

Automazione I

13 Febbraio 2015

Esercizio 1

Si consideri un sistema di automazione in cui è necessario gestire il traffico ferroviario di una stazione composta dai seguenti elementi:

Tipo	Ident	Descrizione
<i>S</i>	POS_x	$POS_x = 1$ quando un treno è presente nella sezione x della stazione $POS_x = 0$ altrimenti
<i>A</i>	SCA_y	$SCA_y = 1$ significa che lo scambio y è messo in posizione attiva $SCA_y = 0$ significa che lo scambio y è messo in posizione inattiva
<i>A</i>	SEM_z	$SEM_z = 1$ significa che il semaforo z è verde $SEM_z = 0$ significa che il semaforo z è rosso

dove S = Sensore e A = Attuatore, con $x \in \{0, 1, 2, 3\}$, $y \in \{1, 2\}$ e $z \in \{0, 1, 2\}$.

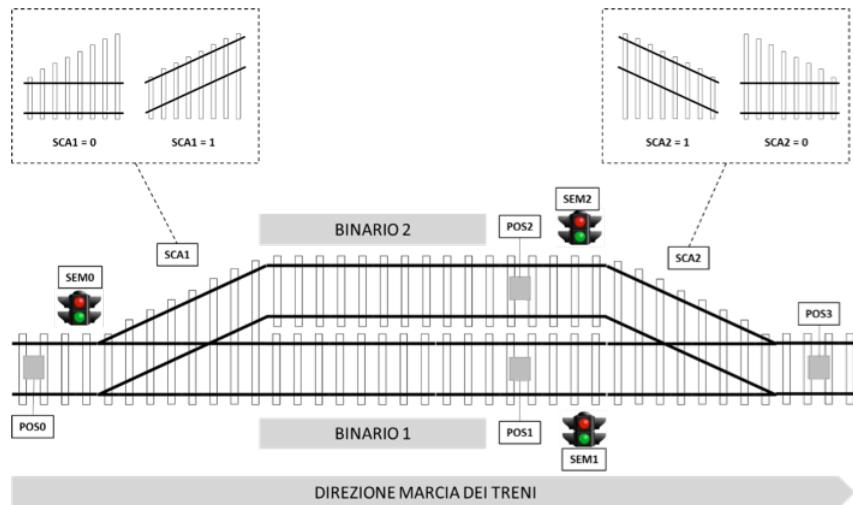


Figura 1: Schema di una stazione ferroviaria

Come mostrato in Fig. 1, i treni viaggiano tutti da sinistra verso destra. L'obiettivo del sistema di controllo è quello di gestire in sicurezza il traffico ferroviario tenendo conto che:

1. Ogni treno rispetta la segnalazione semaforica, rimanendo fermo se il semaforo è rosso, partendo se il semaforo è verde.
2. Ogni treno che arriva in una banchina deve sostare almeno 2 minuti per permettere ai passeggeri di salire o scendere.
3. Sia in ingresso sia in uscita dalla stazione, quando applicabile, si dà precedenza al binario 1.

Si richiede di progettare un diagramma SFC di funzionamento del sistema di controllo che rispetti vincoli e requisiti del problema.

Esercizio 2

Sia dato un processo di reazione termo-chimica nel quale occorre modificare la temperatura di una miscela di gas, portandola da un punto di lavoro ad un altro. Si pensa di realizzare l'algoritmo di controllo mediante un regolatore proporzionale-integrale-derivativo (PID) di tipo digitale, avente passo di campionamento $T_c = 0.05$ s. Si fornisca uno schema a blocchi dell'intero sistema di controllo (processo, sensore, organi di calcolo e conversione, attuatore), indicando la natura fisica e matematica dei vari segnali in gioco.

La Fig. 2 mostra la variazione della temperatura della miscela ottenuta in risposta ad una variazione di 1°C della temperatura di riferimento T_d , quando il processo è controllato dalla sola azione proporzionale (P) all'errore, $u = K_{step}(T_d - T)$, con $K_{step} = 2$. Discutere qualitativamente, e se possibile anche in modo quantitativo, le operazioni di taratura sui guadagni del regolatore PID necessarie per migliorare la risposta complessiva (si trascurino gli effetti del campionamento, poiché il T_c impiegato è molto più piccolo delle costanti di tempo caratteristiche del processo).

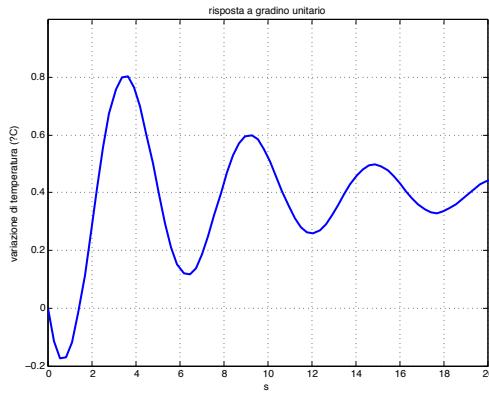


Figura 2: Risposta a una variazione a gradino $\Delta T_d = 1^{\circ}$ del processo controllato con regolatore P

Esercizio 3

Una rete locale di comunicazione tra dispositivi di elaborazione in ambito industriale è configurata ad anello con gestione di accesso al mezzo mediante *token*. Usare il formalismo delle reti di Petri per descrivere il comportamento degli host rispetto al protocollo Token Ring, considerando le varie situazioni che si possono presentare in trasmissione o in ascolto. Ogni host può generare, ad intervalli di tempo casuali, un messaggio da trasmettere. Si proceda in maniera modulare, costruendo una rete di Petri per il singolo host generico e utilizzando, ove necessario, transizioni temporizzate e/o archi inibitori. Per semplicità, si supponga che ogni nodo sia sempre fisicamente connesso all'anello e che non ci siano malfunzionamenti. Si discuta il comportamento della rete complessiva, ottenuta interconnettendo i moduli e inizializzando le sotto-reti di Petri di ciascun host in modo opportuno, mostrando che essa è in grado di evolvere senza deadlock e gestendo la comunicazione secondo il protocollo dato.



Una rete di comunicazione tra workstation, notebook e PC industriali connessi ad anello con protocollo Token Ring

[180 minuti; libri aperti]

Soluzioni

13 Febbraio 2015

Esercizio 1

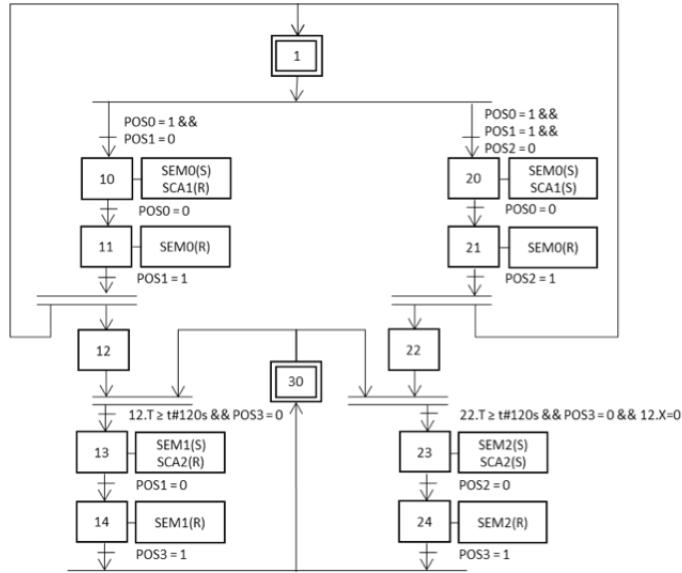


Figura 3: Diagramma SFC del sistema di controllo della stazione ferroviaria in Fig. 1

Il diagramma SFC può essere così interpretato:

- Lo stato 1 è uno stato iniziale di attesa dell'arrivo di un treno alla stazione.
- La divergenza scatta quando è rilevato un treno in ingresso alla stazione ($POS0 = 1$) e quando almeno uno dei due binari è libero, con preferenza per il binario 1. Se nessuno dei due binari è libero, il treno in ingresso alla stazione deve attendere.
- Supponiamo, senza perdita di generalità, che il binario 1 sia libero ($POS1 = 0$); viene quindi attivato il semaforo di ingresso alla stazione con l'azione $SEM0(R)$ e impostato lo scambio di ingresso $SCA1(R)$ sul binario 1.
- Quando il treno lascia la sezione di ingresso alla stazione ($POS0 = 0$), il semaforo di ingresso ridiventa rosso per evitare che un potenziale treno in coda possa entrare nella stazione.
- Quando il treno in ingresso alla stazione occupa il binario 1 ($POS1 = 1$), un parallelismo riattiva lo stato 1, in attesa che arrivi un nuovo treno, e attiva lo stato 12.
- Lo stato 30 segnala se lo scambio di uscita dalla stazione è libero o meno.
- Se lo scambio di uscita è libero e se sono passati almeno 2 minuti dall'arrivo del treno al binario, il treno può ripartire (con preferenza per il treno che si trova al primo binario, data dalla condizione $12.X = 0$), occupando pertanto lo scambio di uscita dalla stazione.
- Nello stato 13 si attiva il semaforo relativo al primo binario, con l'azione $SEM1(S)$ e si imposta lo scambio di uscita sul binario 1, con l'azione $SCA2(R)$. Si permane in tale stato fino a che il treno non lascia libero il binario 1 ($POS1 = 0$).
- Nello stato 14 si pone rosso il semaforo del binario 1, così che un eventuale treno successivo in ingresso al binario 1 effettui la fermata. Quando il treno esce dalla stazione e lascia libero lo scambio di uscita ($POS3 = 1$), tramite la convergenza si riattiva lo stato 30.

Esercizio 2

Lo schema a blocchi del sistema di controllo è mostrato in Fig. 4, con il significato e la natura dei segnali di ingresso e uscita ai vari blocchi. Si è ipotizzato l’impiego di una termocoppia o di una termo-resistenza come sensore di temperatura immerso nella miscela e di uno scambiatore di calore a superficie di contatto come attuatore per imporre una variazione di temperatura alla miscela. A sua volta nello scambiatore i flussi sono regolati da valvole di apertura/chiusura servo-controllate (con una tensione di pilotaggio). Infine un PLC (o un microcontrollore) provvede alla conversione¹ dei segnali da analogici a digitali (A/D) e viceversa (D/A), alla messa in scala, conversione e codifica delle grandezze e al calcolo della legge di controllo.

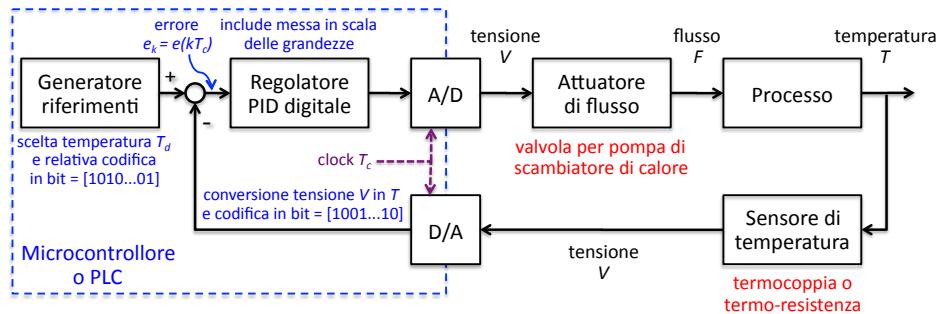


Figura 4: Sistema di regolazione della temperatura in una miscela

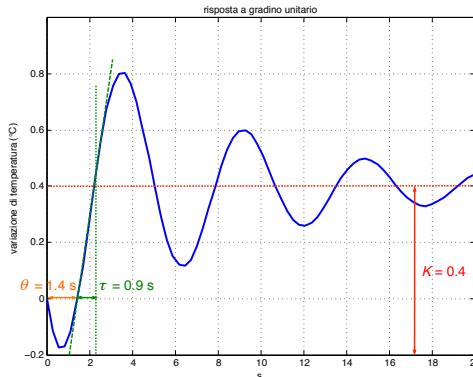


Figura 5: Analisi dei parametri della risposta indiciale del processo controllato con regolatore P

Analizzando la risposta al gradino unitario (la cosiddetta risposta *indiciale*) del processo controllato da un regolatore esclusivamente proporzionale, si possono estrarre informazioni e parametri utili per le regole di taratura dei guadagni di un regolatore PID digitale completo. Queste regole sono basate sull’impiego di tabelle che assumono una certa struttura del modello di comportamento del sistema da controllare. Ad esempio, che il processo sia ben rappresentato da un polo stabile, da un guadagno e da un ritardo finito. In tal caso, questi parametri sono identificabili con sufficiente approssimazione nella risposta indiciale e le prestazioni ottenute applicando le regole di taratura (ad esempio, con le tabelle di Ziegler e Nichols) al regolatore sono più che soddisfacenti. Più il processo si differenzia dalla struttura del modello di comportamento ipotizzato, più le prestazioni ottenute saranno degradate e i valori calcolati per i guadagni sono da considerarsi solo come scelte di massima in prima battuta.

¹Le conversioni A/D e D/A includono anche organi di campionamento e tenuta (S/H = Sample and Hold), di vari tipi (ad esempio, uno ZOH = Zero-Order Hold).

Ciò premesso, un'analisi qualitativa della risposta in Fig. 5 suggerisce che è necessario e conveniente ricorrere ad un regolatore PID completo. Infatti:

- La variazione di temperatura converge al valore $\Delta T_\infty = 0.4^\circ\text{C}$, con un errore a regime del 60%. E' quindi necessaria l'aggiunta di un'azione integrale nel regolatore.
- Il tempo di salita è molto rapido, ma la sovraelongazione (*overshoot*) rispetto al valore di regime raggiunto il 100% (primo picco di $\Delta T = 0.8^\circ\text{C}$), decisamente eccessiva. Occorre limitare il guadagno proporzionale nel regolatore.
- La limitazione di tale guadagno dovrebbe risultare benefica anche per limitare l'incremento del picco negativo iniziale (*undershoot*) della risposta, con la grandezza controllata in uscita che cambia il suo valore temporaneamente in direzione opposta a quella desiderata. Tale comportamento è tipico dei sistemi a fase non minima, legato alla presenza di zeri a parte reale positiva e/o di un ritardo finito (il tempo di ritardo θ iniziale comprende l'intera fase negativa della risposta).
- Anche le oscillazioni nel transitorio sono notevoli, con una riduzione tra picchi positivi successivi della risposta pari solo al 25% (da 0.8 a 0.6, da 0.6 a 0.45, e così via). Sarà utile introdurre anche una moderata azione derivativa per smorzare più rapidamente queste oscillazioni.

Più nel dettaglio, dalla Fig. 5 si ricavano i parametri (cfr. Cap. 4.3.4 del libro di testo)

$$\theta = 1.4 \text{ [s]}, \quad \tau = 0.9 \text{ [s]}, \quad K = 0.4 \quad \Rightarrow \quad \theta' + \theta + \frac{T_c}{2} = 1.425 \text{ [s]},$$

dove si è usato il passo di campionamento $T_c = 0.05 \text{ s}$. Per un regolatore PID digitale della forma

$$u_k = K_P e_k + \frac{K_P T_c}{T_i} \sum_{i=0}^k e_i + \frac{K_P T_d}{T_c} (e_k - e_{k-1}), \quad (1)$$

dove $e_k = e(kT_c) = T_d - T(kT_c) = T_d - T_k$ è il k -esimo campione dell'errore rispetto alla temperatura desiderata T_d costante, con il primo metodo di Ziegler-Nichols (Tab. 4.2 del libro) si ricavano i valori:

$$KK_P = 1.2 \left(\frac{\theta'}{\tau} \right)^{-1} \Rightarrow K_P = 1.895, \\ T_i = 2\tau \left(\frac{\theta'}{\tau} \right) = 2.849 \Rightarrow K_I = \frac{K_P}{T_i} = 0.664, \quad T_d = 0.5\tau \left(\frac{\theta'}{\tau} \right) = 0.712 \Rightarrow K_D = K_P T_d = 1.349.$$

Il risultato ottenuto applicando al processo la suddetta legge di controllo è illustrato in Fig. 6. Si noti che, data la trascurabilità del tempo di campionamento rispetto alle costanti di tempo in gioco, si è simulata la versione a tempo continuo del regolatore PID (ossia con guadagni K_P , K_I e K_D , non considerando T_c e con le operazioni continue di integrazione (al posto della sommatoria) e di derivazione (filtrata in alta frequenza) del segnale di errore.

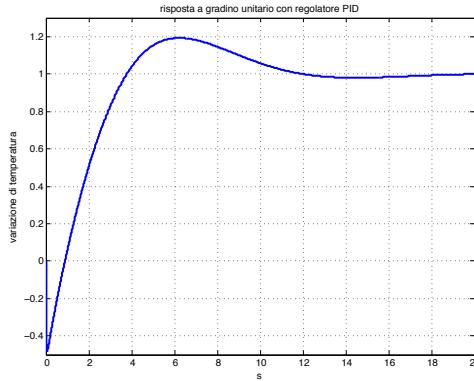


Figura 6: Risposta indiciale del processo controllato con il regolatore PID progettato

Esercizio 3

La Fig. 7 mostra una possibile rete di Petri che descrive il comportamento di un generico host in base al protocollo di comunicazione Token Ring. L'unica temporizzazione presente è sulla transizione t_9 (in verde) che genera messaggi da trasmettere ad altri nodi della rete, ad intervalli di $\tau > 0$ secondi variabili (τ è la realizzazione di una variabile scalare stocastica con distribuzione di valori in un dominio positivo). Sono inoltre presenti due archi inibitori (in rosso), rispettivamente dal posto p_5 alla transizione t_1 e dal posto p_6 alla transizione t_2 . Questi due archi, insieme ai loro complementari di abilitazione delle transizioni t_3 e t_4 , costituiscono delle strutture di *semaforo* sul trattamento del token di abilitazione alla trasmissione e, parallelamente, su quello dei token modificati che sono associati ad un messaggio che circola nell'anello.

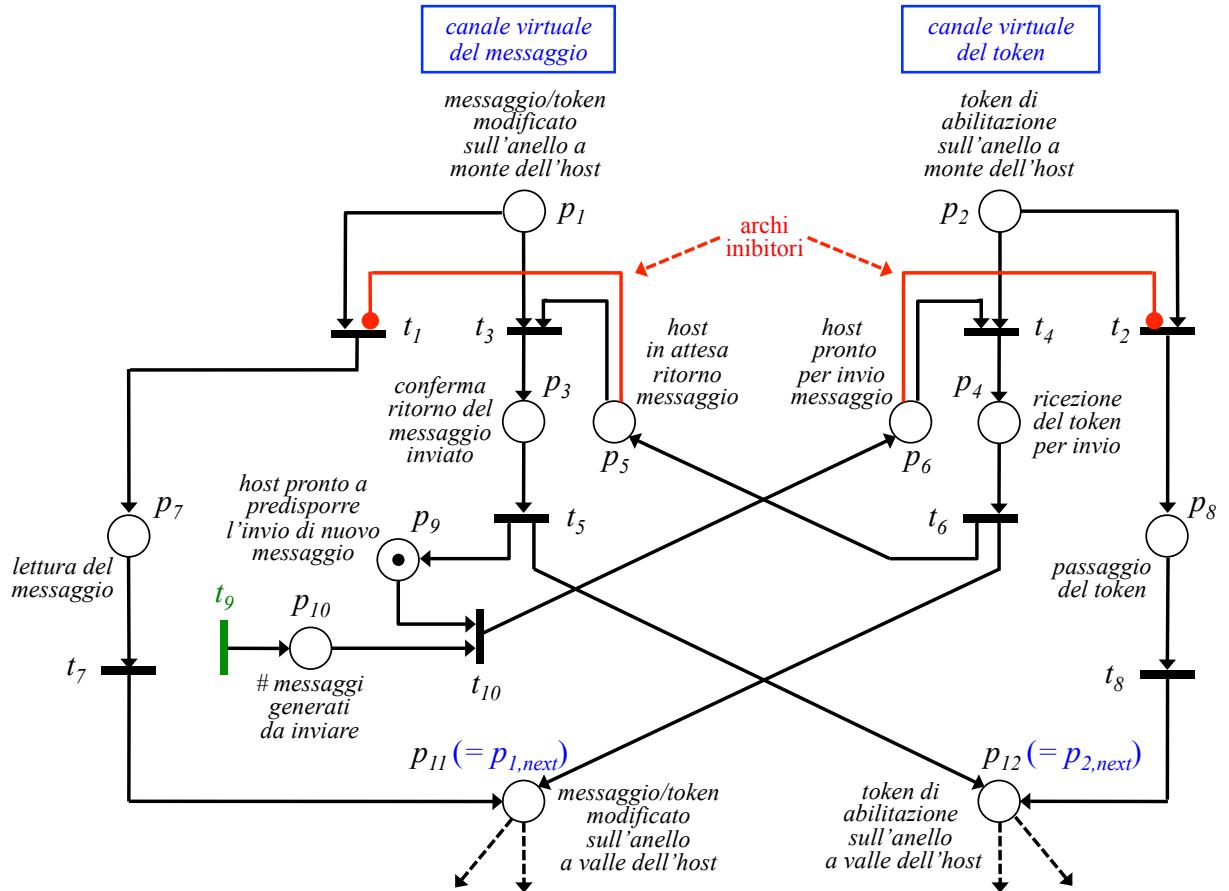


Figura 7: Rete di Petri del singolo host nella rete ad anello con protocollo Token Ring

L'interpretazione dei 12 posti (stati) della rete è riportata nella figura stessa. Le 10 transizioni rappresentano i seguenti eventi:

- t_1 = arrivo di un token modificato, contenente un messaggio che *non* è stato inviato dall'host stesso;
- t_2 = arrivo del token di abilitazione alla trasmissione, quando l'host *non* è ancora pronto all'invio di un messaggio;
- t_3 = arrivo di un token modificato, contenente il messaggio che era stato inviato dall'host (in assenza di malfunzionamenti);

- t_4 = arrivo del token di abilitazione alla trasmissione, quando l'host è pronto ad inviare un messaggio;
- t_5 = rilascio dei token di abilitazione alla trasmissione da parte dell'host, una volta ricevuto il ritorno del messaggio che era stato inviato;
- t_6 = immissione in rete da parte dell'host del token modificato contenente il proprio messaggio abilitato all'invio;
- t_7 = immissione in rete da parte dell'host del token modificato contenente un messaggio generato da un altro host (il messaggio è stato letto interamente se era destinato all'host in questione, oppure ne è stato letto solo l'indirizzo e poi lo si è lasciato proseguire);
- t_8 = immissione in rete da parte dell'host del token di abilitazione alla trasmissione (non utilizzato dall'host in quanto non pronto all'invio di un messaggio);
- t_9 = generazione di un nuovo messaggio (transizione temporizzata con la variabile stocastica $\tau > 0$);
- t_{10} = abilitazione all'invio di un messaggio generato dall'host (nel caso di più messaggi presenti nel posto p_{10} , si utilizza una logica FIFO di abilitazione che qui non viene modellata).

In questo modulo di rete, si possono evidenziare due canali funzionali (virtuali): il primo è dove circola il token di abilitazione alla trasmissione (il canale a destra in figura), fino a quando viene incontrato un host che è pronto a trasmettere; il secondo è dove circola il token modificato, contenente anche il messaggio e il suo destinatario, immesso dall'host che ha prelevato il token di abilitazione (il canale a sinistra). Si noti che, a meno di errate marcature iniziali della rete, solo uno dei due canali è attivo (la presenza del token su uno ne esclude la presenza sull'altro). Il protocollo infatti non prevede collisioni.

Quando il token di abilitazione arriva ad un host che è pronto ad inviare un messaggio, esso viene di fatto “sottratto” al canale di destra dall'host in questione, il quale lo sostituisce immettendo il token modificato posto sul canale di sinistra. L'host si mette quindi in stato di attesa del ritorno del messaggio (marca nel posto p_5), mentre il token modificato visiterà i nodi successivi nell'anello, i quali opereranno tutti necessariamente in ascolto. Tra questi nodi ci sarà anche l'host destinatario del messaggio, che verrà quindi letto. Quando il token modificato ritorna all'host (rimasto in attesa) che l'aveva inviato, la comunicazione termina e il token di abilitazione alla trasmissione viene rimesso in circolo (sul canale di destra).

Il modulo di rete ha una certa ridondanza in termini di numero di posti, che favorisce però la chiarezza interpretativa e fornisce anche una discreta simmetria tra i due canali virtuali (a meno del meccanismo di generazione dei messaggi). Ad esempio, la coppia posto-transizione (p_8, t_8) potrebbe essere eliminata senza pregiudicare il funzionamento corretto della rete di Petri. Viceversa, inserendo tale coppia è possibile ad esempio modellare, temporizzando la transizione, l'inserimento di un ritardo costante (*delay*) in rete, in modo da garantire che il tempo di percorrenza T di un bit sull'intero anello sia superiore al tempo necessario per immettere in rete l'intero messaggio (o un suo frame, se diviso in pacchetti).

La struttura della sotto-rete è chiaramente modulare, e i singoli moduli si interconnettono facilmente in serie fino a chiudere l'anello. Nell'interconnessione, i posti p_{11} e p_{12} in uscita da un modulo (diciamo, dall'host i -esimo nell'anello) coincidono con i posti p_1 e p_2 del successivo host $(i+1)$ -esimo. Si può immaginare un'inizializzazione comune per tutti i moduli, con nessun messaggio ancora generato dalla transizione temporizzata t_9 e una marca nel posto p_9 (host pronto a predisporre all'invio il primo dei messaggi che verranno generati). In uno e uno solo dei moduli, ci sarà anche una marca (il vero e proprio token di abilitazione) nel posto di ingresso p_2 . E' facile convincersi che la rete completa funzionerà correttamente.

E' possibile infine che nei posto p_{10} di un host si accumuli un numero elevato di messaggi generati che non possono essere ancora inviati (l'host ha una marca pronta in p_6 , in attesa che arrivi il token di abilitazione). Poiché però il tempo di percorrenza T di un bit sull'intero anello è molto basso (la rete è una LAN) e per giunta esso è deterministico, una richiesta di invio messaggio da parte di uno degli N host connessi nell'anello verrà servita entro un massimo di NT secondi. Si può quindi dimensionare opportunamente il tasso di generazione dei messaggi in modo da non eccedere la capacità di un eventuale buffer fisico in p_6 .

* * * * *