettanti con $*$:

δ	0	1
$\rightarrow q_0$	q_1	q_0
$* q_1$	q_1	q_1
q_2	q_2	q_1

o col diagramma di transizione:



Esempio 54. Trovo automa per:

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w \text{ che contiene un numero pari di } b\}$$



ovvero se da q_0 vado a q_1 sono obbligato ab generare due b , dato che il nodo accettante è q_0 . In entrambi i nodi posso generare quante a voglio.

Esempio 55. Trovo automa per:

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w \text{ che contiene un numero dispari di } b\}$$



ovvero se da q_0 vado a q_1 sono obbligato ab generare una sola b , dato che il nodo accettante è q_1 . In entrambi i nodi posso generare quante a voglio e posso tornare da q_1 a q_0 per generare altre b .

Esempio 56. Trovo automa per:

$$L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid w = 0^n 1^m\}$$

vediamo i vari casi: **Si ha che q_E è lo stato pozzo dove vanno le stringhe venute male**

- $n, m \geq 0$:



ovvero posso non generare nulla e uscire subito con q_0 , generare solo un 1 e passare a q_1 e uscire oppure generare 0 e 1 a piacere con l'ultimo stato o generare 0 a piacere dal primo e 1 a piacere dal secondo.

- $n \geq 0 \ m > 0$:



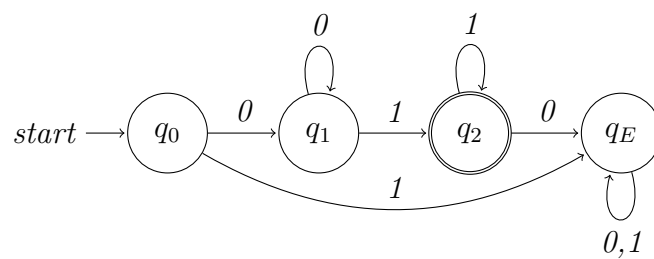
ovvero come l'esempio sopra solo che non posso uscire in q_0 in quanto almeno un 1 deve essere per forza generato

- $n > 0 \ m \geq 0$:



CHIARIRE

- $n, m > 0$:



CHIARIRE

Esempio 57. Trovo automa per:

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w \text{ che contiene un numero pari di } a \text{ e dispari di } b\}$$



Esempio 58. Trovo automa per:

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid w \text{ che contiene un numero pari di } a \text{ seguito da uno dispari di } b\}$$

$$L = \{a^{2n}b^{2k+1} \mid j, k \geq 0\}$$



ovvero in tabella:

δ	a	b
$\rightarrow q_0$	q_1	q_2
q_1	q_0	q_E
$* q_2$	q_E	q_3
q_3	q_E	q_2
q_E	q_E	q_E

Esempio 59. Trovo automa per:

$$L = \{a^{2k+1}b^{2h} \mid h, k \geq 0\}$$



Esempio 60. Trovo automa per:

$$L = \{a^{2n+1}b^{2k+1} \mid n, k \geq 0\}$$



Esempio 61. Trovo automa per:

$$L = \{x010y \mid x, y \in \{0, 1\}^*\}$$



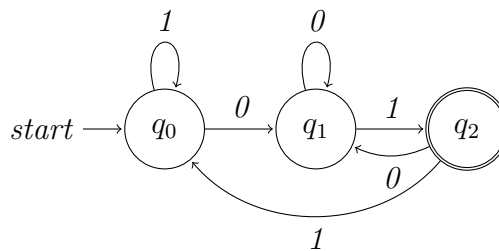
1.2.2 Automi non deterministici

Un automa a stati finiti non deterministici (*NFA*) può trovarsi in diversi stati contemporaneamente. Come i DFA accettano linguaggi regolari e spesso sono più semplici da trattare rispetto ai DFA.

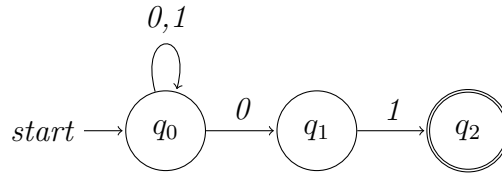
Un NFA è definito come un DFA ma si ha un diverso tipo di transizione δ , che ha sempre come argomenti uno stato e un simbolo di input ma restituisce zero o più stati.

Esempio 62. Sia $L = \{x01 \mid x \in \{0, 1\}^*\}$ ovvero il linguaggio formato da tutte le stringhe binarie che terminano in 01.

Avremo il seguente automa deterministico:



che diventa il seguente NFA:



quindi con:

$$\delta(q_0, 0) = \{q_0, q_1\}$$

$$\delta(q_0, 1) = \{q_0\}$$

$$\delta(q_1, 0) = \emptyset$$

$$\delta(q_1, 1) = \{q_2\}$$

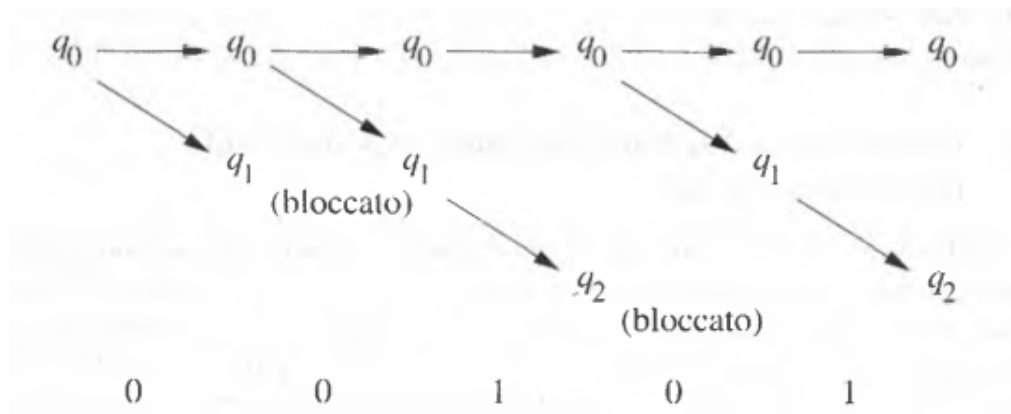
$$\delta(q_2, 0) = \emptyset$$

$$\delta(q_2, 1) = \emptyset$$

in forma tabulare:

δ	0	1
$\rightarrow q_0$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_1\}$
q_1	\emptyset	$\{q_2\}$
$*q_0$	\emptyset	\emptyset

vediamone la simulazione per la stringa 00101:



ovvero si parte dallo stato iniziale, quando viene letto 0 si passa a q_0 e q_1 , poi viene letto il secondo 0 quindi q_0 va nuovamente verso q_0 e q_1 mentre il primo q_1 muore non avendo transizioni su 0. Arriva poi l'1 quindi q_0 va solon verso q_0 e q_1 verso q_2 e sarebbe accettante ma l'input non è finito. Ora arriva 0 e q_2 si blocca mentre q_0 va sia in q_0 che in q_1 . Arriva infine un 1 che manda q_0 in q_0 e q_1 in q_2 che è accettante e non avendo altri input si è dimostrata l'appartenenza della stringa al linguaggio

definisco quindi un NFA come una quintupla:

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

con, a differenza dei DFA:

$$\delta : Q \times F \rightarrow 2^Q$$

Possiamo ora definire δ , delta cappuccio che prende in ingresso uno stato e l'intera stringa w . Definisco ricorsivamente:

- **caso base:** se $|w| = 0$ ovvero se $W = \varepsilon$ si ha:

$$\hat{\delta}(q, \varepsilon) = \{q\}$$

- **caso passo:** se $|w| > 0$, allora $W = xa$, $a \in \Sigma$ e $x \in \Sigma^*$. Posto $\hat{\delta}(q, x) = \{p_1, \dots, p_k\}$ si ha:

$$\hat{\delta}(q, w) = \cup \delta(p_i, a)$$

Per il linguaggio L accettato dall'automa si ha:

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

Esempio 63. Automa per $L = \{x010y \mid x, y \in \{0, 1\}^*\}$ ovvero tutte le stringhe con dentro la sequenza 010:



Troviamo ora un algoritmo che trasformi un NFA in un DFA. Dall'ultimo esempio ricavo:

	0	1
\emptyset	\emptyset	\emptyset
$\rightarrow \{q_0\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
$\{q_1\}$	\emptyset	$\{q_2\}$
$* \{q_2\}$	\emptyset	\emptyset
$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_2\}$
$* \{q_0, q_2\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
$* \{q_1, q_2\}$	\emptyset	$\{q_2\}$
$* \{q_0, q_1, q_2\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_2\}$

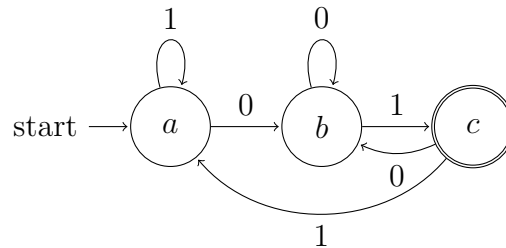
ovvero:



che è il DFA che si era anche prima ottenuto. Si hanno però dei sottoinsiemi mai raggiungibili. Si ha quindi:

	0	1
$\rightarrow \{q_0\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$
$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0, q_2\}$
$\{q_0, q_2\}$	$\{q_0, q_1\}$	$\{q_0\}$

e definendo $\{q_0\} = a$, $\{q_0, q_1\} = b$ e $\{q_0, q_2\} = c$ si avrà:



Definiamo questo algoritmo che avrà:

- come input un NFA $N = (Q_n, \Sigma, \delta_N, q_0, F_N)$
- come output un DFA $D = (Q_D, \Sigma, \delta_D, \{q_0\}, F_D)$ tale che $L(D) = L(N)$

con:

- $Q_D = 2^{Q_N}$ (quindi se $Q_N = n$ si ha $|Q_D| = 2^n$)
- $F_D = \{S \subseteq Q_n \mid S \cap F_N \neq \emptyset\}$

- $\forall S \subseteq Q_N$ e $\forall a \in \Sigma$:

$$\delta_D(S, a) = \cup \delta_n(p, a)$$

per esempio:

$$\delta_D(\{q_0, q_1, q_2\}, 0) = \delta_N(q_0, 0) \cup \delta_N(q_1, 0) \cup \delta_N(q_2, 0)$$

Si definisce l' ε -NFA, l'automa a stati finiti non deterministici con ε transizioni. Con la transizione ε posso saltare i nodi, ovvero avanza senza aggiungere caratteri

Esempio 64. Si ha $ER = a^*b^*c^*$, che genera:

$$L = \{a^n b^m c^k \mid n, m, k \geq 0\}$$

si ha:



ovvero con ε posso per esempio generare quante a voglio da q_0 e passare a q_2 , uscendo senza generare altro

Si definisce la funzione $ECLOSE : Q \rightarrow 2^Q$, con $ECLOSE(q)$ insieme degli stati raggiungibili da q tramite ε -mosse. Nell'esempio precedente si avrebbe:

$$ECLOSE(q_0) = \{q_0, q_1, q_2\}$$

$$ECLOSE(q_1) = \{q_1, q_2\}$$

$$ECLOSE(q_2) = \{q_2\}$$

si ha inoltre che:

- $ECLOSE 2^Q \rightarrow 2^Q \quad P \subseteq Q$
- $ECLOSE(P) = \cup ECLOSE(p)$
- $ECLOSE(\emptyset) = \emptyset$

mettendo in tabella l'esempio precedente si ha:

	a	b	c
$* \rightarrow \{q_0, q_1, q_2\}$	$\{q_0, q_1, q_2\}$	$\{q_1, q_2\}$	$\{q_2\}$
$*\{q_1, q_2\}$	\emptyset	$\{q_1, q_2\}$	$\{q_2\}$
$*\{q_2\}$	\emptyset	\emptyset	$\{q_2\}$
\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

riscrivendo:

- $a = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $b = \{q_1, q_2\}$
- $c = \{q_2\}$
- $d = \emptyset$

ovvero:

$$\begin{aligned}
 \delta_D(\{q_0, q_1, q_2\}, a) &= ECLOSE(\delta_N(q_0, a) \cup \delta_N(q_1, a) \cup \delta_N(q_2, a)) \\
 &= ECLOSE(\{q_0\} \cup \emptyset \cup \emptyset) = ECLOSE(\{q_0\}) \\
 &= ECLOSE(q_0) = \{q_0, q_1, q_2\}
 \end{aligned}$$

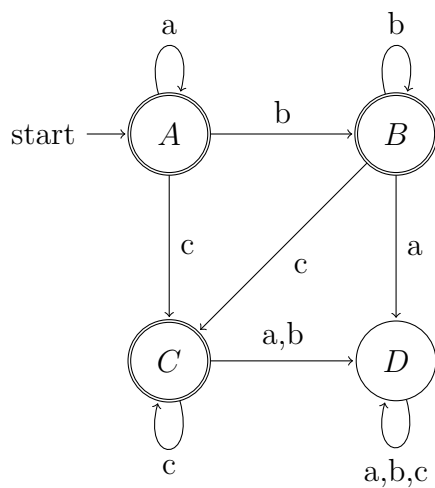
e

$$\begin{aligned}
 \delta_D(\{q_0, q_1, q_2\}, b) &= ECLOSE(\delta_N(q_0, b) \cup \delta_N(q_1, b) \cup \delta_N(q_2, b)) \\
 &= ECLOSE(\emptyset \cup \{q_1\} \cup \emptyset) = ECLOSE(\{q_1\}) \\
 &= ECLOSE(q_1) = \{q_1, q_2\}
 \end{aligned}$$

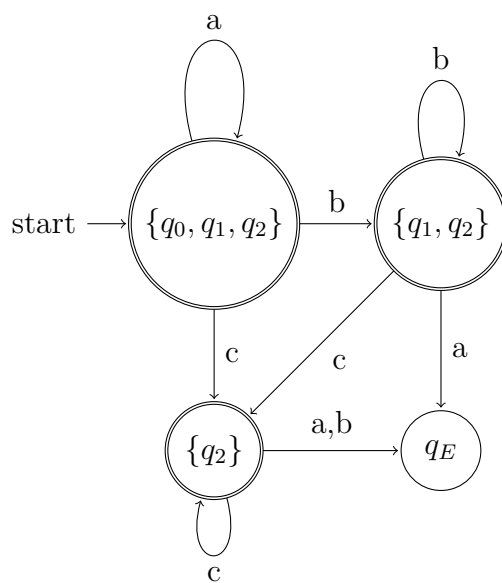
e

$$\begin{aligned}
 \delta_D(\{q_0, q_1, q_2\}, c) &= ECLOSE(\delta_N(q_0, c) \cup \delta_N(q_1, c) \cup \delta_N(q_2, c)) \\
 &= ECLOSE(\emptyset \cup \emptyset \cup \{q_2\}) = ECLOSE(\{q_2\}) \\
 &= ECLOSE(q_2) = \{q_2\}
 \end{aligned}$$

si ottiene quindi il seguente NFA:



che diventa il seguente DFA:



esercizi

Esempio 65. automa DFA per $w = x010y$, $x, y \in \{0, 1\}^*$:
la stringa più corta è 010



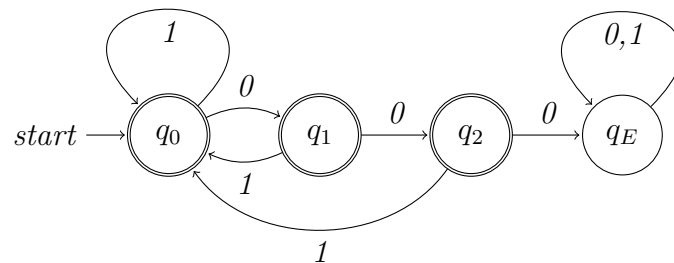
Esempio 66. automa DFA per $a^{2k+1}b^{2h}$, $h, k \geq 0$:
concatenazione di a dispari e b pari:



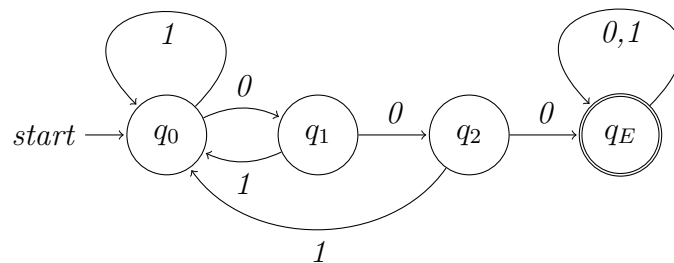
Esempio 67. cerco DFA per stringhe inizianti con a e finenti con b , con
occorrenze di b singole o a coppie, nessuna regola per c .
per esempio $abbcb$ è nel linguaggio



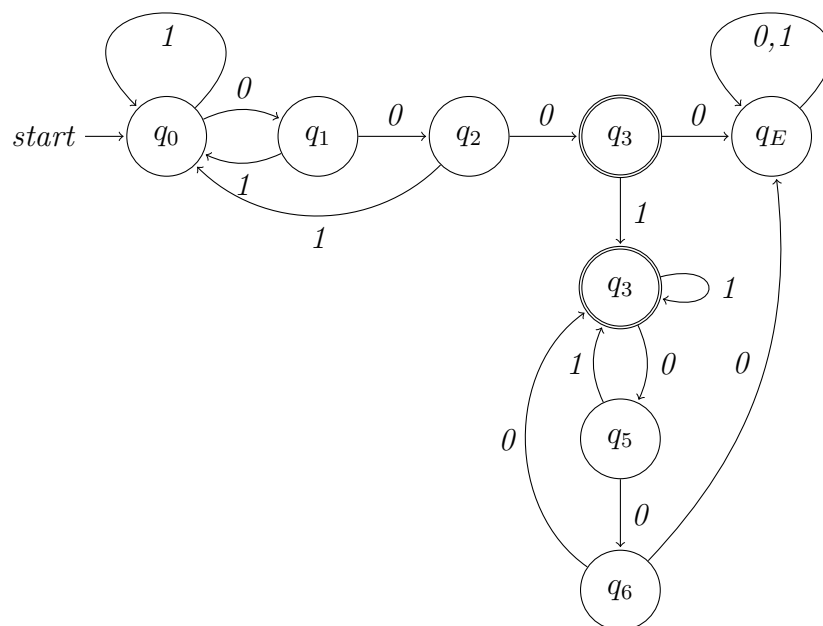
Esempio 68. *cerco DFA per stringhe di bit non contegano 000*



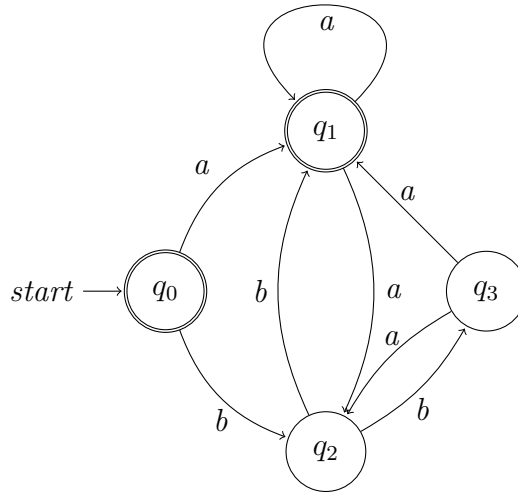
Esempio 69. *cerco DFA per stringhe di bit non contegano 000 almeno una volta*



Esempio 70. *cerco DFA per stringhe di bit che contengono 000 solo una volta*



Esempio 71. Trasformare il seguente NFA in un DFA:



abbiamo quindi:

$$\delta_D(\{q_0\}, a) = \delta_N(q_0, a) = \{q_1, q_2\}$$

$$\delta_D(\{q_0\}, b) = \delta_N(q_0, b) = \emptyset$$

$$\delta_D(\{q_1, q_2\}, a) = \delta_N(q_1, a) \cup \delta_N(q_2, a) = \{q_1, q_2\} \cup \emptyset = \{q_1, q_2\}$$

$$\delta_D(\{q_1, q_2\}, b) = \delta_N(q_1, b) \cup \delta_N(q_2, b) = \emptyset \cup \{q_1, q_3\} = \{q_1, q_3\}$$

...

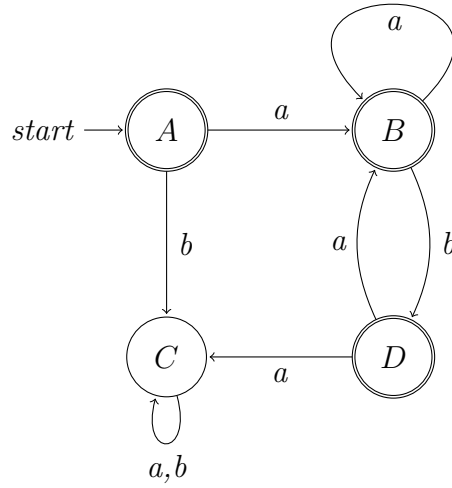
ottengo quindi:

DFA	a	b
$* \rightarrow \{q_0\}$	$\{q_1, q_2\}$	\emptyset
$*\{q_1, q_2\}$	$\{q_1, q_2\}$	$\{q_1, q_3\}$
\emptyset	\emptyset	\emptyset
$*\{q_1, q_3\}$	$\{q_1, q_2\}$	\emptyset

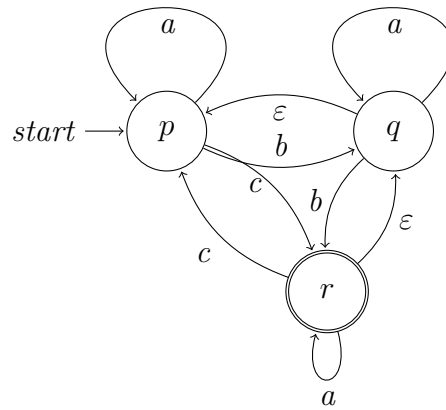
Posso ora rinominare:

- $A = \{q_0\}$
- $B = \{q_1, q_2\}$
- $C = \emptyset$
- $D = \{q_1, q_3\}$

ottengo quindi il seguente DFA:



Esempio 72. Trasformare il seguente ε -NFA in un DFA:



vediamo le $ECLOSE$:

$$ECLOSE(p) = \{p\}$$

$$ECLOSE(q) = \{p, q\}$$

$$ECLOSE(r) = \{p, q, r\}$$

si ottiene quindi:

	a	b	c
$to \{p\}$	$\{p\}$	$\{p, q\}$	$\{p, q, r\}$
$\{p, q\}$	$\{p, q\}$	$\{p, q, r\}$	$\{p, q, r\}$
$*\{p, q, r\}$	$\{p, q, r\}$	$\{p, q, r\}$	$\{p, q, r\}$

infatti, per esempio:

$$\delta_D(\{p\}, a) = ECLOSE(\delta(p, a)) = ECLOSE(\{p\}) = ECLOSE(p) = \{p\}$$

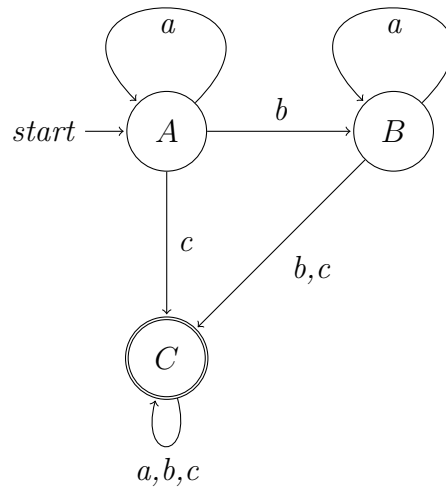
$$\begin{aligned} \delta_D(\{p, q\}, a) &= ECLOSE(\delta_N(p, a) \cup \delta_N(q, a)) = \\ ECLOSE(\{p\} \cup \{q\}) &= ECLOSE(p) \cup ECLOSE(q) = \{p\} \cup \{p, q\} = \{p, q\} \end{aligned}$$

...

si hanno quindi le seguenti rinominazioni:

- $A = \{p\}$
- $b = \{p, q\}$
- $C = \{p, q, r\}$

ovvero:



torniamo a dare bene qualche definizione per δ in un DFA:

$$\delta: Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$$

con: $q \in Q, w \in \Sigma^*$ e $\delta(p, w) = q$

- **caso base:** $w = \varepsilon \rightarrow |w| = 0 \rightarrow \delta(q, \varepsilon) = q$
caso passo: $|w| \neq 0 \rightarrow w = ax$ con $a \in \Sigma, x \in \Sigma^*$: $\delta(q, w) = \delta(q, ax) = \delta(\delta(q, a), x)$
- **caso base:** $w = \varepsilon \rightarrow |w| = 0 \rightarrow \delta(q, w) = \delta(q, \varepsilon) = q$
caso passo: $|w| \neq 0 \rightarrow w = xa$ con $a \in \Sigma, x \in \Sigma^*$: $\delta(q, w) = \delta(q, xa) = \delta(\delta(q, x), a)$

in un NFA si ha:

- **caso base:** $\delta(q, \varepsilon) = \{q\}, \forall q \in Q$
- **caso passo:** posto $w = ax$ e $\delta(q, a) = \{p_1, \dots, p_n\}$ allora $\delta(q, w) = \cup \delta(p_i, x) = \{r_1, \dots, r_n\}$.
 $\delta(q, a) = p$
 $\delta(q, w) = \delta(q, xa) = \delta(p, x) = r$

oppure:

- **caso base:** $\delta(q, \varepsilon) = \{q\}, \forall q \in Q$
- **caso passo:** posto $w = xa$ si ha $\delta(q, q) = \delta(q, xa) = \cup \delta(p, a)$ con $\delta(q, x) = \{p_1, \dots, p_n\}$

Se ho un NFA $N = (Q_N, \Sigma, \delta_N, q_{0_N}, F_N)$ con $\delta_N: Q \times \Sigma^* \rightarrow 2^{Q_N}$ che accetta un linguaggio L posso ottenere un DFA $D = (Q_D, \Sigma, \delta_D, q_{0_D}, F_D)$ equivalente con $Q_D = 2^{Q_N}$ e $q_{0_D} = \{q_{0_N}\}$ che accetta L .

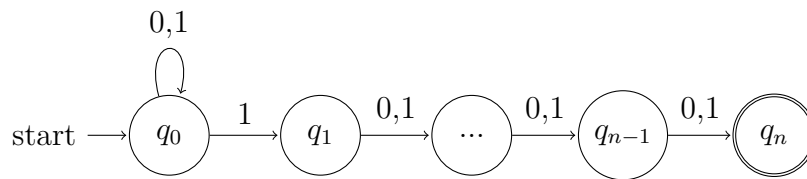
$\forall S \subseteq Q_N$ e $\forall a \in \Sigma$ si ha:

$$F_D = \{S \subseteq Q_N \mid S \cap F_N \neq \emptyset\}$$

con $\delta_D(S, a) = \cup \delta_N(p, a)$ Si ha che:

$$|Q_D| = |2^{Q_N}| = 2^{|Q_N|}$$

partiamo con un esempio:



che definisce un $L \subseteq \{0, 1\}^*$ tale che $w \in L$ sse n-simo elemento della fine è 1. Si ha:

$$|Q_N| = n + 1 \rightarrow |Q_D| = 2^n$$

Si ha che dato un ε -NFA $E = (Q_E, \Sigma, \delta_E, q_{0_E}, F_E)$ che riconosce L in un NFA $N = (Q_N, \Sigma, \delta_N, q_{0_N}, F_N)$ equivalenti con $Q_N = 2^{Q_E}$ stati in Q_E ε -close: $ECLOSE(S)=S$ e $q_N = ECLOSE(q_E)$:

$$F_N\{S \in Q_F, S \subseteq Q_E | S \cap F_E \neq \emptyset\}$$

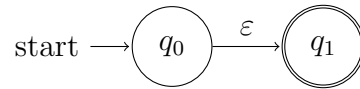
quindi:

$$\begin{aligned} \forall a \in \Sigma \text{ e } \forall S = \{p_1, \dots, p_k\}, \forall S \in Q_F \text{ e } Q_E \\ \delta_F(S, a) \text{ si ottiene } \cup \delta_E(p_i, a) = \{r_1, \dots, r_n\} \\ \delta_N(S, a) = ECLOSE(\{r_1, \dots, r_n\}) \end{aligned}$$

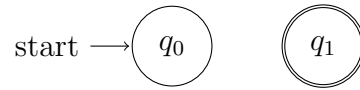
1.2.3 Da espressioni regolari a automi E-NFA

- **caso base:**

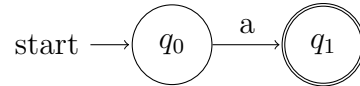
1. se $R = \varepsilon$ ovvero $L(R) = \{\varepsilon\}$ allora:



2. se $R = \emptyset$ ovvero $L(R) = \emptyset$ allora:

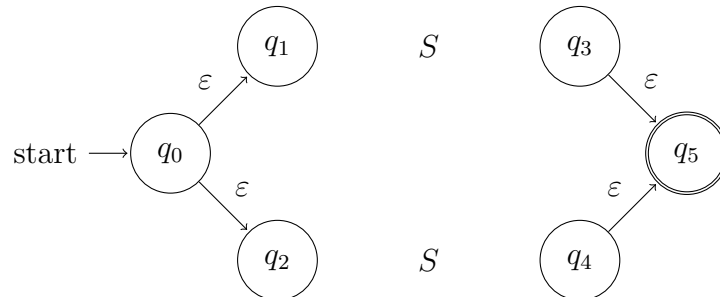


3. se $R = a$ ovvero $L(R) = \{a\}$ allora:

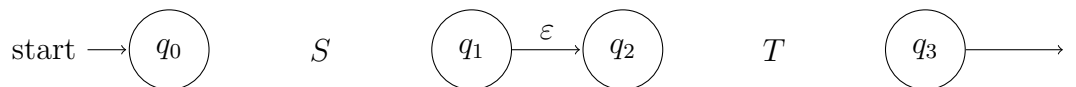


- **caso passo:**

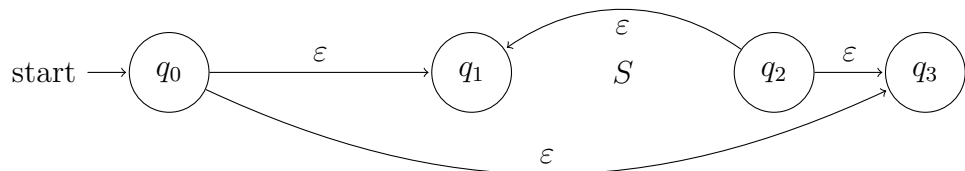
1. se $R = S + T$ quindi $L(R) = L(S) + L(T)$ allora:



2. se $R = ST$ quindi $L(R) = L(S)L(T)$:



3. se $R = S^*$ quindi $L(R) = (L(S))^*$:



Esempio 73.