

Automazione

13 Febbraio 2017

Esercizio 1



Figura 1: Una casello autostradale con sistema *TELEPASS* (foto e schema).

La Figura 1 mostra la porta di un casello autostradale dotata di sistema *TELEPASS* di pedaggio, il cui funzionamento di massima è il seguente. Un impianto ottico (CTV) rileva un veicolo in arrivo sulla corsia dedicata (in una zona 1) e attiva la trasmissione di un segnale a microonde (a 5.8 GHz) da un'antenna posta sul casello. Se il veicolo è dotato a bordo del relativo transponder RFID, tale dispositivo risponde con un *beep* (ritrasmettendo un codice identificativo univoco). Ricevuto il codice, la centralina a terra comanda l'apertura della sbarra di uscita e invia un secondo segnale al veicolo (che si trova nel frattempo in zona 2). A transito avvenuto, il transponder risponde con un secondo *beep* di conferma. La sbarra si chiude quindi dietro al veicolo, a meno che il CTV non rilevi un nuovo veicolo già in arrivo in zona 1. Tutta la transazione avviene in pochi decimi di secondo, con il semaforo di ingresso sempre sul verde e i veicoli che transitano a velocità moderata. In caso di mancato dialogo, ad esempio se il veicolo non ha il dispositivo a bordo, il semaforo diventa rosso e la sbarra rimane chiusa. Una speciale fotocamera rileva la targa per identificare il veicolo e la sbarra si apre.

Modellare questo sistema ad eventi discreti mediante un automa, indicando gli eventi in ingresso e i segnali di uscita attivi nei vari stati, *senza* far riferimento a intervalli di tempo.

Esercizio 2

Una società concorrente a quella dell'Esercizio 1 deve gestire il sistema di controllo di una porta per il pagamento automatizzato del pedaggio di una strada. Il sistema utilizza dispositivi analoghi al caso precedente:

- On Board Unit (OBU): dispositivo dotato di batteria collocato all'interno dei veicoli abilitati al pagamento automatizzato in grado di trasmettere, quando eccitato, il codice di identificazione dell'utente e in grado di emettere un *beep* per comunicare con il conducente.

- Semaforo di ingresso (SEM): dispositivo per la regolazione dell'ingresso dei veicoli nell'area di pagamento.
- Telecamera di identificazione (TI): dispositivo ottico per rilevare il transito di un veicolo e il suo tipo.
- Telecamera di uscita (TO): dispositivo per il rilevamento della targa di un veicolo che transita in uscita.
- Sbarra (SB): dispositivo azionante una sbarra che può essere abbassata o alzata, rispettivamente per impedire o dare l'assenso al passaggio di un veicolo.
- Antenna (AN): dispositivo utile ad attivare l'OBUs, a ricevere il codice di identificazione e a trasmettere l'esito del pagamento.
- Road Side Unit (RSU): dispositivo connesso in rete in grado di stabilire, dato un codice di identificazione e un tipo di veicolo, se il pagamento è andato a buon fine.

La Tabella 1 riassume le caratteristiche dei vari dispositivi.

Dispositivo	Identificativo	Tipo	Descrizione
OBUs	OBUs_S_1	Sensore	= 0 se non rileva il segnale di attivazione = 1 quando rileva il segnale di attivazione = 2 quando rileva il segnale di pagamento andato a buon fine = 3 quando rileva il segnale di pagamento non andato a buon fine
OBUs	OBUs_A_1	Attuatore	= 0 non emette il codice di identificazione = 1 emette il codice di identificazione
OBUs	OBUs_A_2	Attuatore	= 0 non emette segnale acustico = 1 emette segnale acustico
TI	TI_S_1	Sensore	= 0 se non rileva alcun veicolo = 1 se rileva un veicolo di tipo n (con n compreso tra 1 e 5)
AN	AN_S_1	Sensore	= 0 se non rileva nessun codice di identificazione = 1 se rileva un codice di identificazione
AN	AN_A_1	Attuatore	= 0 per non trasmettere alcuna informazione = 1 per trasmettere un segnale di attivazione = 2 per trasmettere un segnale di pagamento andato a buon fine = 3 per trasmettere un segnale di pagamento non andato a buon fine
RSU	RSU_S_1	Sensore	= 0 se nessun dato sul pagamento è stato comunicato = 1 se il pagamento è andato a buon fine = 2 se il pagamento non è andato a buon fine
SB	SB_A_1	Attuatore	= 0 se la sbarra deve essere abbassata = 1 se la sbarra deve essere alzata
SEM	SEM_A_1	Attuatore	= 0 semaforo verde = 1 semaforo rosso
TO	TO_S_1	Sensore	= 0 nessun veicolo individuato = 1 veicolo individuato

Tabella 1: Tipo e descrizione dei dispositivi del sistema di controllo.

Il sistema deve operare in modo analogo al precedente, ma con alcune differenze di funzionamento. All'inizio la sbarra è abbassata, il semaforo è verde e l'OBUs è in ascolto del segnale di attivazione. Quando un veicolo viene identificato da TI, il semaforo diventa rosso e l'antenna AN manda un segnale di attivazione all'OBUs per 10 millisecondi (ms). Quando una OBUs rileva il segnale di attivazione, emette in parallelo sia il codice di identificazione (per 50 ms) sia un segnale acustico (per 100 ms), per poi rimettersi in ascolto. L'antenna AN si mette quindi in ascolto di un codice di identificazione fino a 100 ms. Sia quando il codice di identificazione è rilevato sia quando non

lo è, la sbarra viene alzata per permettere al veicolo di uscire e non creare code. Se il codice di identificazione è rilevato, il sistema attende, almeno per 200 ms e fino ad un massimo di 500 ms, che la RSU indichi l'esito del pagamento. Tale esito permane per almeno 200 ms o fino alla successiva richiesta. Se passano più di 500 ms, il pagamento viene considerato non andato a buon fine. In base all'esito del pagamento, il relativo segnale viene inviato dall'antenna alla OBU per 10 ms. In base al segnale ricevuto, la OBU emette un segnale acustico differente: un segnale di 100 ms in caso di avvenuto pagamento, due segnali di 100 ms, separati da una pausa di 50 ms, in caso il pagamento non sia andato a buon fine. La OBU si rimette quindi in ascolto. Il semaforo diventa verde e la sbarra viene abbassata solo quando il veicolo in uscita è rilevato dalla telecamera TO, ad indicare che la porta è pronta per il pedaggio di un nuovo veicolo.

Tracciare i diagrammi SFC della OBU e del sistema di terra (composto da TI, SB, AN e RSU) che rispondano al funzionamento descritto.

Si ipotizzi che gli automobilisti rispettino il segnale semaforico e non passino col rosso. Si trascurino i tempi di abbassamento e alzamento della sbarra (ritenerli istantanei).

Esercizio 3

Un processo è descritto dalla rete di Petri in Fig. 2, con marcatura iniziale $\mathbf{x}_0 = (2 \ 1 \ 0 \ 0)^T$.

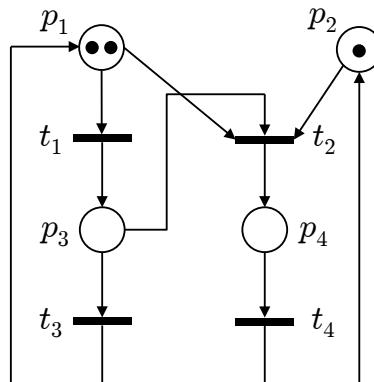


Figura 2: Una rete di Petri con marcatura iniziale \mathbf{x}_0 .

- Calcolare i P-invarianti e i T-invarianti della rete e fornire una loro interpretazione.
- Costruire l'albero di raggiungibilità della rete e commentare il risultato.
- Progettare un supervisore con posti monitor tale che la rete controllata non abbia deadlock e sia sempre reversibile.
- Calcolare i P-invarianti per il sistema costituito dal processo e dal supervisore così progettato.

[150 minuti; libri aperti]

Soluzioni

13 Febbraio 2017

Esercizio 1

La soluzione è illustrata mediante delle icone rappresentative dei vari stati nella Fig. 3. Accanto ad ogni stato c'è il sensore che viene utilizzato (ossia attivato/interrogato) in quello stato. L'automa ha sei stati in tutto, ognuno con quattro elementi (zona 1, zona 2, sbarra, semaforo). Gli stati ammissibili dell'automa sono un sottoinsieme delle possibili combinazioni (sarebbero $2^4 = 16$ in tutto) degli stati binari elementari dei diversi componenti caratteristici:

zona 1 = {veicolo presente (P), non (N)}	⇒	stato 1 = {N, N, C, V}
zona 2 = {veicolo presente (P), non (N)}		stato 2 = {P, N, C, V}
sbarra = {aperta (A), chiusa (C)}		stato 3 = {N, P, C, R}
semaforo = {rosso (R), verde (V)}		stato 4 = {N, P, A, V}
		stato 5 = {N, N, A, V}
		stato 6 = {P, N, A, V}.

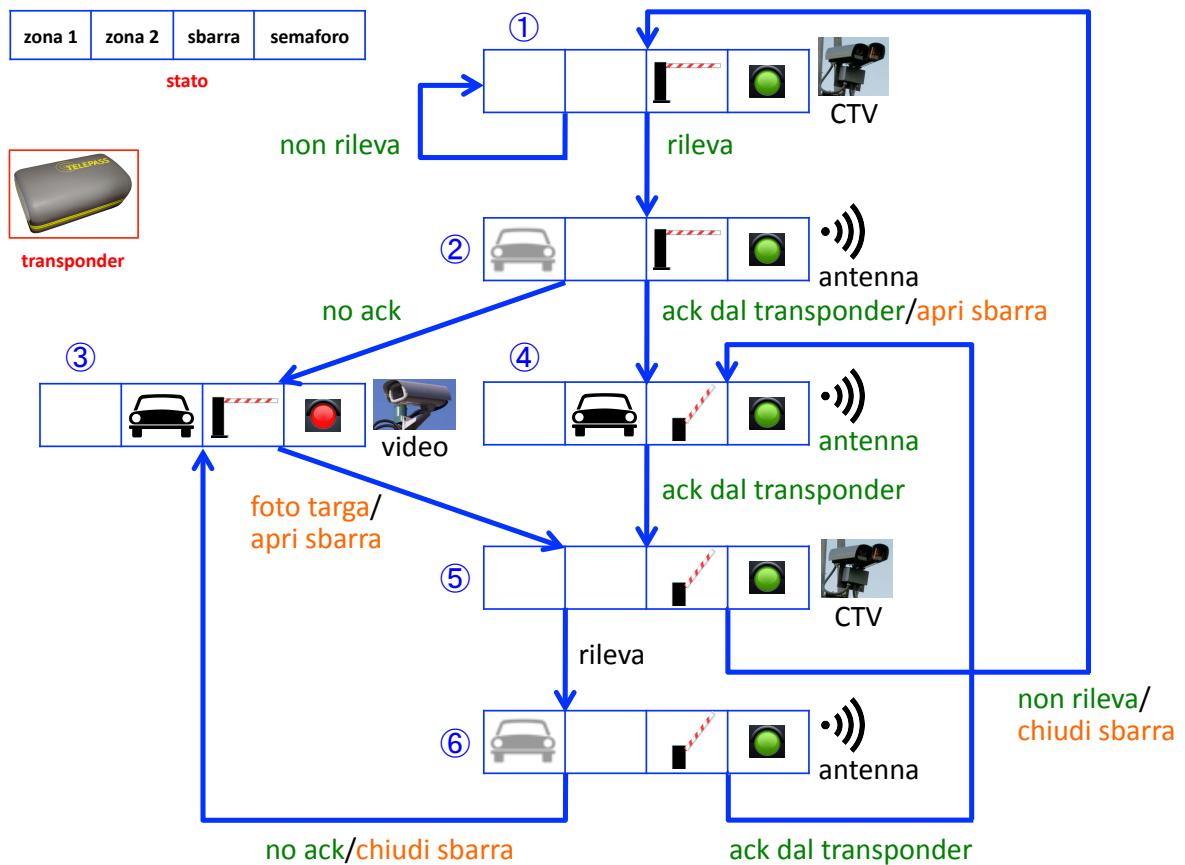
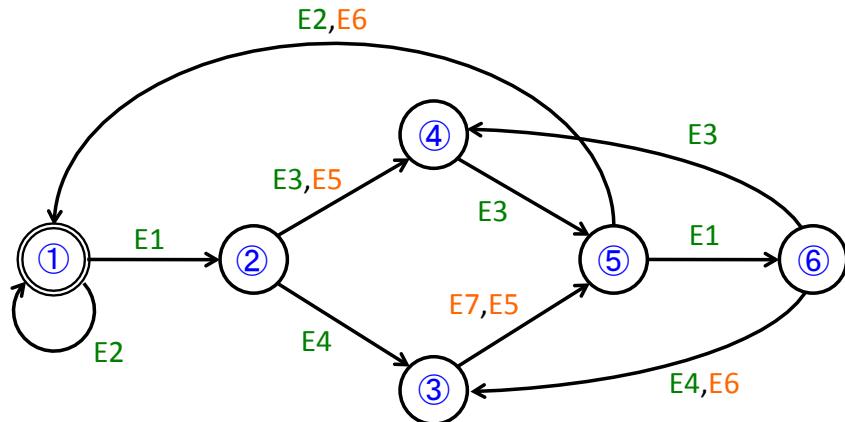


Figura 3: Rappresentazione a icone dell'automa soluzione.

Gli eventi sono di due tipi, legati alle informazioni provenienti dai sensori (in verde sugli archi della Fig. 3) o ai comandi inviati ai dispositivi (in arancione). I quattro eventi sensoriali (E1–E4) e i tre di attuazione (E5–E7) sono elencati nella rappresentazione canonica (di mealy) dell'automa di Fig. 4. Lo stato 1 è quello iniziale dell'automa (è lo stato ‘di riposo’ quando il traffico non è intenso). L’autoanello rappresenta il dispositivo CTV che interroga ciclicamente la zona 1 (a intervalli temporali costanti, ma di durata qui indifferente) per rilevare l’arrivo di un veicolo.



- | | |
|--|---|
| E1 = CTV rileva veicolo (sensore) | E5 = apri sbarra (attuatore) |
| E2 = CTV non rileva veicolo (sensore) | E6 = chiudi sbarra (attuatore) |
| E3 = ack dal transponder (sensore) | E7 = foto alla targa (attuatore) |
| E4 = no ack dal transponder (sensore) | |

Figura 4: Automa soluzione con elenco degli eventi (sensoriali in verde, di attuazione in arancione).

Esercizio 2

Un possibile diagramma SFC della OBU è rappresentato in Fig. 5. All’inizio, la OBU attende una delle tre possibili situazioni mutuamente esclusive:

1. Rilevamento di un segnale di attivazione
2. Rilevamento di un segnale di avvenuto pagamento
3. Rilevamento di un segnale di pagamento non andato a buon fine.

Nel primo caso (stato 2) vengono fatte due azioni in parallelo: emettere il codice di identificazione per 50 ms (stato 3) ed emettere un segnale acustico per 100 ms (stato 5). Gli stati 4 e 6 sono di sincronizzazione, in seguito ad essi l’OBU si rimette in ascolto (stato 1). Nel secondo caso (stato 7) l’OBU emette un segnale acustico per 100 ms e poi si rimette in ascolto (stato 1). Nel terzo caso (stato 8) l’OBU emette due segnali acustici di 100 ms, intervallati da una pausa di 50 ms (stati 9, 10 e 11) e poi si rimette in ascolto (stato 1).

Un possibile diagramma SFC della RSU è rappresentato in Fig. 6. Il sistema di terra attende di identificare un veicolo in ingresso ($TIS_1 > 0$) e quindi attiva il semaforo rosso e invia la richiesta del codice di identificazione (stato 2) per 10 ms. Lo stato 3 non è essenziale, ma rende più leggibile il diagramma. A questo punto c’è una scelta tra due possibilità mutuamente esclusive:

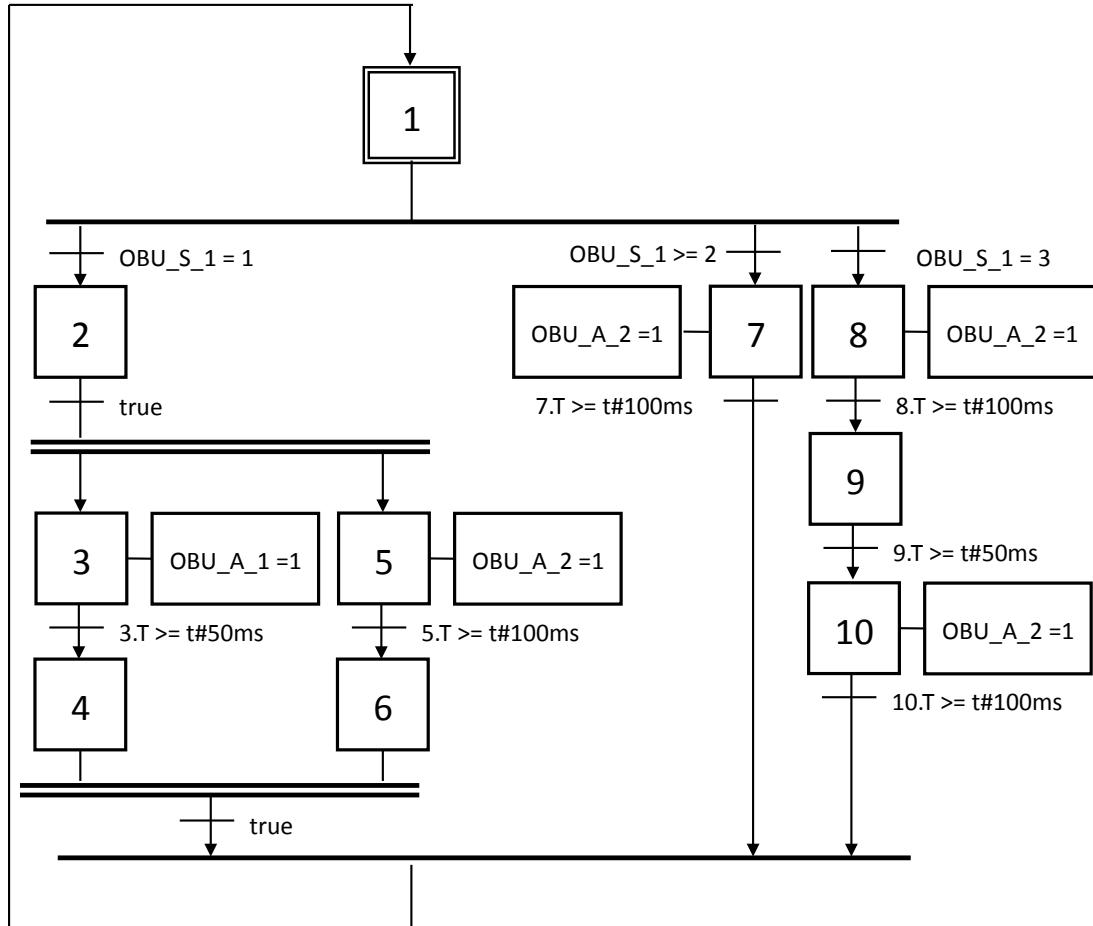


Figura 5: SFC della unità di bordo (OBU).

1. L'OBU invia il codice entro 100 ms
2. L'OBU non invia il codice entro 100 ms.

Nel primo caso (stato 4) la sbarra viene alzata, e si attivano due casi mutuamente esclusivi:

- il primo è che la RSU, dopo 200 ms ma entro 500 ms, confermi un esito positivo di pagamento, inviando quindi alla OBU per 10 ms un segnale di pagamento effettuato con successo (stato 5);
- il secondo è che la RSU, dopo 200 ms ma entro 500 ms, confermi un esito negativo di pagamento, oppure non indichi nulla entro 500 ms, inviando quindi alla OBU per 10 ms un segnale di pagamento fallito (stato 6).

Nel secondo caso (stato 7), la OBU non è stata identificata e la sbarra viene comunque alzata per permettere il transito in uscita del veicolo. Tutti i casi prima descritti confluiscano nello stato 8 nel quale si attende l'uscita del veicolo dall'area di pagamento. Ad uscita avvenuta (stato 9), la sbarra viene abbassata e il semaforo diventa nuovamente verde, così da iniziare nuovamente il ciclo.

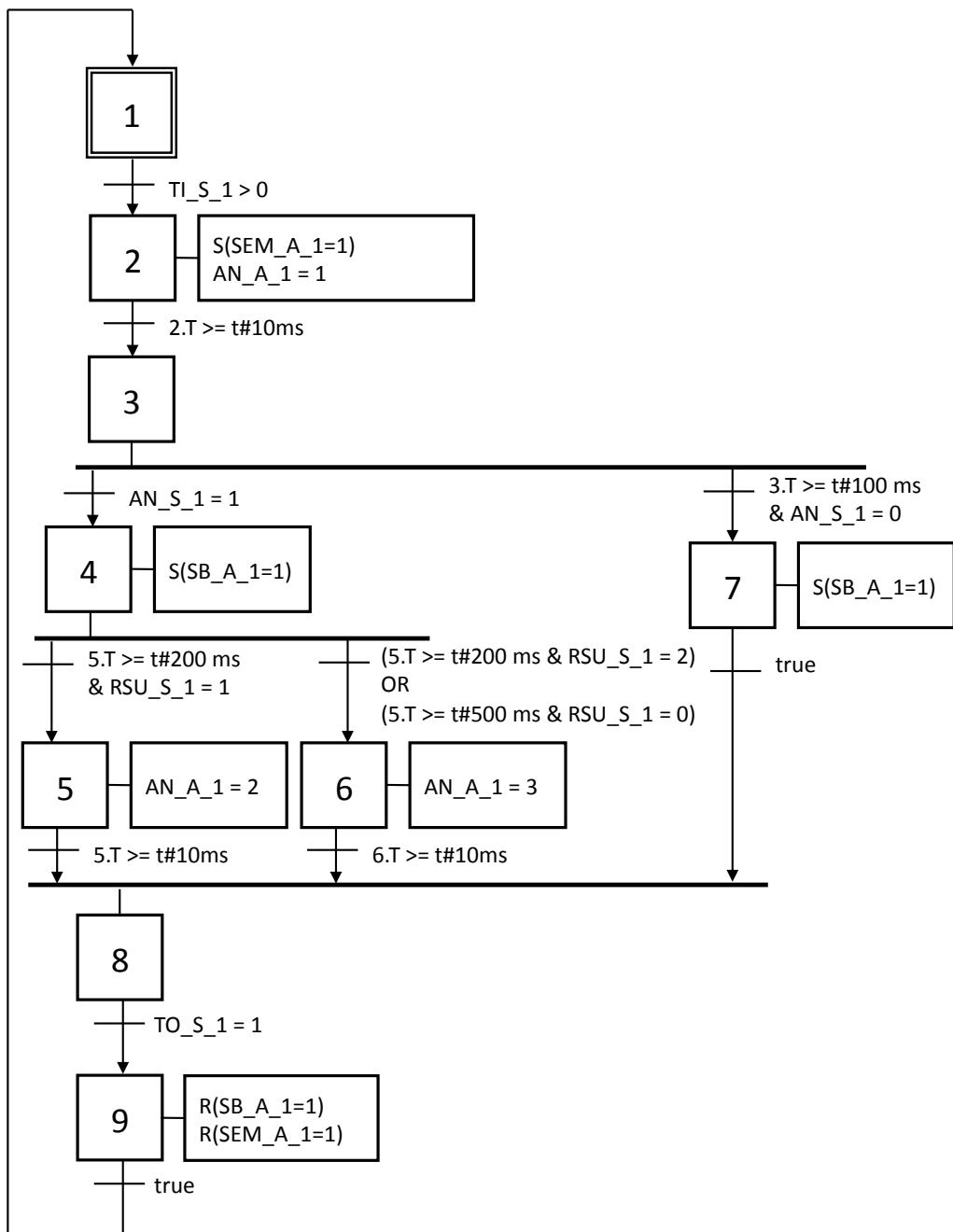


Figura 6: SFC del sistema di terra (RSU).

Esercizio 3

La matrice di incidenza della rete di Petri in Fig. 2 è

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \text{con rango } \mathbf{C} = 3.$$

Il calcolo dei P-invarianti fornisce

$$\boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{C} = \mathbf{0}^T \Rightarrow \begin{cases} \gamma_3 - \gamma_1 = 0 \\ \gamma_4 - \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 = 0 \\ \gamma_1 - \gamma_3 = 0 \\ \gamma_2 - \gamma_4 = 0 \end{cases} \Rightarrow \boldsymbol{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

che rappresenta l'unico P-invariante canonico della rete. L'insieme di supporto di questo invariante è dato dai posti $\{p_2, p_4\}$ che costituiscono un ciclo conservativo nella rete. Essendo l'equazione di invarianza $\boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{x} = x(p_2) + x(p_4) = 1 = \boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{x}_0$, in linea di principio in questo ciclo potrebbe circolare e conservarsi un token. I posti p_2 e p_4 saranno quindi limitati, mentre nulla si può concludere a questo punto su p_1 e p_3 .

Il calcolo dei T-invarianti fornisce

$$\mathbf{C} \boldsymbol{\eta} = \mathbf{0} \Rightarrow \begin{cases} \eta_3 - \eta_1 - \eta_2 = 0 \\ \eta_4 - \eta_2 = 0 \\ \eta_1 - \eta_2 - \eta_3 = 0 \\ \eta_2 - \eta_4 = 0 \end{cases} \Rightarrow \boldsymbol{\eta} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

che rappresenta l'unico T-invariante canonico della rete. Ad esso (e, più in generale, all'invariante $\beta \boldsymbol{\eta}$, con $\beta \in \mathbb{N}$) è associato un vettore di occorrenze con un solo scatto (o con un numero uguale β di scatti) per le transizioni t_1 e t_3 . In particolare, le sequenze di scatto $\{t_1, t_3\}^\beta$ sono ammissibili (le sequenze $\{t_3, t_1\}^\beta$ non lo sono) e riproducono la marcatura iniziale \mathbf{x}_0 . Il soddisfacimento di questa condizione necessaria non può però far concludere sulla reversibilità della rete, perché in tal caso dovrebbe essere possibile tornare alla marcatura iniziale \mathbf{x}_0 a partire da *qualsiasi* marcatura raggiungibile da \mathbf{x}_0 .

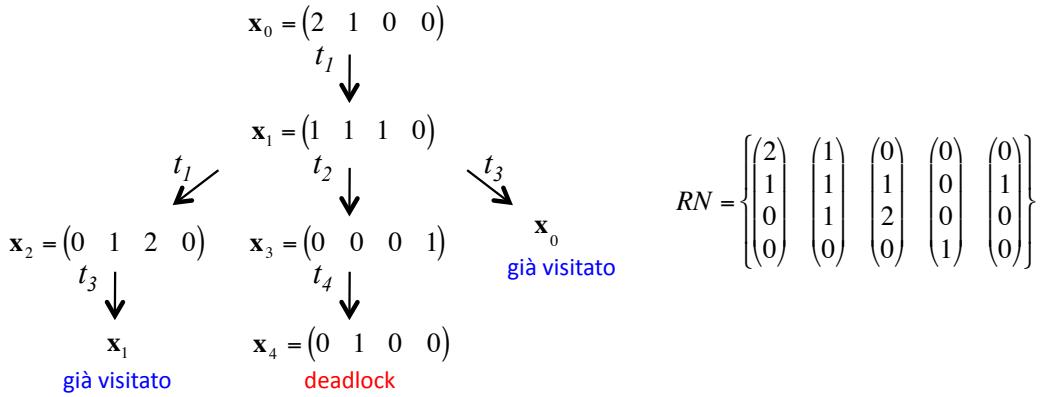


Figura 7: Albero di raggiungibilità e insieme delle marcature raggiungibili della rete in Fig. 2.

Una risposta completa è fornita dall'albero di raggiungibilità della rete mostrato in Fig. 7. La rete va in deadlock a seguito della sequenza $\{t_1, t_2, t_4\}$, ovvero dopo che è scattata una volta la transizione t_2 , mentre può raggiungere di nuovo la marcatura iniziale con le sequenze $\{t_1, t_3\}$, $\{\{t_1\}^2, \{t_3\}^2\}$ e, più in generale, $\{t_1, \{t_1, t_3\}^\beta, t_3\}$. In ogni caso la rete è k -limitata, con $k = 2$, bloccante e non reversibile.

Per evitare la situazione di deadlock, si può procedere alla sintesi di un posto monitor basato sui P-invarianti, ovvero sull'impostazione di uno o più vincoli sulle marcature raggiungibili che dovrà essere soddisfatto dalla marcatura iniziale ed eliminare al contempo quelle indesiderate. Osservando l'insieme di marcature raggiungibili in Fig. 7, si nota che le ultime due (quella di pre-deadlock e quella di deadlock) sono le uniche che *non* soddisfano alla disuguaglianza (con la notazione compatta $x_i = x(p_i)$)

$$x_1 + x_3 \geq 1 \Rightarrow -x_1 - x_3 \leq -1 \Rightarrow \mathbf{h}^T \mathbf{x} = (-1 \ 0 \ -1 \ 0) \leq -1 = k, \quad (1)$$

che impone sufficienti risorse al ciclo $\{t_1, t_3\}$. Si noti che, essendo $\mathbf{h}^T \mathbf{x}_0 = -2$, la marcatura iniziale soddisfa la (1). Si aggiunge allora un posto monitor p_m le cui connessioni con le transizioni esistenti e marcatura iniziale $x_m = x(p_m)$ sono definite dalle

$$\mathbf{C}^m = -\mathbf{h}^T \mathbf{C} = (0 \ 2 \ 0 \ 0), \quad x_m = k - \mathbf{h}^T \mathbf{x}_0 = -1 - (-2) = 1. \quad (2)$$

La rete di Petri con il supervisore (in rosso) è mostrata in Fig. 8. Si noti che la marca nel posto monitor non è sufficiente ad abilitare la transizione t_2 , che non scatterà mai in quanto l'arco in ingresso ha peso 2. La parte di destra della rete risulterà quindi permanentemente disabilitata e le sequenze di scatto (le uniche ammissibili) $\{t_1, t_3\}$, $\{t_1^2, t_3^2\}$ e $\{t_1^2, \{t_3, t_1\}^\beta, t_3^2\}$, con $\beta \in \mathbb{N}$, rendono la rete reversibile. Si noti che la disabilitazione della transizione t_2 si sarebbe ottenuta anche ponendo $k = -2$ in (1), il che avrebbe portato allo stesso monitor di Fig. 8 ma con nessun token nel posto aggiunto ($x_m = 0$).

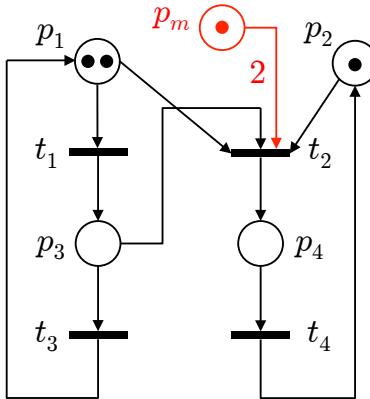


Figura 8: Rete di Petri con posto monitor ottenuto imponendo la disuguaglianza $x(p_1) + x(p_3) \geq 2$.

Un progetto alternativo si basa sull'impedire la comparsa di un token nel posto p_4 , il che implicherebbe un'avvenuta sottrazione di risorse dal ciclo $\{t_1, t_3\}$:

$$x_4 \leq 0 \Rightarrow \mathbf{h}^T \mathbf{x} = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \leq 0 = k. \quad (3)$$

Essendo $\mathbf{h}^T \mathbf{x}_0 = 0$, la marcatura iniziale soddisfa anche la (3). Il posto monitor p_m è definito ora dalle

$$\mathbf{C}^m = -\mathbf{h}^T \mathbf{C} = (0 \ -1 \ 0 \ 1), \quad x_m = k - \mathbf{h}^T \mathbf{x}_0 = 0 - 0 = 0. \quad (4)$$

La rete di Petri con il nuovo supervisore (in rosso) è mostrata in Fig. 9. Di nuovo la transizione t_2 sarà permanentemente disabilitata, e la rete supervisionata priva deadlock e reversibile.

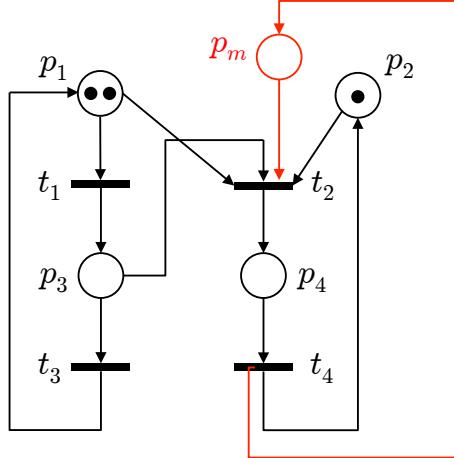


Figura 9: Rete di Petri con posto monitor ottenuto imponendo la disuguaglianza $x(p_4) \leq 0$.

I P-invarianti delle reti supervisionate riportate in Fig. 8 e Fig. 9 si ottengono senza necessità di risolvere nuovamente sistemi di equazioni lineari. Infatti gli invarianti saranno automaticamente tutti quelli vecchi γ_v , estesi con 0 sui nuovi posti monitor, e quelli nuovi γ_n (uno per ogni posto monitor/disuguaglianza considerata), ottenuti per costruzione dal progetto:

$$\gamma_v^T = (\gamma^T \mid 0), \quad \gamma_n^T = (\mathbf{h}^T \mid 1).$$

Queste proprietà seguono dalla struttura della matrice di incidenza del sistema supervisionato:

$$\mathbf{C}^s = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ -\mathbf{h}^T \mathbf{C} \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad \gamma_v^T \mathbf{C}^s = \gamma^T \mathbf{C} = \mathbf{0}, \quad \gamma_n^T \mathbf{C}^s = \mathbf{h}^T \mathbf{C} - \mathbf{h}^T \mathbf{C} = \mathbf{0}.$$

Per il progetto basato sul soddisfacimento della disuguaglianza (1), i P-invarianti della rete supervisionata sono quindi

$$\gamma_v = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \mid 0)^T, \quad \gamma_n = (-1 \ 0 \ -1 \ 0 \mid 1)^T,$$

mentre per il progetto basato sulla disuguaglianza (3) sono

$$\gamma_v = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \mid 0)^T, \quad \gamma_n = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \mid 1)^T.$$
