



**Automazione industriale
dispense del corso (a.a. 2008/2009)
11. Modellizzazione con reti di Petri**

Luigi Piroddi
piroddi@elet.polimi.it

Introduzione

Un sistema di produzione automatizzato serve a ricavare prodotti finiti a partire da pezzi grezzi, seguendo opportune sequenze di lavorazione (tipicamente *una sequenza per ogni tipo di prodotto*).

Esso è costituito da vari tipi di *risorse*:

- ▶ macchine per la lavorazione
- ▶ dispositivi per la movimentazione
- ▶ magazzini per lo stoccaggio

Il processo di produzione consiste nello svolgimento di *attività di lavorazione* che richiedono l'uso di almeno una risorsa.

Le risorse devono essere *acquisite* all'inizio di una attività (qualora non siano state già allocate a questo scopo in precedenza) e *rilasciate* al termine (in modo che possano essere utilizzate da altre attività, se sono *risorse condivise*).

Le attività sono soggette a condizioni per il loro svolgimento (*pre-condizioni*) e determinano una variazione dello stato del sistema (*post-condizioni*).

Inoltre, esse devono essere *sincronizzate* in modo opportuno (sequenza, concorrenza, alternativa).

Sistemi di produzione *flessibili*:

- ▶ possibilità di cambiare tipo di lavorazione
- ▶ possibilità di cambiare prodotti
- ▶ possibilità di cambiare macchine
- ▶ possibilità di cambiare routing (percorso macchine)
- ▶ elevato sfruttamento delle risorse

I modelli di sistemi di produzione flessibili sono focalizzati sulla gestione (allocazione/deallocazione) delle risorse e risulta cruciale l'analisi di deadlock dovuti a condizioni di attesa ciclica di risorse e di prestazioni (p.es. saturazione dell'uso delle risorse).

In generale, oltre ad essere privo di deadlock, un modello corretto di un sistema di produzione dovrà possedere le proprietà fondamentali di vivezza, limitatezza e reversibilità, da accertare con un'opportuna analisi a posteriori o tramite un metodo costruttivo che le garantisca.

Infatti:

- ▶ L'assenza di vivezza implicherebbe che qualche operazione possa essere svolta solo un numero finito di volte, in contrasto con l'esigenza di ripetibilità di un ciclo produttivo. Nel caso poi di una transizione morta, non si vede l'utilità di modellizzare un'operazione che non venisse mai eseguita. Naturalmente anche la presenza di deadlock (marcature morte) è da evitare.
- ▶ La reversibilità è una proprietà necessaria sempre per la ripetibilità della produzione.
- ▶ Infine, la limitatezza è un requisito necessario di un modello in cui i gettoni rappresentano l'uso di entità fisiche limitate (risorse a capacità limitata).

Cercheremo di costruire dei *modelli* cosiddetti *funzionali* di processi manifatturieri, ovvero dei modelli in cui si descrivono le *funzioni* (o *attività*) svolte dall’impianto.

Considereremo solo sistemi con sequenze di lavoro fisse (in cui cioè la sequenza di lavorazione si può stabilire a priori e non dipende dallo stato corrente del sistema).

La modellizzazione formale di un processo richiede i seguenti passi:

- ❶ modello delle attività
si definisce un modulo a reti di Petri per ogni attività;
- ❷ modello dei prodotti (ricette)
si compongono le sotto-reti associate alle singole attività, sincronizzandole opportunamente, per definire le varie sequenze di lavorazione
- ❸ modello delle risorse
si aggiungono al modello delle ricette delle pre- e post-condizioni legate alla disponibilità delle risorse

Ci sono vari modi di rappresentare le singole attività, con sotto-reti di maggiore o minore complessità:

- ▶ modello a 2 eventi (attività = transizione-posto-transizione)
- ▶ modello a un evento (attività = transizione)
- ▶ modello FMS (attività = posto)

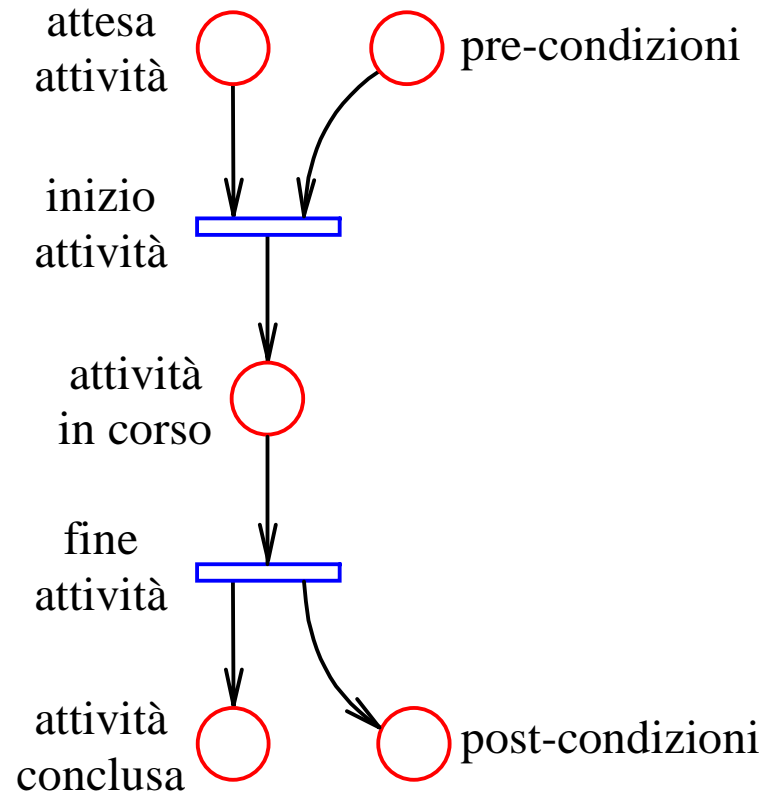
I tre tipi di modelli sono sostanzialmente equivalenti, ed è possibile passare da uno all'altro senza perdere informazione.

Il modello a un evento e il modello FMS possono essere visti come opportune riduzioni del modello a 2 eventi.

Differenze:

- ▶ facilità di analisi del modello
- ▶ rappresentazione dell'uso delle risorse
- ▶ facilità di traduzione della rete di Petri in un codice adatto per l'implementazione

Modello delle attività a 2 eventi



Eventi (associati a transizioni):

- ▶ evento di inizio attività (comando inoltrato dal controllore all'impianto)
- ▶ evento di fine attività (misura in ingresso al controllore)

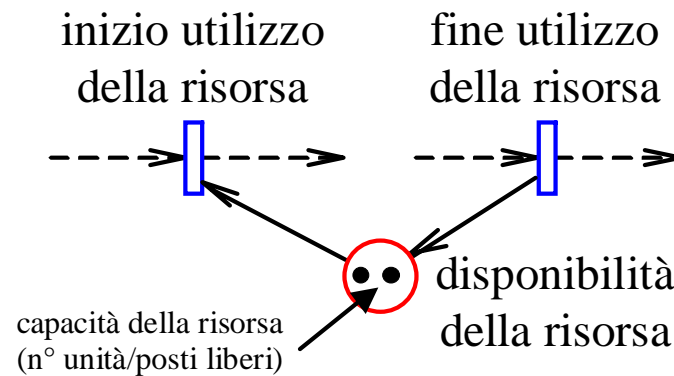
Stati (associati a posti):

- ▶ *attesa attività* (l'attività precedente è conclusa)
- ▶ *pre-condizioni* (disponibilità risorse)
- ▶ *attività in corso*
- ▶ *attività conclusa* (attesa per l'attività successiva)
- ▶ *post-condizioni* (restituzione risorse)

Modellazione delle risorse

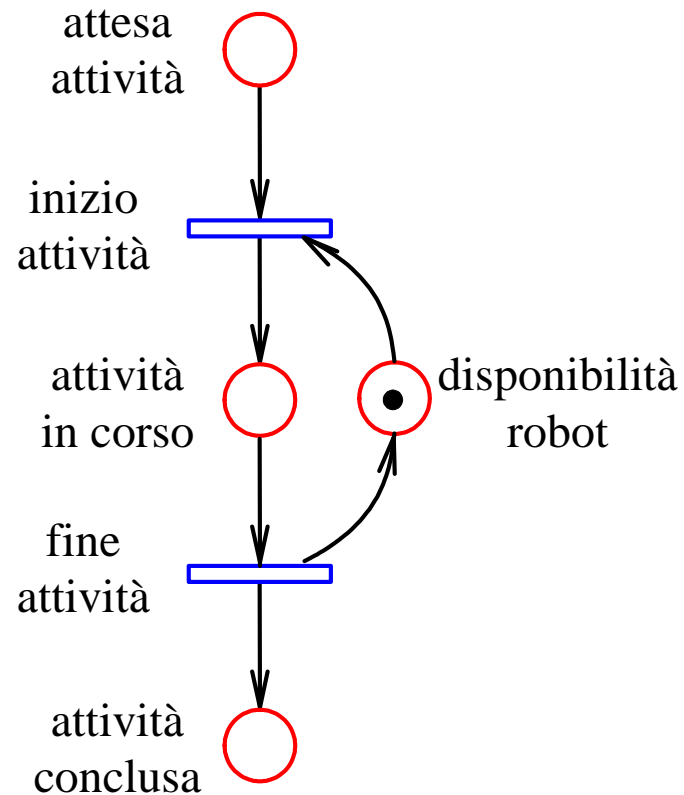
Per la rappresentazione dell'uso delle risorse si possono adottare vari livelli di dettaglio. Ad esempio, per un buffer, è possibile rappresentare lo stato logico di disponibilità all'uso (disponibile, occupato), oppure indicare anche quanti posti liberi o occupati ci sono.

L'idea generale è quella di usare un posto la cui marcatura rappresenta la disponibilità della risorsa, ed è complementare alla marcatura dei posti che rappresentano le operazioni in cui la risorsa è utilizzata:



In altre parole, il modello di risorsa è costruito in modo da configurare un P-invariante nella rete.

Esempio (trasporto di un pezzo con un robot)



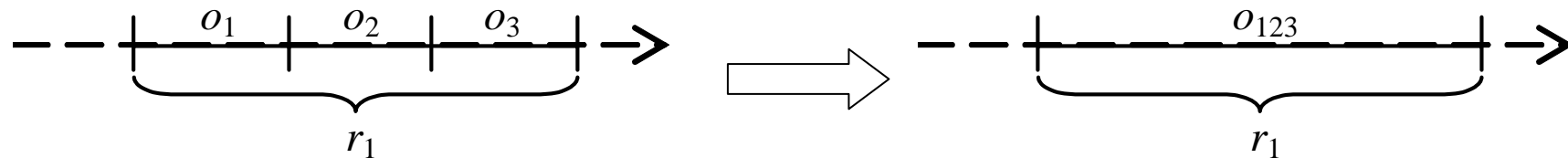
- ▶ attesa attività
→ pezzo pronto per il trasporto
- ▶ pre-condizioni
→ robot disponibile per il trasporto
- ▶ attività in corso
→ trasporto del pezzo (robot occupato)
- ▶ attività conclusa
→ pezzo trasportato
- ▶ post-condizioni
→ robot nuovamente disponibile

Operazioni e risorse

Il dettaglio con cui rappresentare le operazioni dipende fortemente dal meccanismo di allocazione delle risorse.

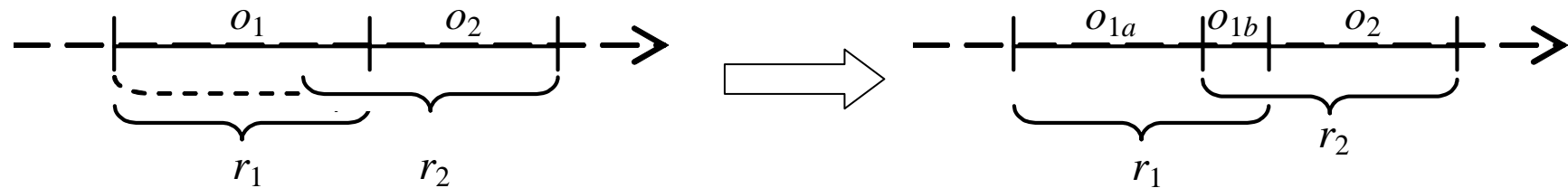
Peraltro, la rappresentazione corretta delle risorse dipende fortemente da come segmentiamo le operazioni.

- 1 Supponiamo, p.es. che una sottosequenza della ricetta produttiva, composta dalle operazioni o_1 , o_2 e o_3 , utilizzi solo una risorsa, senza allocarne o deallocarne altre durante l'esecuzione.



In questo caso, ai fini della rappresentazione del modello di allocazione delle risorse, è inutile rappresentare separatamente le operazioni o_1 , o_2 e o_3 : conviene aggregare le 3 operazioni in un'unica operazione e demandare il dettaglio delle 3 operazioni ai livelli inferiori della gerarchia di controllo.

- ② Supponiamo che o_1 e o_2 siano operazioni consecutive che usano rispettivamente le risorse r_1 e r_2 , e che, inoltre, r_2 sia necessaria anche nella parte conclusiva dell'operazione o_1 .

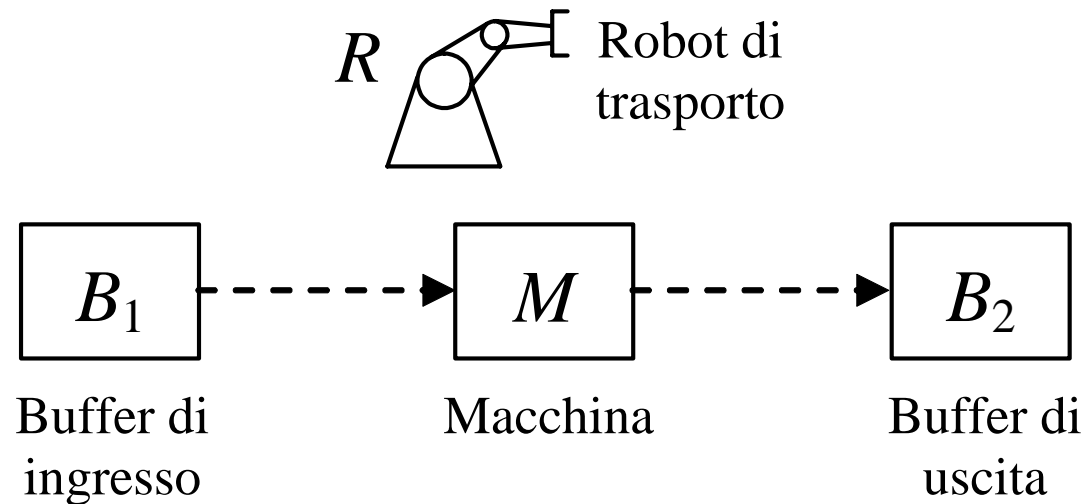


In un modello funzionale (in cui l'attività non è divisibile) occorrerebbe allocare la risorsa r_2 all'inizio dell'operazione o_1 , usando r_2 in modo inefficiente.

Conviene allora modellizzare o_1 in due sotto-operazioni, o_{1a} e o_{1b} , in modo da poter gestire l'allocazione delle risorse anche tra o_{1a} e o_{1b} , acquisendo r_2 solo quando è effettivamente necessario. NB. Occorre che sia possibile registrare l'evento di conclusione della sotto-operazione o_{1a} (serve nuovo sensore o nuova misura).

Questo tipo di situazione si ha frequentemente, p.es. nelle operazioni di carico/scarico (carico pezzo da buffer, trasporto, scarico pezzo a macchina → il buffer serve solo nella prima fase, la macchina solo nella terza).

Esempio: FMS con macchina, robot e due buffer



Sistema di produzione costituito dalle seguenti risorse:

- ▶ macchina operatrice M
- ▶ robot manipolatore R , per operazioni di carico/scarico dei pezzi per la macchina M
- ▶ due magazzini (buffer), B_1 per i pezzi grezzi e B_2 per i pezzi finiti

Ipotesi:

- ▶ I pezzi da lavorare entrano nel sistema in modo automatico sul buffer B_1 .
- ▶ I pezzi finiti vengono prelevati dal buffer B_2 in modo automatico.
- ▶ Entrambi i buffer hanno capacità 2.

Definiamo le attività del sistema:

- ▶ B_1 riceve un pezzo grezzo nuovo
- ▶ R carica un pezzo grezzo da B_1 su M
- ▶ M lavora
- ▶ R carica un pezzo lavorato da M a B_2
- ▶ Il pezzo lavorato viene prelevato da B_2

Si osservi che:

- ▶ Ogni attività impiega almeno una risorsa
- ▶ La scelta delle attività è una tipica scelta progettuale: non è univoca!
- ▶ Per come sono definite le operazioni del robot, ovvero senza distinguere tra presa del pezzo, trasporto vero e proprio e rilascio del pezzo, l'utilizzo delle risorse B_1 ed M (M e B_2) non sarà efficientissimo.

Elenco di stati associati ad ogni attività:

attesa attività	attività in corso	attività conclusa
-	Ingresso	PezzoDaCaricare
PezzoDaCaricare	Carico	PezzoCaricato
PezzoCaricato	Lavorazione	PezzoLavorato
PezzoLavorato	Scarico	PezzoScaricato
PezzoScaricato	Uscita	-

NB. Gli stati di attesa attività per l’operazione di ingresso dei pezzi sul buffer B_1 e di attività conclusa per l’operazione di uscita dei pezzi finiti dal buffer B_2 non sono modellizzati esplicitamente, in quanto dipendono dalla parte di processo non rappresentata, a monte e a valle della macchina.

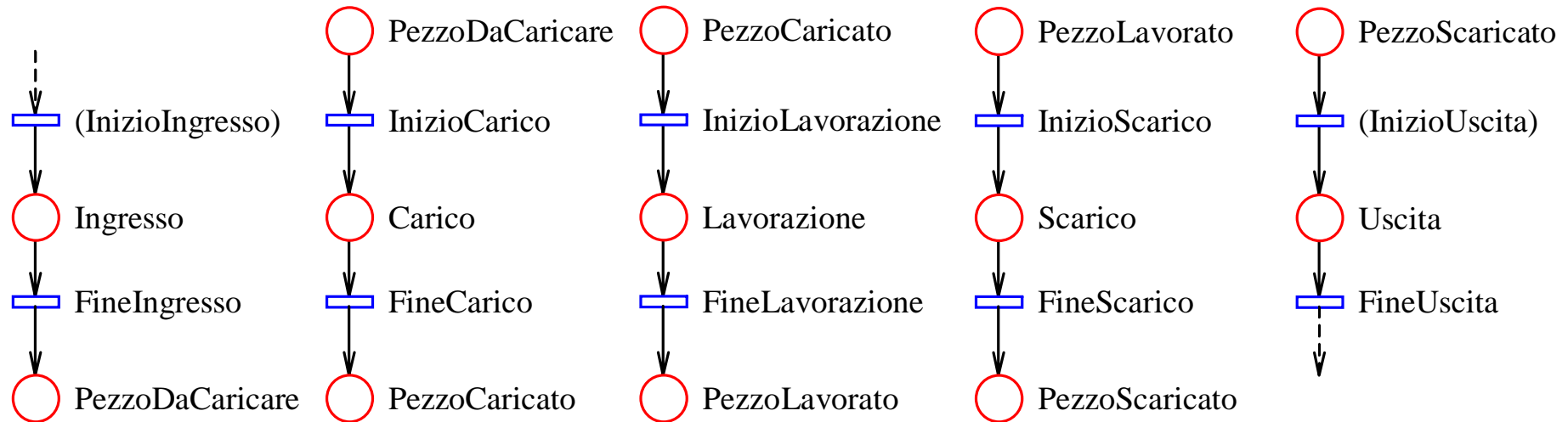
Tabella di eventi di inizio e fine attività:

attività	evento di inizio attività	evento di fine attività
Ingresso	(InizioIngresso)	FineIngresso
Carico	InizioCarico	FineCarico
Lavorazione	InizioLavorazione	FineLavorazione
Scarico	InizioScarico	FineScarico
Uscita	(InizioUscita)	FineUscita

Gli eventi di InizioIngresso e InizioUscita sono non osservabili, in quanto le azioni corrispondenti sono intraprese automaticamente dal sistema.

L'evento di FineIngresso è interpretabile come il segnale emesso da un sensore di posizione sul buffer B_1 in presenza di un pezzo, mentre, corrispondentemente, InizioUscita è il segnale emesso da un sensore di posizione sul buffer B_2 quando il pezzo libera del tutto la zona.

Modello delle 5 attività:



Il modello della ricetta si ottiene connettendo le attività, osservando che ci sono degli stati duplicati, ciascuno dei quali rappresenta uno stato di attività conclusa per un'operazione e di attesa attività per l'operazione successiva. Tali posti vanno fusi insieme.

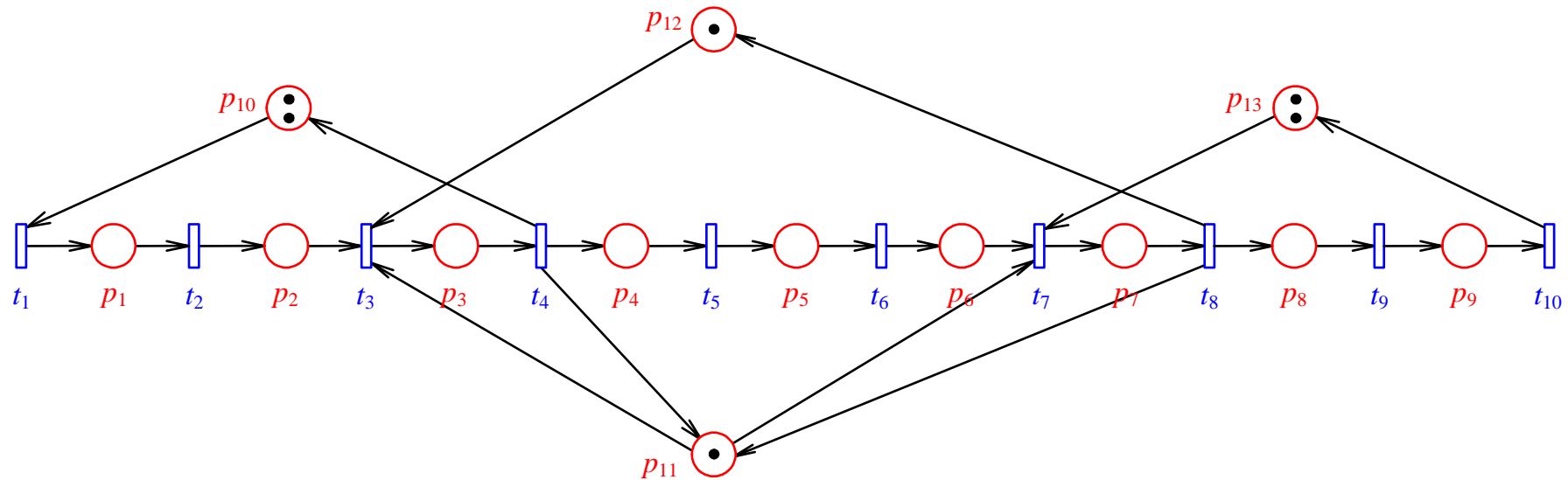
Si ottiene un'unica sequenza in cui si alternano eventi di inizio attività ed eventi di fine attività per le 5 operazioni coinvolte.

Per rappresentare il modello delle risorse occorre specificare la tabella delle pre- e post-condizioni di ogni attività:

attività	pre-condizioni	post-condizioni
Ingresso	B_1 disponibile	-
Carico	R disponibile, M disponibile	R disponibile, B_1 disponibile
Lavorazione	-	-
Scarico	R disponibile, B_2 disponibile	R disponibile, M disponibile
Uscita	-	B_2 disponibile

Si osservi che per operazioni in sequenza che usano la stessa risorsa ininterrottamente (cioè senza un rilascio e una nuova acquisizione della risorsa ad ogni successione di operazioni), la disponibilità della risorsa è una pre-condizione solo della prima operazione della sequenza e una post-condizione solo dell'ultima operazione della sequenza. In pratica, l'acquisizione di risorse avviene soltanto su eventi di inizio attività e il rilascio soltanto su eventi di fine attività.

Il modello completo del processo è quindi il seguente:



Significato posti:

p_1 : Ingresso

p_2 : PezzoDaCaricare

p_3 : Carico

p_4 : PezzoCaricato

p_5 : Lavorazione

p_6 : PezzoLavorato

p_7 : Scarico

p_8 : PezzoScaricato

p_9 : Uscita

p_{10} : B_1 disponibile

p_{11} : R disponibile

p_{12} : M disponibile

p_{13} : B_2 disponibile

Significato transizioni:

t_1 : (InizioIngresso)

t_2 : FineIngresso

t_3 : InizioCarico

t_4 : FineCarico

t_5 : InizioLavorazione

t_6 : FineLavorazione

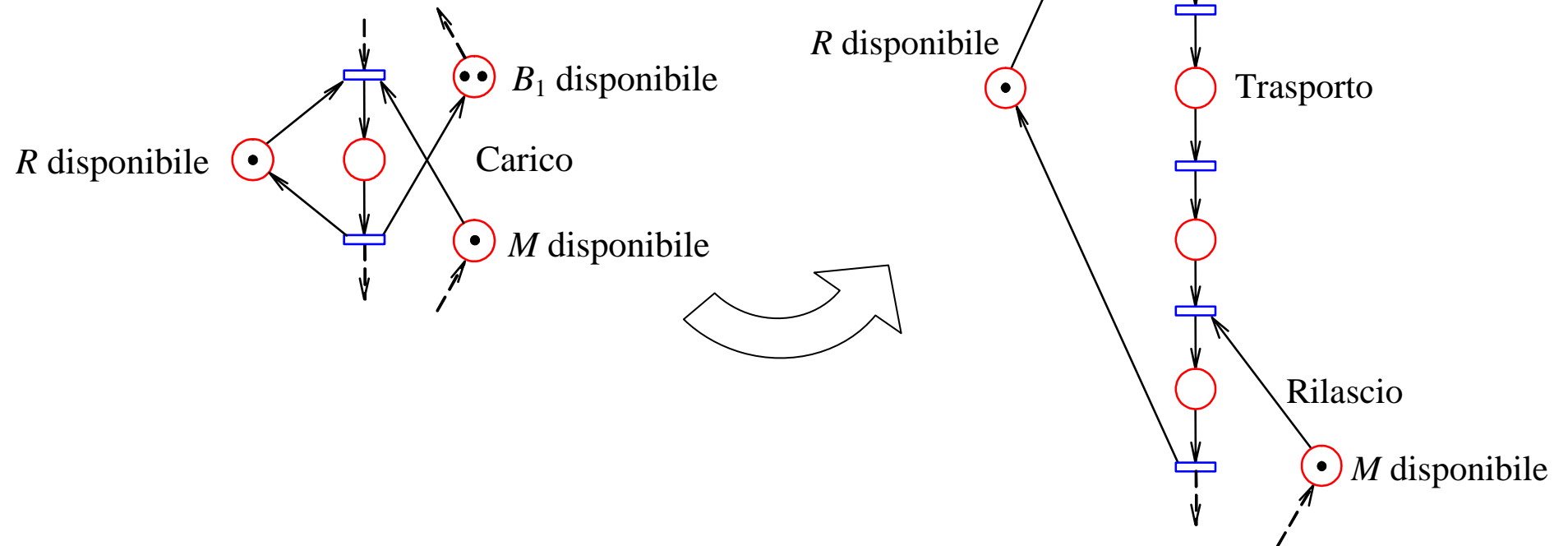
t_7 : InizioScarico

t_8 : FineScarico

t_9 : (InizioUscita)

t_{10} : FineUscita

Per ottimizzare la gestione delle risorse nelle fasi di carico e scarico, in cui sono coinvolte risorse multiple, occorre distinguere le fasi di prelievo, trasporto e rilascio, come riportato a titolo esemplificativo nella figura seguente:



Modello attività a 1 evento

Si modella un'attività con una singola transizione.

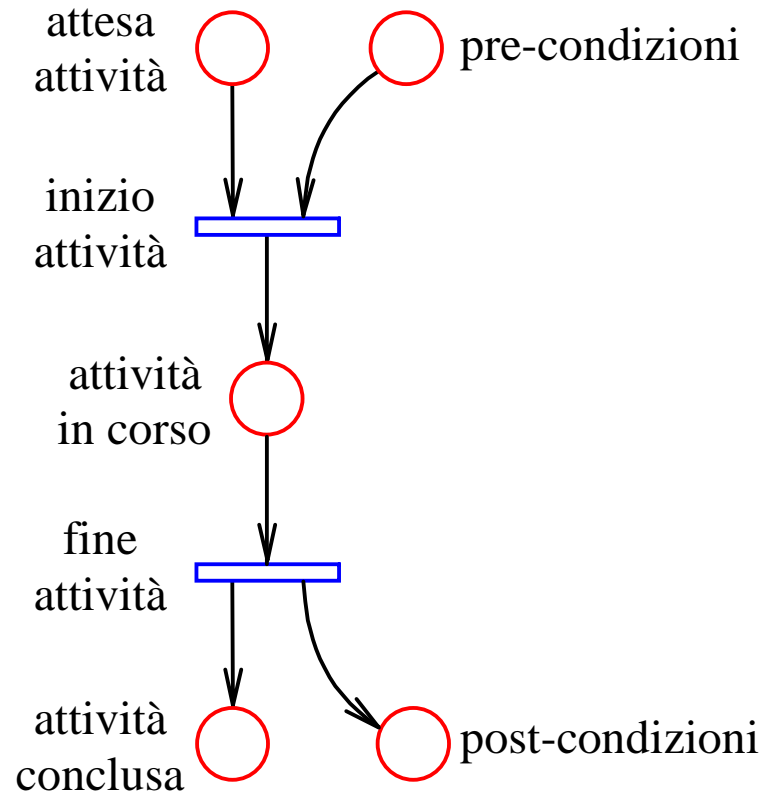
Rispetto al modello a 2 eventi, ciò equivale a fondere in un'unica transizione la sotto-rete transizione-posto-transizione che rappresenta l'attività, associando entrambi gli eventi di inizio e fine attività alla stessa transizione.

Eventi (associati a transizioni):

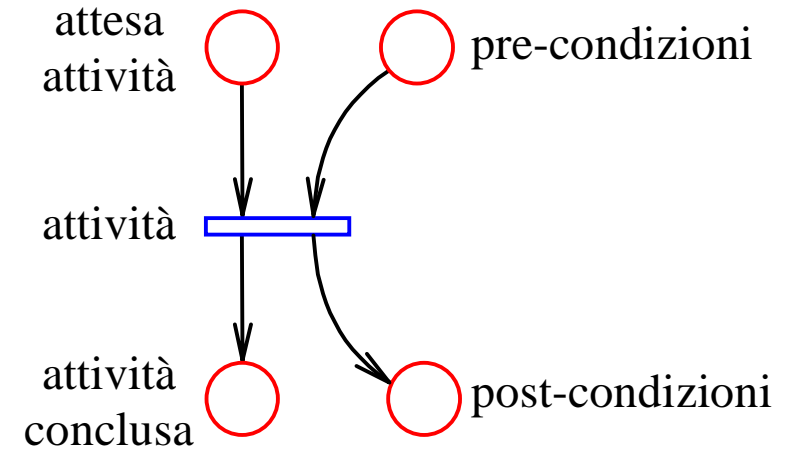
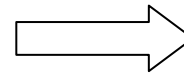
- ▶ evento di *esecuzione attività* (comprende sia l'inizio attività che la fine attività)

Stati (associati a posti):

- ▶ *attesa attività* (l'attività precedente è conclusa)
- ▶ *pre-condizioni* (disponibilità risorse)
- ▶ *attività conclusa* (attesa per l'attività successiva)
- ▶ *post-condizioni* (restituzione risorse)



modello attività a 2 eventi

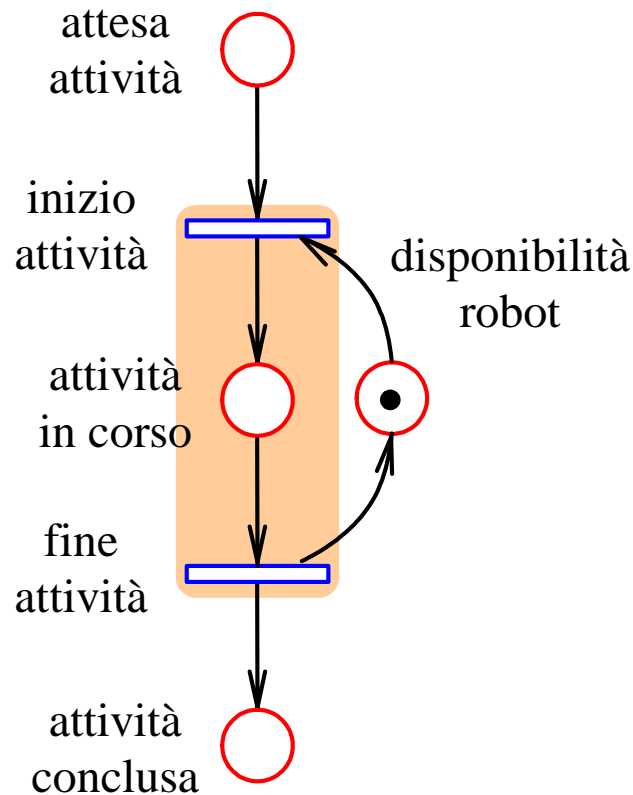


modello attività a 1 evento

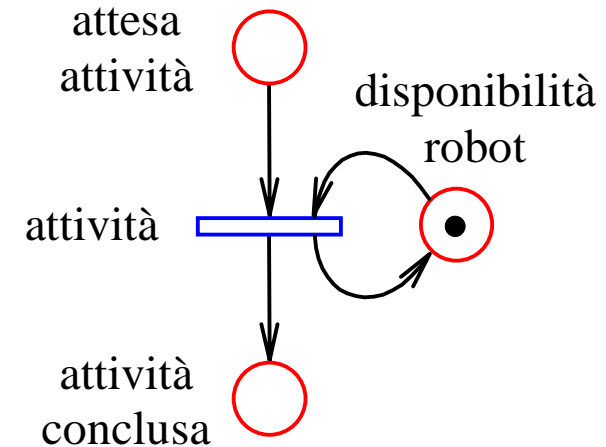
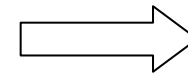
Commenti:

- ▶ modello astratto
 - ▼ l’attività ha una durata “istantanea” → non esiste uno stato di “attività in corso”
 - ▼ le risorse usate da attività singole vengono modellizzate con autoanelli
→ non è modellizzato esplicitamente lo stato di risorsa occupata
- ▶ dimensioni ridotte
 - ▼ dimensione più conveniente per l’analisi (la complessità dell’analisi cresce rapidamente con le dimensioni della rete di Petri)
- ▶ complessità dell’interpretazione ai fini della traduzione in codice di controllo
 - ▼ gli eventi di inizio e fine attività sono entrambi associati alla medesima transizione
⇒ attenzione nell’implementazione

Esempio (trasporto di un pezzo con un robot)



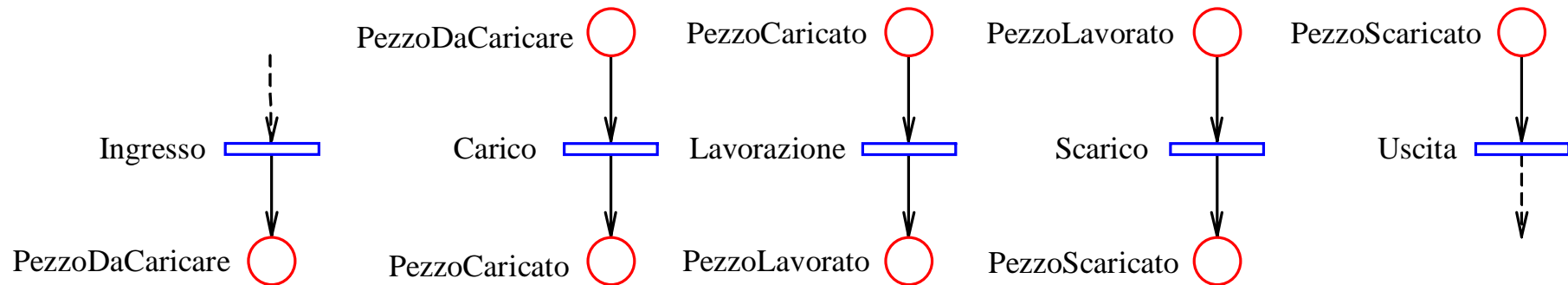
modello attività a 2 eventi



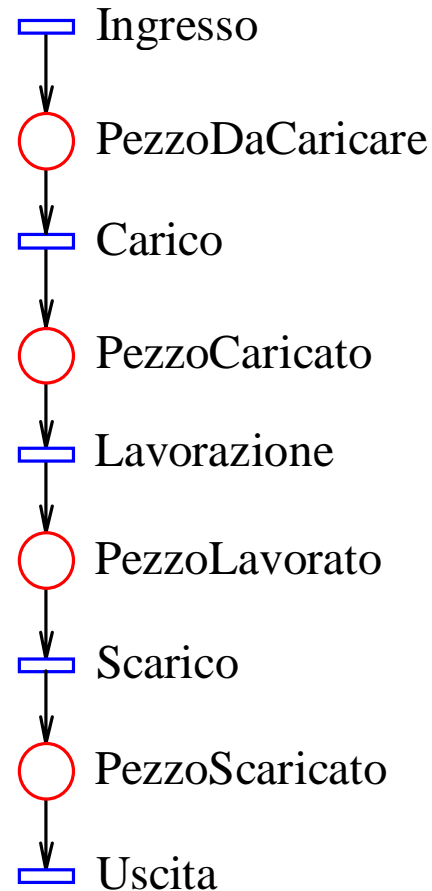
modello attività a 1 evento

Esempio: FMS con macchina, robot e due buffer (cont.)

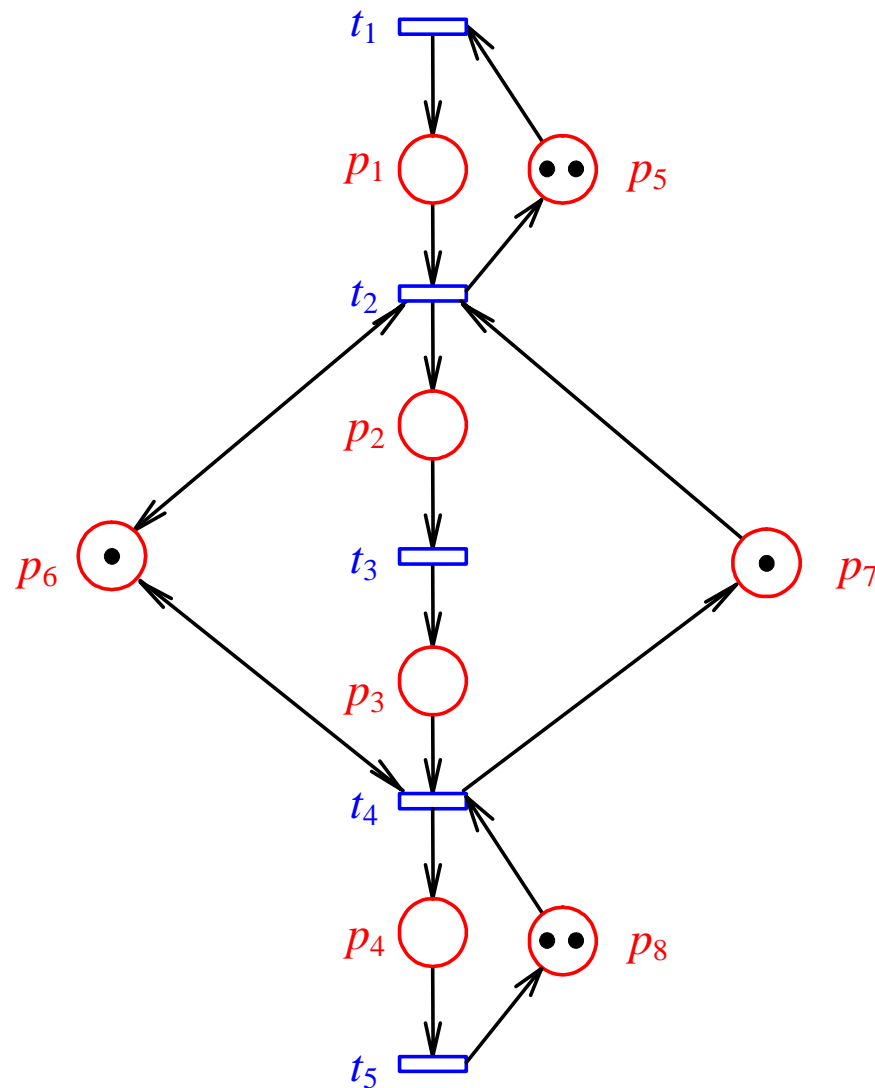
Modello delle attività (5 attività \Rightarrow 5 transizioni):



Il modello della ricetta si ottiene connettendo le attività, osservando che ci sono degli stati duplicati, ciascuno dei quali rappresenta uno stato di attività conclusa per un'operazione e di attesa attività per l'operazione successiva.



Il modello completo del processo è quindi il seguente:



Significato posti:

p_1 : PezzoDaCaricare

p_2 : PezzoCaricato

p_3 : PezzoLavorato

p_4 : PezzoScaricato

p_5 : B_1 disponibile

p_6 : R disponibile

p_7 : M disponibile

p_8 : B_2 disponibile

Significato transizioni:

t_1 : Ingresso

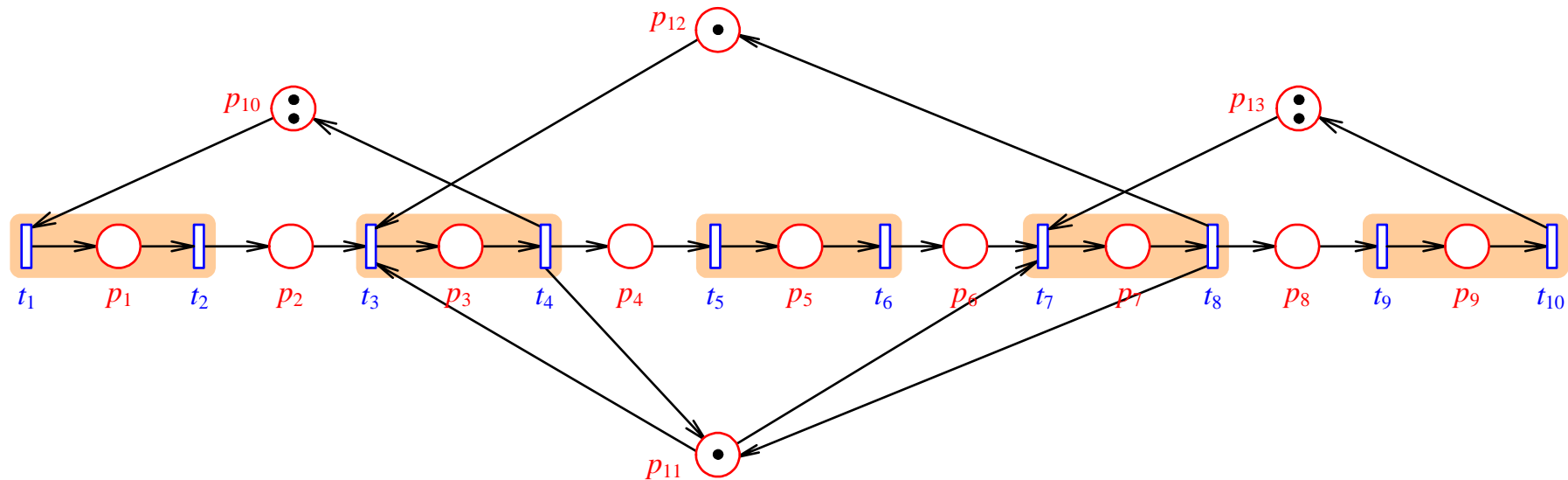
t_2 : Carico

t_3 : Lavorazione

t_4 : Scarico

t_5 : Uscita

Con riferimento al modello a 2 eventi, ciò equivale a fondere le sotto-reti evidenziate in figura:



Significato posti:

p_1 : Ingresso

p_2 : PezzoDaCaricare

p_3 : Carico

p_4 : PezzoCaricato

p_5 : Lavorazione

p_6 : PezzoLavorato

p_7 : Scarico

p_8 : PezzoScaricato

p_9 : Uscita

p_{10} : B_1 disponibile

p_{11} : R disponibile

p_{12} : M disponibile

p_{13} : B_2 disponibile

Significato transizioni:

t_1 : (InizioIngresso)

t_2 : FineIngresso

t_3 : InizioCarico

t_4 : FineCarico

t_5 : InizioLavorazione

t_6 : FineLavorazione

t_7 : InizioScarico

t_8 : FineScarico

t_9 : (InizioUscita)

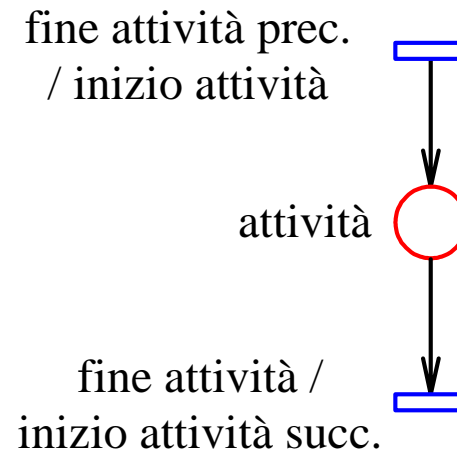
t_{10} : FineUscita

Modello FMS (Flexible Manufacturing Systems)

La metafora modellistica è la seguente:

- ▶ una risorsa viene acquisita per svolgere un'operazione;
- ▶ tale risorsa viene tenuta (allocata) fino a quando non si libera la risorsa necessaria a svolgere l'operazione successiva;
- ▶ quando una risorsa è allocata, non si distingue lo stato di “operazione in corso” dallo stato di attesa che segue la conclusione dell'operazione;
- ▶ lo scambio di risorse è “istantaneo” (la deallocazione di una risorsa usata per un'operazione conclusa e l'allocazione della risorsa per l'operazione successiva sono contemporanee).

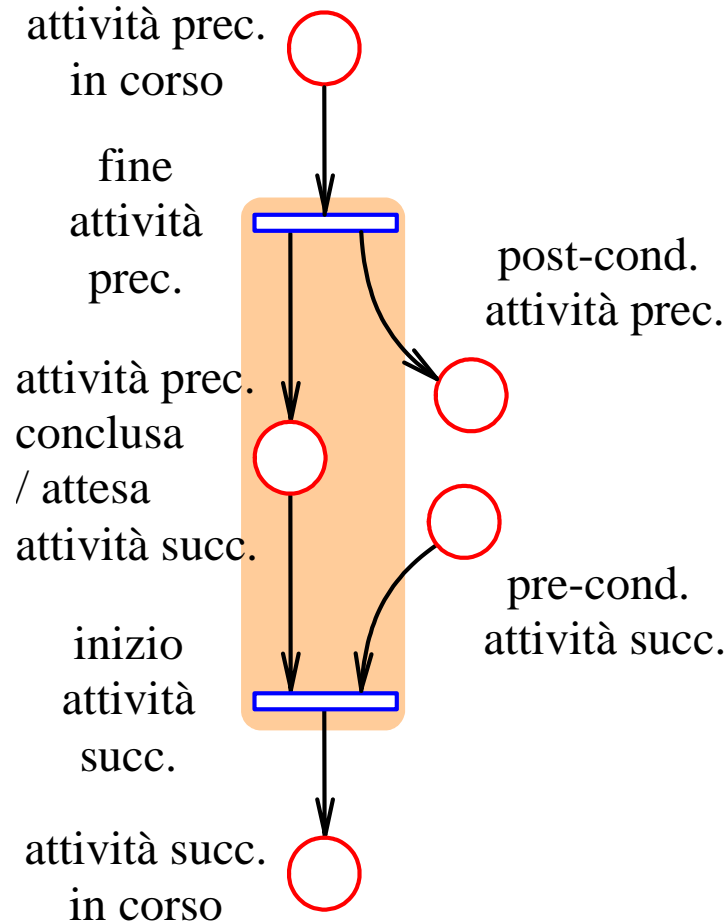
Nei modelli FMS si modella un'attività con un singolo posto, detto anche *posto-operazione*.



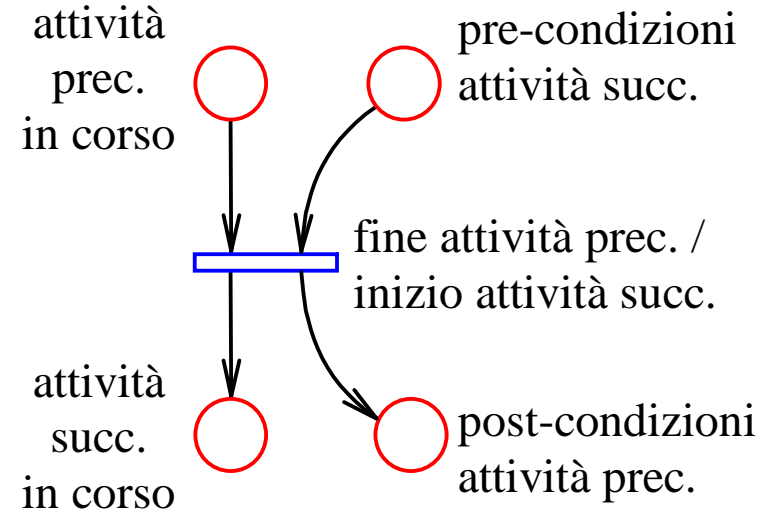
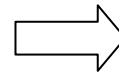
Si osservi che le transizioni sono associate a *coppie* di eventi (fine attività / inizio attività successiva).

I gettoni nei posti-operazione rappresentano i *prodotti* coinvolti nelle rispettive operazioni.

Rispetto al modello a 2 eventi, ciò equivale a fondere in un'unica transizione la sotto-rete $t-p-t$ che rappresenta la fine di un'attività e l'inizio della successiva.



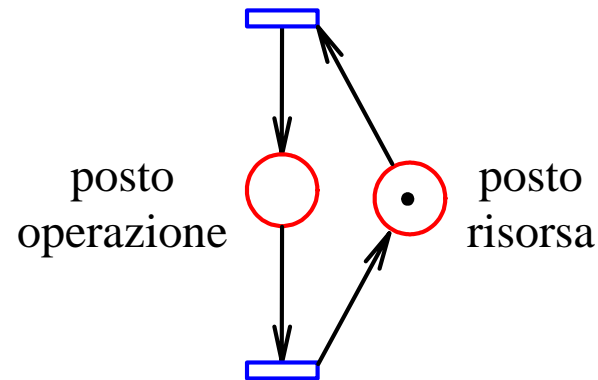
modello attività a 2 eventi



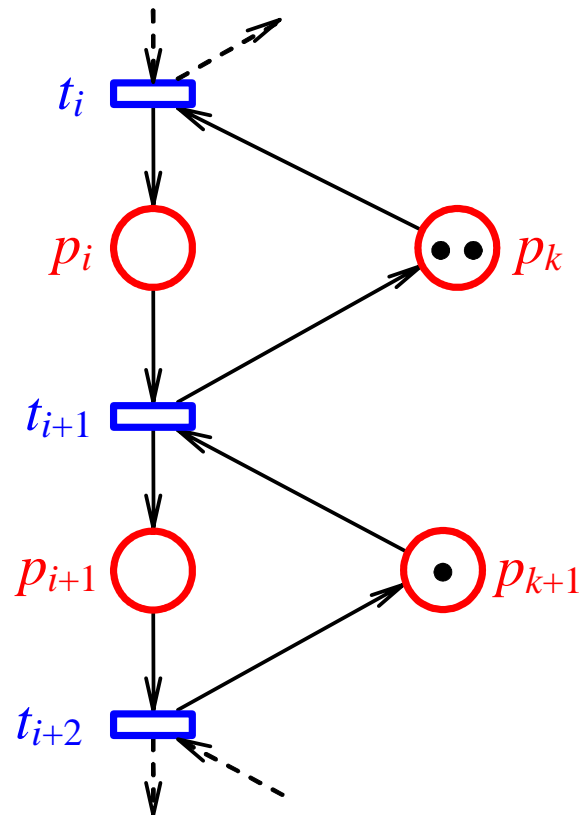
modello FMS

Le risorse sono pure rappresentate con posti (*posti-risorsa*).

I gettoni nei posti-risorsa rappresentano le *disponibilità* delle rispettive risorse.



La struttura tipica di un modello FMS è la seguente, in cui si distinguono un flusso produttivo (parte sinistra) e il modello delle risorse (parte destra).



Naturalmente, non è detto che la modalità di acquisizione delle risorse sia sempre quella in cui una sola risorsa è utilizzata da una sola operazione (*acquisizione singola*), ma esistono altre modalità:

- ▶ *acquisizione multipla contemporanea*
un'operazione acquisisce (e rilascia) più di una risorsa contemporaneamente (gli eventi di acquisizione e rilascio sono unici)
- ▶ *acquisizione multipla sequenziale*
un'operazione acquisisce (e rilascia) più di una risorsa, ma non necessariamente contemporaneamente (gli eventi di acquisizione e rilascio non sono necessariamente coincidenti)

Esempio: FMS con macchina, robot e due buffer (cont.)

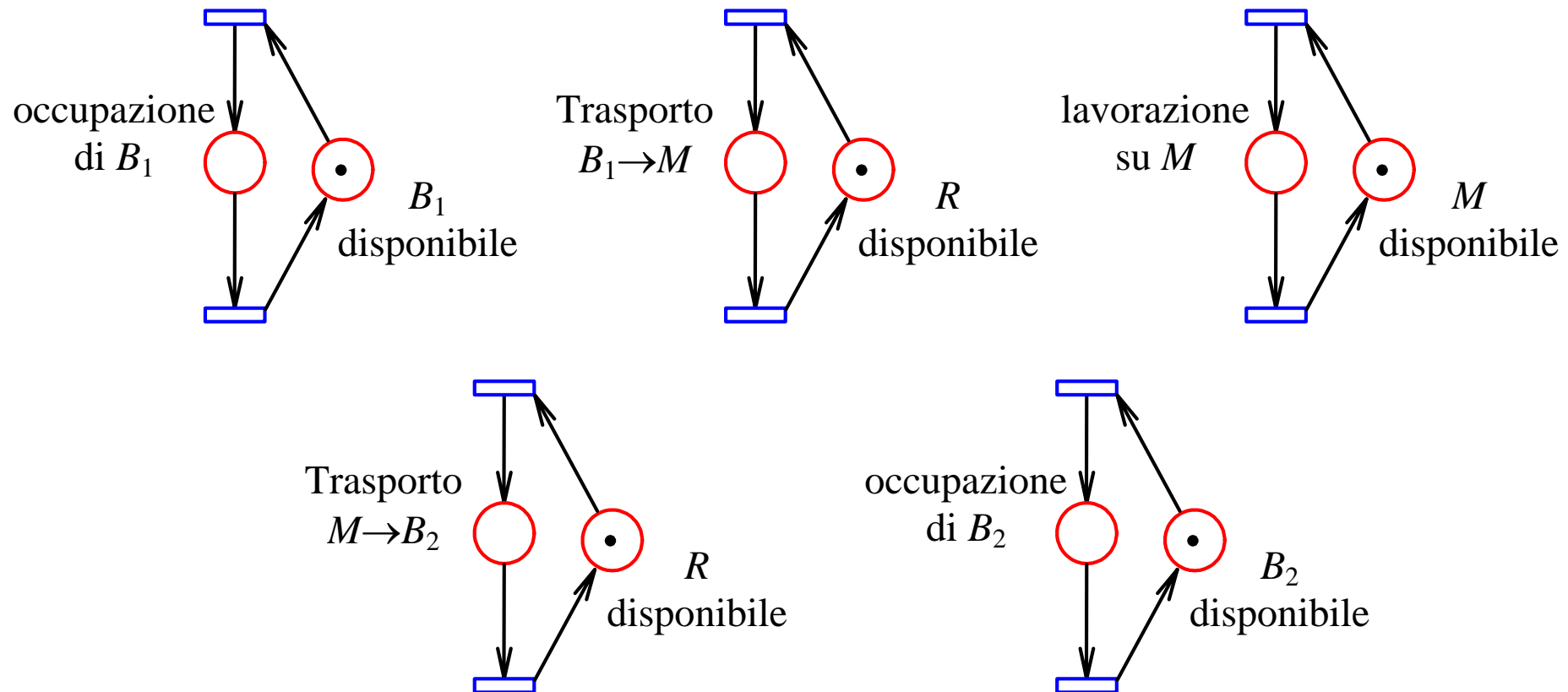
Il modello FMS è tipicamente pensato in modo tale che ogni attività rappresentata sia associata all'uso di una risorsa. Abbiamo visto in precedenza, però, che alcune attività come l'effettivo carico/scarico di pezzi con il robot richiedono l'allocazione di due risorse alla volta (robot e macchina, oppure robot e buffer).

Nei modelli FMS, queste sotto-operazioni vengono tipicamente “mascherate” nelle transizioni a monte e a valle, esplicitando solo le pure fasi di trasporto.

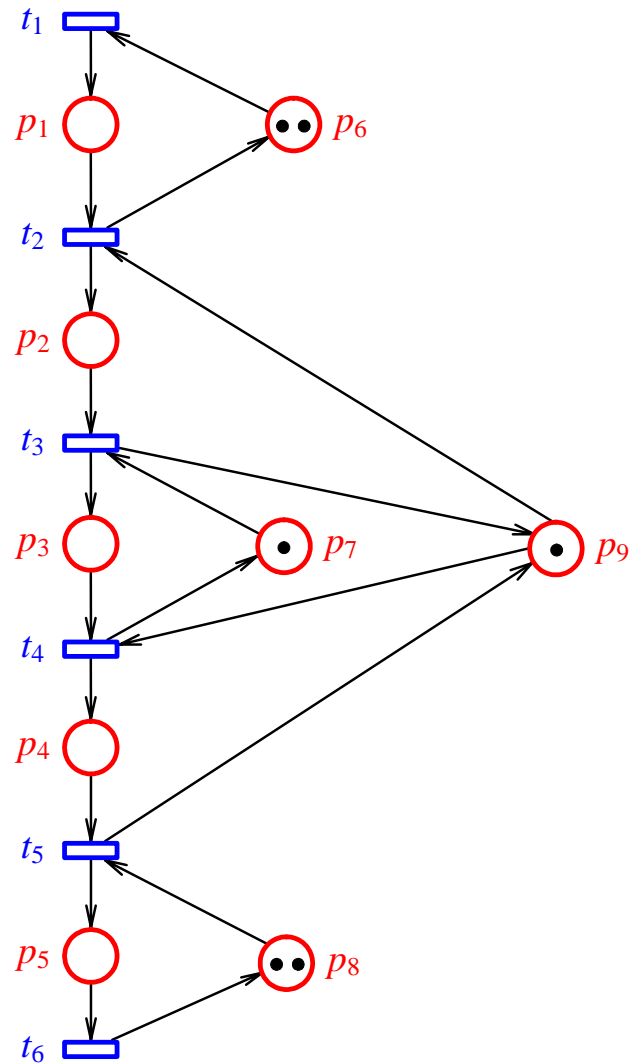
Bisogna allora ridefinire correttamente le attività e le relative risorse utilizzate:

attività	risorsa utilizzata
Occupazione buffer d'ingresso	buffer B_1
Trasporto B_1-M	robot R
Lavorazione	macchina M
Trasporto $M-B_2$	robot R
Occupazione buffer d'uscita	buffer B_2

Le attività sono rappresentate da 5 posti e poichè ciascuna utilizza una risorsa, la transizione a monte di ogni attività è associata all'acquisizione della risorsa, mentre quella a valle è associata al suo rilascio.



Il modello completo del processo è il seguente:



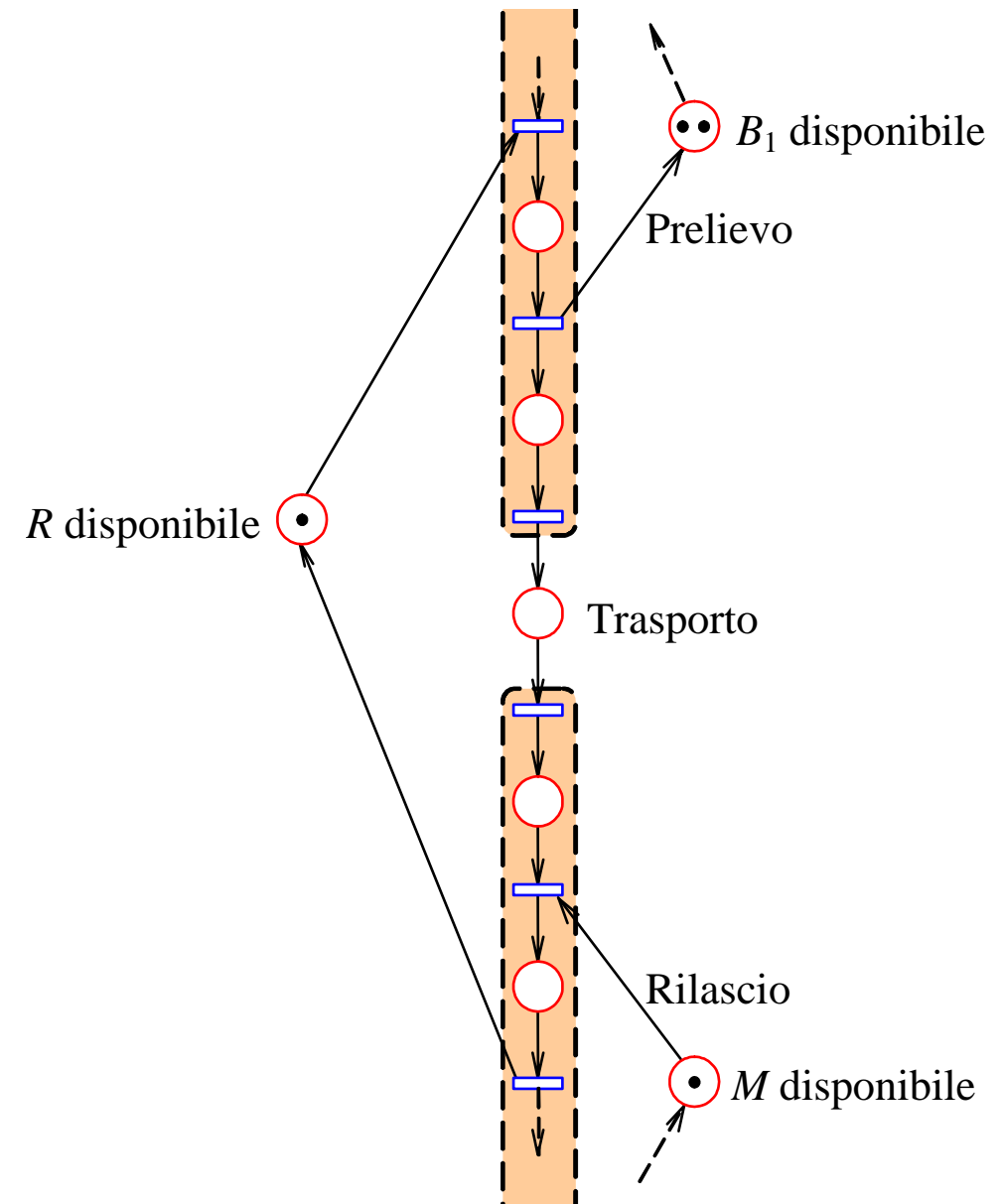
Significato posti:

- p_1 : Occupazione B_1
- p_2 : Trasporto $B_1 \rightarrow M$
- p_3 : Lavorazione
- p_4 : Trasporto $M \rightarrow B_2$
- p_5 : Occupazione B_2
- p_6 : B_1 disponibile
- p_7 : M disponibile
- p_8 : B_2 disponibile
- p_9 : R disponibile

Significato transizioni:

- t_1 : - / Ingresso / Inizio Occupazione B_1
- t_2 : Fine Occupazione B_1 / (Presa Pezzo) / Inizio Trasporto B_1-M
- t_3 : Fine Trasporto B_1-M / (Rilascio Pezzo) / Inizio Lavorazione
- t_4 : Fine Lavorazione / (Presa Pezzo) / Inizio Trasporto $M-B_2$
- t_5 : Fine Trasporto $M-B_2$ / (Rilascio Pezzo) / Inizio Attesa Uscita
- t_6 : Fine Attesa Uscita / Uscita / -

Questo modello può essere ricavato per riduzione da un corrispondente modello a 2 eventi diverso da quello considerato in precedenza, per via della ridefinizione delle operazioni, finalizzata a mascherare le operazioni in cui sono coinvolte coppie di risorse.



Commenti

La metafora modellistica del modello FMS può essere utilizzata in contesti diversi con significati diversi:

- ▶ linea di assemblaggio/lavorazione (*catena di montaggio*), dove il prodotto segue una strada obbligata e una sequenza precisa di lavorazione;
 - ▼ risorse = dispositivi di trasporto e macchinari di lavorazione
 - ▼ operazioni = lavorazioni
 - ▼ prodotti = pezzi in lavorazione
- ▶ cella robotizzata, in cui operano più manipolatori robotici contemporaneamente su un unico pezzo (p.es. cella di assemblaggio e saldatura della scocca di un'automobile);
 - ▼ risorse = varie parti della scocca su cui lavorano i robot
 - ▼ operazioni = sequenze di lavorazione dei singoli manipolatori
 - ▼ prodotti = consensi all'esecuzione di una singola lavorazione di un robot
- ▶ sistema di trasporto con AGV;
 - ▼ risorse = vari tratti dei percorsi guidati (binari, piste magnetiche, ecc.)
 - ▼ operazioni = varie fasi del trasporto
 - ▼ prodotti = carrelli che trasportano i pezzi