Autómatas y Lenguajes Formales

Tema 5: Minimización de autómatas, propiedades de cerradura de lenguajes regulares

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

Facultad de Ciencias UNAM[1]

27 de abril de 2019

[1] Con el apoyo del proyecto PAPIME PE102117

Eliminación de Estados Inaccesibles

- Sea $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ un AFD. Decimos que un estado $q \in Q$ es accesible si y sólo si existe $w \in \Sigma^\star$ tal que $\delta^\star(q_0, w) = q$.

Eliminación de Estados Inaccesibles

- Sea $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ un AFD. Decimos que un estado $q \in Q$ es accesible si y sólo si existe $w \in \Sigma^\star$ tal que $\delta^\star(q_0, w) = q$.
- Es decir, q es accesible si y sólo si el procesamiento de alguna cadena termina en el estado q.

Eliminación de Estados Inaccesibles

- Sea $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ un AFD. Decimos que un estado $q \in Q$ es accesible si y sólo si existe $w \in \Sigma^\star$ tal que $\delta^\star(q_0, w) = q$.
- Es decir, q es accesible si y sólo si el procesamiento de alguna cadena termina en el estado q.
- El conjunto de estados accesibles de un autómata M se denota $Acc(M)$.

Eliminación de Estados Inaccesibles

- Sea $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ un AFD. Decimos que un estado $q \in Q$ es accesible si y sólo si existe $w \in \Sigma^\star$ tal que $\delta^\star(q_0, w) = q$.
- Es decir, q es accesible si y sólo si el procesamiento de alguna cadena termina en el estado q.
- El conjunto de estados accesibles de un autómata M se denota $Acc(M)$.
- Si un estado no es accesible decimos que es inaccesible.

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:
  - $A_N := \{q_0\}, \;\; A_V := \varnothing$.

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:
  - $A_N := \{q_0\},\ \ A_V := \varnothing$.
  - Mientras que $A_N \neq A_V$

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:
  - $A_N := \{q_0\}, \;\; A_V := \varnothing$.
  - Mientras que $A_N \neq A_V$
    - $A_V := A_N$

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:
  - $A_N := \{q_0\}, \;\; A_V := \varnothing$.
  - Mientras que $A_N \neq A_V$
    - $A_V := A_N$
    - $A_N := A_N \cup \{q \in Q \mid \delta(p, a) = q \; a \in \Sigma, \; p \in A_N\}$

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:
  - $A_N := \{q_0\}, \;\; A_V := \varnothing$.
  - Mientras que $A_N \neq A_V$
    - $A_V := A_N$
    - $A_N := A_N \cup \{q \in Q \mid \delta(p, a) = q \; a \in \Sigma, \; p \in A_N\}$
  - $Acc(M) := A_N$.

Cálculo de estados accesibles

- Es claro que el conjunto $Acc(M)$ puede construirse de manera algoritmica, por ejemplo como sigue:
  - $A_N := \{q_0\}, \;\; A_V := \varnothing$.
  - Mientras que $A_N \neq A_V$
    - $A_V := A_N$
    - $A_N := A_N \cup \{q \in Q \mid \delta(p, a) = q \; a \in \Sigma, \; p \in A_N\}$
  - $Acc(M) := A_N$.
- Los estados inaccesibles en un autómata son ínutiles y pueden ser eliminados sin afectar el lenguaje de aceptación

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F'\rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F'\rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F' \rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q'_0, F' \rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$
  - $\Sigma' = \Sigma$

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F' \rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$
  - $\Sigma' = \Sigma$
  - $\delta' = \delta\restriction_{Q'}$

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q'_0, F'\rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$
  - $\Sigma' = \Sigma$
  - $\delta' = \delta\restriction_{Q'}$
  - $q'_0 = q_0$

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F'\rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$
  - $\Sigma' = \Sigma$
  - $\delta' = \delta\restriction_{Q'}$
  - $q_0' = q_0$
  - $F' = F \cap Q'$

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F'\rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$
  - $\Sigma' = \Sigma$
  - $\delta' = \delta\restriction_{Q'}$
  - $q_0' = q_0$
  - $F' = F \cap Q'$
- La prueba de la equivalencia $L(M) = L(M')$ es inmediata y se deja como ejercicio.

Eliminación de estados inaccesibles

Autómata equivalente

- Dado un $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$existe un AFD $M' = \langle Q', \Sigma', \delta', q_0', F'\rangle$ equivalente a M que contiene únicamente a los estados accesibles de M, es decir, $Q' = Acc(M)$ y por lo tanto no contiene estados inaccesibles.
- Basta definir M' como sigue:
  - $Q' = Acc(M)$
  - $\Sigma' = \Sigma$
  - $\delta' = \delta\restriction_{Q'}$
  - $q_0' = q_0$
  - $F' = F \cap Q'$
- La prueba de la equivalencia $L(M) = L(M')$ es inmediata y se deja como ejercicio.
- Debido a este resultado de ahora en adelante podemos suponer que un autómata no tiene estados inaccesibles.

Equivalencias de estados

Minimización

- Decimos que dos estados $q, q' \in Q$ de un AFD son equivalentes $q \equiv q'$ si y sólo si:

$$\forall w \in \Sigma^\star \; (\delta^\star(q, w) \in F \Leftrightarrow \delta^\star(q', w) \in F)$$

Equivalencias de estados

Minimización

- Decimos que dos estados $q, q' \in Q$ de un AFD son equivalentes $q \equiv q'$ si y sólo si:

$$\forall w \in \Sigma^\star \ (\delta^\star(q, w) \in F \Leftrightarrow \delta^\star(q', w) \in F)$$

- Es decir, $\delta^\star(q, w), \delta^\star(q', w)$ son ambos finales o ambos no finales.

$\equiv$ es un relación de equivalencia

Minimización de AFD

La relación $\equiv$ entre estados es una relación de equivalencia, es decir cumple lo siguiente:

- Reflexividad: $q \equiv q$.

$\equiv$ es un relación de equivalencia

Minimización de AFD

La relación $\equiv$ entre estados es una relación de equivalencia, es decir cumple lo siguiente:

- Reflexividad: $q \equiv q$.
- Simetria: si $q \equiv q'$ entonces $q' \equiv q$.

$\equiv$ es un relación de equivalencia

Minimización de AFD

La relación $\equiv$ entre estados es una relación de equivalencia, es decir cumple lo siguiente:

- Reflexividad: $q \equiv q$.
- Simetria: si $q \equiv q'$ entonces $q' \equiv q$.
- Transitividad: si $q \equiv q'$ y $q' \equiv q''$ entonces $q \equiv q''$.

$\equiv$ es un relación de equivalencia

Minimización de AFD

La relación $\equiv$ entre estados es una relación de equivalencia, es decir cumple lo siguiente:

- Reflexividad: $q \equiv q$.
- Simetria: si $q \equiv q'$ entonces $q' \equiv q$.
- Transitividad: si $q \equiv q'$ y $q' \equiv q''$ entonces $q \equiv q''$.

$\equiv$ es un relación de equivalencia

Minimización de AFD

La relación $\equiv$ entre estados es una relación de equivalencia, es decir cumple lo siguiente:

- Reflexividad: $q \equiv q$.
- Simetria: si $q \equiv q'$ entonces $q' \equiv q$.
- Transitividad: si $q \equiv q'$ y $q' \equiv q''$ entonces $q \equiv q''$.

Adicionalmente la función de transición δ es compatible con $\equiv$, en el siguiente sentido:

$$\text{Si } q \equiv q' \text{ entonces } \forall a \in \Sigma \ \big(\delta(q, a) \equiv \delta(q', a)\big)$$

Partición del conjunto de estados

Minimización de AFD

La relación de equivalencia $\equiv$ genera una partición del conjunto de estados dada por las clases de equivalencia de cada estado definidas como:

$$[q] := \{p \in Q \mid q \equiv p\}$$

Partición del conjunto de estados

Minimización de AFD

La relación de equivalencia $\equiv$ genera una partición del conjunto de estados dada por las clases de equivalencia de cada estado definidas como:

$$[q] := \{p \in Q \mid q \equiv p\}$$

Es decir, los conjuntos $[q]$ cumplen lo siguiente:

- $\forall q \in Q\ ([q] \neq \varnothing\ ).$

Partición del conjunto de estados

Minimización de AFD

La relación de equivalencia $\equiv$ genera una partición del conjunto de estados dada por las clases de equivalencia de cada estado definidas como:

$$[q] := \{p \in Q \mid q \equiv p\}$$

Es decir, los conjuntos $[q]$ cumplen lo siguiente:

- $\forall q \in Q\,([q] \neq \varnothing\,)$.
- $\forall p, q \in Q\,([q] = [p]$ ó $[q] \cap [p] = \varnothing)$.

Partición del conjunto de estados

Minimización de AFD

La relación de equivalencia $\equiv$ genera una partición del conjunto de estados dada por las clases de equivalencia de cada estado definidas como:

$$[q] := \{p \in Q \mid q \equiv p\}$$

Es decir, los conjuntos $[q]$ cumplen lo siguiente:

- $\forall q \in Q\ ([q] \neq \varnothing)$.
- $\forall p, q \in Q\ ([q] = [p]$ ó $[q] \cap [p] = \varnothing)$.
- $\bigcup_{q \in Q}[q] = Q$.

El autómata cociente

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ existe un autómata M^{min}, equivalente a M y que tiene un número mínimo de estados. Este autómata se define como $M^{min} = \langle Q_m, \Sigma, \delta_m, [q_0], F_m\rangle$ donde:

- $Q_m := Q/\equiv := \{[q] \mid q \in Q^M\}$

El autómata cociente

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ existe un autómata M^{min}, equivalente a M y que tiene un número mínimo de estados. Este autómata se define como $M^{min} = \langle Q_m, \Sigma, \delta_m, [q_0], F_m\rangle$ donde:

- $Q_m := Q/\equiv := \{[q] \mid q \in Q^M\}$
- $[q_0]$ es el estado inicial.

El autómata cociente

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ existe un autómata M^{min}, equivalente a M y que tiene un número mínimo de estados. Este autómata se define como $M^{min} = \langle Q_m, \Sigma, \delta_m, [q_0], F_m\rangle$ donde:

- $Q_m := Q/\equiv := \{[q] \mid q \in Q^M\}$
- $[q_0]$ es el estado inicial.
- $F_m := \{[q] \mid q \in F\}$

El autómata cociente

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ existe un autómata M^{min}, equivalente a M y que tiene un número mínimo de estados. Este autómata se define como $M^{min} = \langle Q_m, \Sigma, \delta_m, [q_0], F_m\rangle$ donde:

- $Q_m := Q/\equiv := \{[q] \mid q \in Q^M\}$
- $[q_0]$ es el estado inicial.
- $F_m := \{[q] \mid q \in F\}$
- $\delta_m : Q \times \Sigma \to Q$ se define como

$$\delta_m([q], a) = [\delta(q, a)]$$

El autómata cociente

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ existe un autómata M^{min}, equivalente a M y que tiene un número mínimo de estados. Este autómata se define como $M^{min} = \langle Q_m, \Sigma, \delta_m, [q_0], F_m\rangle$ donde:

- $Q_m := Q/\equiv := \{[q] \mid q \in Q^M\}$
- $[q_0]$ es el estado inicial.
- $F_m := \{[q] \mid q \in F\}$
- $\delta_m : Q \times \Sigma \to Q$ se define como

$$\delta_m([q], a) = [\delta(q, a)]$$

El autómata cociente

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ existe un autómata M^{min}, equivalente a M y que tiene un número mínimo de estados. Este autómata se define como $M^{min} = \langle Q_m, \Sigma, \delta_m, [q_0], F_m\rangle$ donde:

- $Q_m := Q/\equiv := \{[q] \mid q \in Q^M\}$
- $[q_0]$ es el estado inicial.
- $F_m := \{[q] \mid q \in F\}$
- $\delta_m : Q \times \Sigma \to Q$ se define como

$$\delta_m([q], a) = [\delta(q, a)]$$

M^{min} se conoce también como el autómata cociente de M denotado también con $M/\equiv$.

Minimalidad de M^{min}

- Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ el autómata cociente $M/\equiv$ es el autómata mínimo equivalente a M. Es decir, se tiene $L(M) = L(M/\equiv)$ y no existe un autómata equivalente a M con menos estados que $M/\equiv$.

Minimalidad de M^{min}

- Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ el autómata cociente $M/\!\equiv$ es el autómata mínimo equivalente a M. Es decir, se tiene $L(M) = L(M/\!\equiv)$ y no existe un autómata equivalente a M con menos estados que $M/\!\equiv$.
- La equivalencia entre M y M^{min} se sigue de la siguiente propiedad:

Minimalidad de M^{min}

- Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ el autómata cociente $M/\equiv$ es el autómata mínimo equivalente a M. Es decir, se tiene $L(M) = L(M/\equiv)$ y no existe un autómata equivalente a M con menos estados que $M/\equiv$.
- La equivalencia entre M y M^{min} se sigue de la siguiente propiedad:

  Sean $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ un AFD y M^{min} su autómata cociente. Para cualesquiera $q \in Q, \ w \in \Sigma^\star$ se cumple

$$\delta_m^\star([q], w) = [\delta^\star(q, w)]$$

Minimalidad de M^{min}

- Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ el autómata cociente $M/\equiv$ es el autómata mínimo equivalente a M. Es decir, se tiene $L(M) = L(M/\equiv)$ y no existe un autómata equivalente a M con menos estados que $M/\equiv$.
- La equivalencia entre M y M^{min} se sigue de la siguiente propiedad:

  Sean $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ un AFD y M^{min} su autómata cociente. Para cualesquiera $q \in Q,\ w \in \Sigma^\star$ se cumple

$$\delta_m^\star([q], w) = [\delta^\star(q, w)]$$

  La prueba es por inducción sobre w.

k-equivalencia

Minimización de AFD

- Definimos la relación de k-equivalencia para cualquier $k \in \mathbb{N}$ como sigue:

$$\forall w \in \Sigma^{\star}, |w| \leq k \; (\delta^{\star}(q, w) \in F \Leftrightarrow \delta^{\star}(q', w) \in F)$$

k-equivalencia

Minimización de AFD

- Definimos la relación de k-equivalencia para cualquier $k \in \mathbb{N}$ como sigue:

$$\forall w \in \Sigma^{\star}, |w| \leq k \; (\delta^{\star}(q, w) \in F \Leftrightarrow \delta^{\star}(q', w) \in F)$$

- Es decir, para cualquier cadena w de longitud menor o igual que k, los estados $\delta^{\star}(q, w), \delta^{\star}(q', w)$ son ambos finales o ambos no finales.

k-equivalencia

Minimización de AFD

- Definimos la relación de k-equivalencia para cualquier $k \in \mathbb{N}$ como sigue:

$$\forall w \in \Sigma^\star, |w| \leq k \; (\delta^\star(q, w) \in F \Leftrightarrow \delta^\star(q', w) \in F)$$

- Es decir, para cualquier cadena w de longitud menor o igual que k, los estados $\delta^\star(q, w), \delta^\star(q', w)$ son ambos finales o ambos no finales.

- $\equiv_k$ es una relación de equivalencia cuyas clases se denotan con $[q]_k$, es decir $[q]_k = \{p \in Q \mid q \equiv_k p\}$

Propiedades

k-equivalencia

La relación de k-equivalencia cumple las siguientes propiedades:

P1 $q \equiv q'$ si y sólo si $\forall k \in \mathbb{N}(q \equiv_k q')$.

Propiedades

k-equivalencia

La relación de k-equivalencia cumple las siguientes propiedades:

P1 $q \equiv q'$ si y sólo si $\forall k \in \mathbb{N}(q \equiv_k q')$.

P2 $q \equiv_0 q'$ si y sólo si $q, q' \in F$ ó $q, q' \in Q - F$

Propiedades
k-equivalencia

La relación de k-equivalencia cumple las siguientes propiedades:

P1 $q \equiv q'$ si y sólo si $\forall k \in \mathbb{N}(q \equiv_k q')$.

P2 $q \equiv_0 q'$ si y sólo si $q, q' \in F$ ó $q, q' \in Q - F$

P3 $[q]_0 = F$ si y sólo si $q \in F$.

Propiedades

k-equivalencia

La relación de k-equivalencia cumple las siguientes propiedades:

- P1 $q \equiv q'$ si y sólo si $\forall k \in \mathbb{N}(q \equiv_k q')$.
- P2 $q \equiv_0 q'$ si y sólo si $q, q' \in F$ ó $q, q' \in Q - F$
- P3 $[q]_0 = F$ si y sólo si $q \in F$.
- P4 Si $q \equiv_k q'$ entonces $q \equiv_{k-1} q'$

Propiedades

k-equivalencia

La relación de k-equivalencia cumple las siguientes propiedades:

- P1 $q \equiv q'$ si y sólo si $\forall k \in \mathbb{N}(q \equiv_k q')$.
- P2 $q \equiv_0 q'$ si y sólo si $q, q' \in F$ ó $q, q' \in Q - F$
- P3 $[q]_0 = F$ si y sólo si $q \in F$.
- P4 Si $q \equiv_k q'$ entonces $q \equiv_{k-1} q'$
- P5 $[q]_k \subseteq [q]_{k-1}$

Propiedades

k-equivalencia

P6 Si $q \equiv_k q'$ entonces $\forall a \in \Sigma(\delta(q,a) \equiv_{k-1} \delta(q',a))$

Propiedades

k-equivalencia

P6 Si $q \equiv_k q'$ entonces $\forall a \in \Sigma(\delta(q,a) \equiv_{k-1} \delta(q',a))$

P7 $q \equiv_k q'$ si y sólo si $q \equiv_{k-1} q'$ y $\forall a \in \Sigma(\delta(q,a) \equiv_{k-1} \delta(q',a))$

Propiedades

k-equivalencia

P6 Si $q \equiv_k q'$ entonces $\forall a \in \Sigma(\delta(q, a) \equiv_{k-1} \delta(q', a))$

P7 $q \equiv_k q'$ si y sólo si $q \equiv_{k-1} q'$ y $\forall a \in \Sigma(\delta(q, a) \equiv_{k-1} \delta(q', a))$

P8 Sea $P_k = \{[q]_k \mid q \in Q\}$ la partición dada por la relación $\equiv_k$ para cualquier $k \in \mathbb{N}$.
Si $P_k = P_{k-1}$ para alguna k entonces $P_k = P_m$ para toda $m \geq k$.

Construcción del autómata mínimo

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q -$ estados inaccesibles desde q_0.

Construcción del autómata mínimo
Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q-$ estados inaccesibles desde q_0.
- $k := 0$ Construir la partición $P_0 = \{F, Q - F\}$.

Construcción del autómata mínimo

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q-$ estados inaccesibles desde q_0.
- $k := 0$ Construir la partición $P_0 = \{F, Q - F\}$.

  Repetir

Construcción del autómata mínimo

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q-$ estados inaccesibles desde q_0.
- $k := 0$ Construir la partición $P_0 = \{F, Q - F\}$.

  Repetir

  - $k := k + 1$

Construcción del autómata mínimo

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q-$ estados inaccesibles desde q_0.
- $k := 0$ Construir la partición $P_0 = \{F, Q - F\}$.

  Repetir

  - $k := k + 1$
  - Construir P_k a partir de P_{k-1} manteniendo a dos estados q, q' en la misma clase si y sólo si para toda $a \in \Sigma$, los estados $\delta(q, a)$ y $\delta(q', a)$ estaban en la misma clase en P_{k-1}.

Construcción del autómata mínimo

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F\rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q-$ estados inaccesibles desde q_0.
- $k := 0$ Construir la partición $P_0 = \{F, Q - F\}$.

  Repetir
  - $k := k + 1$
  - Construir P_k a partir de P_{k-1} manteniendo a dos estados q, q' en la misma clase si y sólo si para toda $a \in \Sigma$, los estados $\delta(q, a)$ y $\delta(q', a)$ estaban en la misma clase en P_{k-1}.

  hasta que $P_k = P_{k-1}$.

Construcción del autómata mínimo

Minimización de AFD

Dado un AFD $M = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ el AFD mínimo asociado puede construirse como sigue:

- $Q := Q-$ estados inaccesibles desde q_0.
- $k := 0$ Construir la partición $P_0 = \{F, Q - F\}$.

  Repetir
  - $k := k + 1$
  - Construir P_k a partir de P_{k-1} manteniendo a dos estados q, q' en la misma clase si y sólo si para toda $a \in \Sigma$, los estados $\delta(q, a)$ y $\delta(q', a)$ estaban en la misma clase en P_{k-1}.

  hasta que $P_k = P_{k-1}$.
- En tal caso P_k es la partición generada por $\equiv$, $P_k = Q/\equiv = \{[q] \mid q \in Q\}$.

Correctud del algoritmo de minimización

- La correctud del algoritmo anterior es consecuencia de la siguiente propiedad:

Correctud del algoritmo de minimización

- La correctud del algoritmo anterior es consecuencia de la siguiente propiedad:

  Si M es un AFD entonces la sucesión de particiones $P_0, P_1, \ldots, P_k, \ldots$ generadas por las clases de k-equivalencia de estados se estaciona,

Correctud del algoritmo de minimización

- La correctud del algoritmo anterior es consecuencia de la siguiente propiedad:

  Si M es un AFD entonces la sucesión de particiones $P_0, P_1, \ldots, P_k, \ldots$ generadas por las clases de k-equivalencia de estados se estaciona,

  es decir, existe un $n \in \mathbb{N}$ tal que $\forall k \geq n,\ P_k = P_n$.

Correctud del algoritmo de minimización

- La correctud del algoritmo anterior es consecuencia de la siguiente propiedad:

  Si M es un AFD entonces la sucesión de particiones $P_0, P_1, \ldots, P_k, \ldots$ generadas por las clases de k-equivalencia de estados se estaciona,

  es decir, existe un $n \in \mathbb{N}$ tal que $\forall k \geq n,\ P_k = P_n$.

  Más aún $n \leq |Q|$, es decir, n es a lo más el número de estados de M.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.

Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.

Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.
- LM es regular.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.

Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.
- LM es regular.
- $L^{\star}$ es regular.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.
Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.
- LM es regular.
- $L^\star$ es regular.
- L^+ es regular.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.
Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.
- LM es regular.
- $L^\star$ es regular.
- L^+ es regular.
- $\overline{L}$ es regular

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.

Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.
- LM es regular.
- $L^{\star}$ es regular.
- L^{+} es regular.
- $\overline{L}$ es regular
- $L \cap M$ es regular.

Propiedades de cerradura

Lenguajes regulares

Las propiedades de cerradura nos permiten construir nuevos lenguajes regulares a partir de lenguajes ya conocidos por medio de algunas operaciones entre lenguajes.
Si L, M son lenguajes regulares entonces:

- $L \cup M$ es regular.
- LM es regular.
- $L^{\star}$ es regular.
- L^{+} es regular.
- $\overline{L}$ es regular
- $L \cap M$ es regular.
- $L - M$ es regular.

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

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.

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

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.

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

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.
- Por propiedades de cerradura $a^\star b^\star - L$ también es regular.

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

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.
- Por propiedades de cerradura $a^\star b^\star - L$ también es regular.
- Pero $a^\star b^\star - L = \{a^i b^i \mid i \in \mathbb{N}\}$ que no es regular.

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

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.
- Por propiedades de cerradura $a^\star b^\star - L$ también es regular.
- Pero $a^\star b^\star - L = \{a^i b^i \mid i \in \mathbb{N}\}$ que no es regular.
- Por lo tanto L no puede ser regular.

$L = \{wb^n \mid |w| = n, n \geq 1\}$

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.

$L = \{wb^n \mid |w| = n, n \geq 1\}$

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.

$L = \{wb^n \mid |w| = n, n \geq 1\}$

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.
- Por propiedades de cerradura $L \cap a^\star b^\star$ también es regular.

$L = \{wb^n \mid |w| = n, n \geq 1\}$

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.
- Por propiedades de cerradura $L \cap a^\star b^\star$ también es regular.
- Pero $L \cap a^\star b^\star = \{a^i b^i \mid i \in \mathbb{N}\}$ que no es regular.

$L = \{wb^n \mid |w| = n, n \geq 1\}$

Lenguajes no-regulares

- Supongamos que L es regular.
- $a^\star b^\star$ claramente es regular.
- Por propiedades de cerradura $L \cap a^\star b^\star$ también es regular.
- Pero $L \cap a^\star b^\star = \{a^i b^i \mid i \in \mathbb{N}\}$ que no es regular.
- Por lo tanto L no puede ser regular.