



## **Automazione industriale dispense del corso**

### **11. Modellizzazione con reti di Petri**

Luigi Piroddi  
[piroddi@elet.polimi.it](mailto:piroddi@elet.polimi.it)

## Introduzione

Un sistema di produzione automatizzato serve a ottenere prodotti finiti a partire da pezzi grezzi o materie prime, 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
- ▶ *rilasciate* al termine  
in modo che possano essere utilizzate da altre attività, se sono *risorse condivise*, o dalla medesima attività nella produzione del pezzo successivo

## Le attività:

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

## In tali modelli risultano cruciali

- ▶ l'analisi di deadlock dovuti a condizioni di attesa ciclica di risorse
- ▶ l'analisi di prestazioni (p.es. saturazione dell'uso delle risorse)

## Requisiti di un modello a rete di Petri di un sistema produttivo

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

Infatti:

- ▶ la *limitatezza* è un requisito necessario di un modello in cui i gettoni rappresentano l’uso di entità fisiche limitate (risorse a capacità limitata)
- ▶ la *vivezza* assicura che ogni operazione descritta dal modello possa essere svolta infinite volte (nelle ripetizioni del ciclo produttivo)
  - ▼ una marcatura morta indica la presenza di un blocco critico (deadlock)
  - ▼ una transizione morta (ovvero che non può mai scattare), rappresenta un’operazione che non viene mai eseguita (modello ridondante o errato)
  - ▼ se qualche operazione può essere svolta solo un numero finito di volte, la completa ripetibilità di un ciclo produttivo viene a mancare
- ▶ la *reversibilità* è una proprietà necessaria per la ripetibilità del ciclo produttivo

Cercheremo di costruire dei *modelli 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.

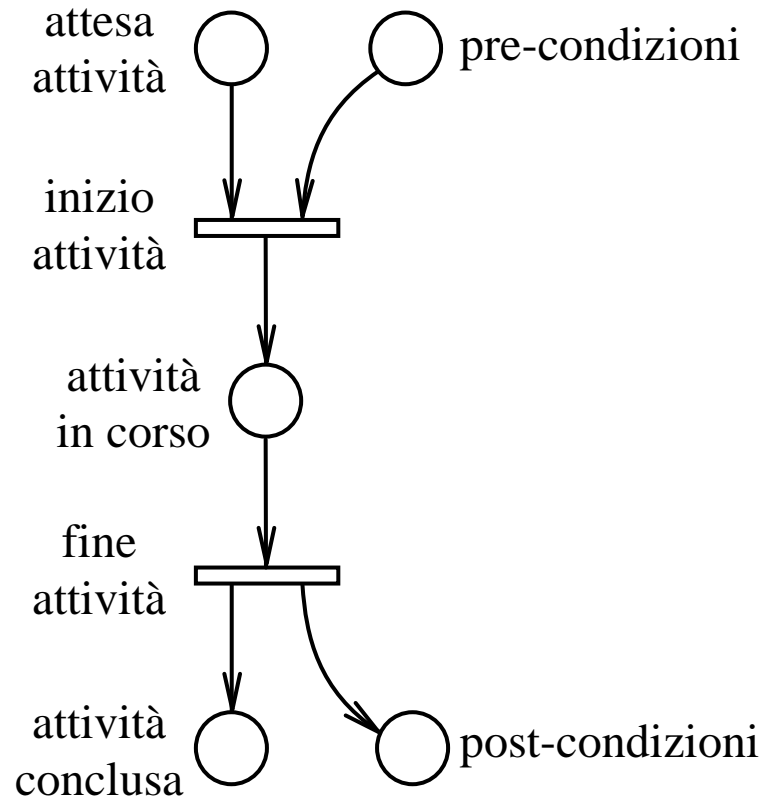
In particolare, il modello a un evento e il modello FMS possono essere visti come opportune riduzioni del modello a 2 eventi.

Differenze:

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

In ogni caso, per la coerenza interna del modello è opportuno mantenere la stessa rappresentazione delle operazioni.

## Modello delle attività a 2 eventi



Eventi (associati a transizioni):

- ▶ *inizio attività*  
comando inoltrato dal controllore all'impianto
- ▶ *fine attività*  
misura in ingresso al controllore

Stati (associati a posti):

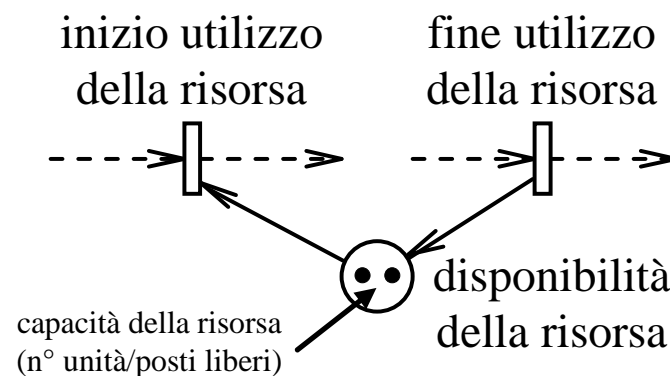
- ▶ *attesa attività*  
l'attività precedente è conclusa
- ▶ *pre-condizioni*  
disponibilità risorse
- ▶ *attività in corso*
- ▶ *attività conclusa*  
attesa per l'attività successiva
- ▶ *post-condizioni*  
restituzione risorse

## Modellizzazione delle risorse

Per rappresentare l'uso delle risorse si possono adottare vari livelli di dettaglio.

- p.es., 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

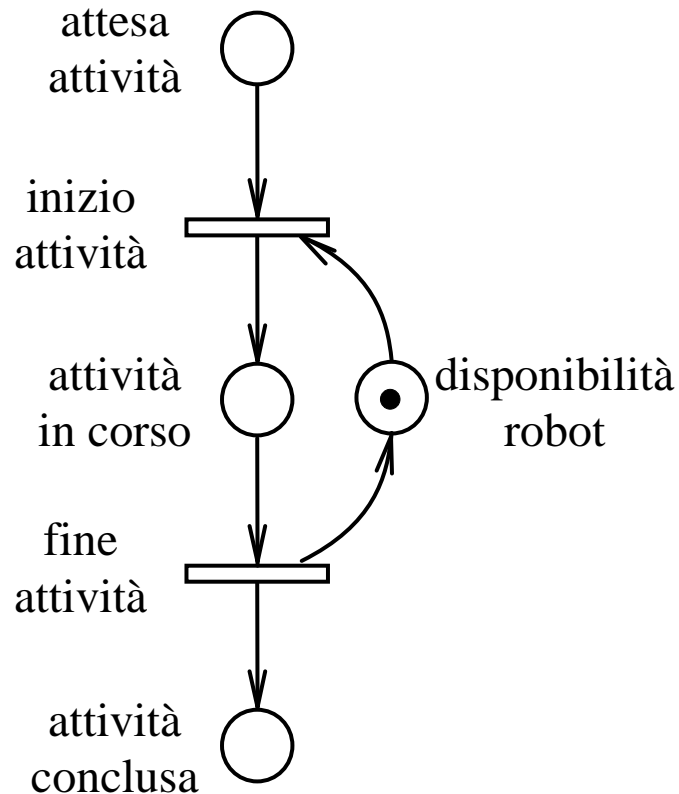
L'idea generale è quella di usare un posto la cui marcatura rappresenta la disponibilità della risorsa, ed è complementare alla marcatura dei posti che rappresentano le operazioni in cui la risorsa è utilizzata:



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)

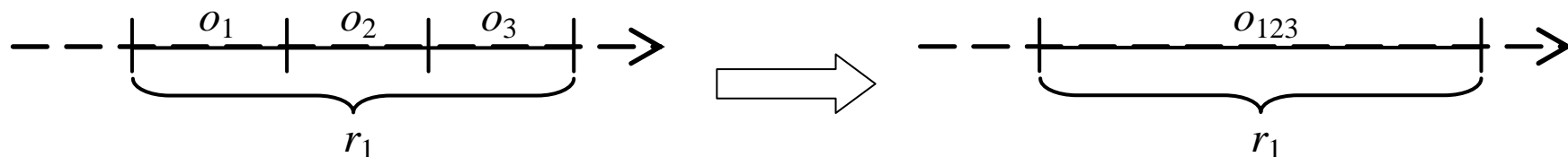


- ▶ *attesa attività*  
pezzo pronto per il trasporto
- ▶ *pre-condizioni*  
robot disponibile per il trasporto
- ▶ *attività in corso*  
trasporto del pezzo (robot occupato)
- ▶ *attività conclusa*  
pezzo trasportato
- ▶ *post-condizioni*  
robot nuovamente disponibile

## Operazioni e risorse

Le risorse possono essere allocate e deallocate solo in corrispondenza degli eventi di inizio o fine operazione. Pertanto:

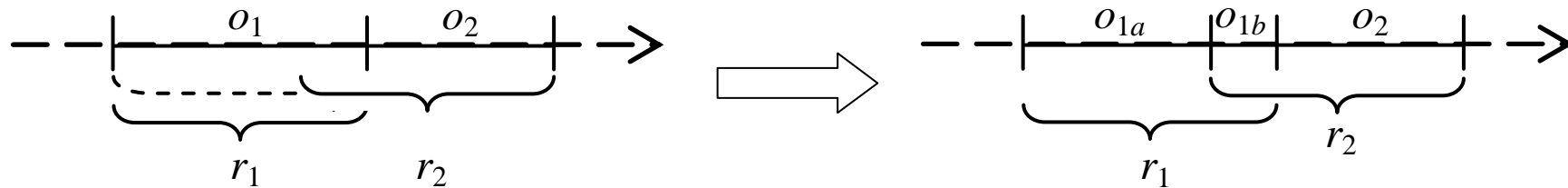
- ▶ il dettaglio con cui rappresentare le operazioni dipende dal meccanismo di allocazione delle risorse
  - ▶ la rappresentazione corretta delle risorse dipende fortemente da come vengono segmentate le operazioni
- ❶ Supponiamo, p.es. che una sottosequenza della ricetta produttiva, composta dalle operazioni  $o_1$ ,  $o_2$  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  $o_3$ .

Convienne piuttosto 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  $o_1$ .



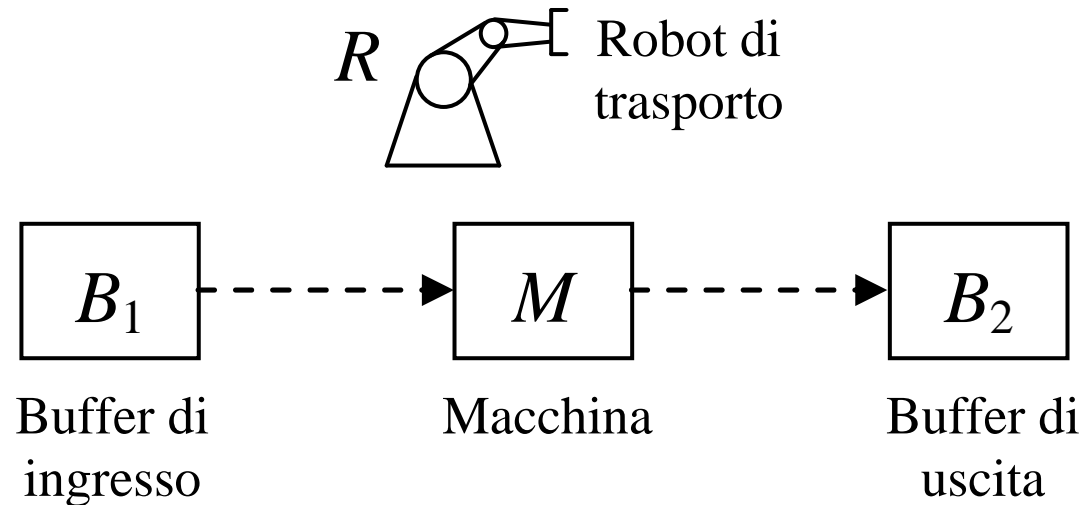
In un modello funzionale (in cui l'attività non è divisibile) occorrerebbe allocare la risorsa  $r_2$  all'inizio dell'operazione  $o_1$ , usando  $r_2$  in modo inefficiente.

Convienne 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 particolarmente efficiente

## Elenco di stati associati ad ogni attività:

attesa attività	attività in corso	attività conclusa
-	Ingresso	PezzoEntrato
PezzoDaCaricare	Carico	PezzoCaricato
PezzoDaLavorare	Lavorazione	PezzoLavorato
PezzoDaScaricare	Scarico	PezzoScaricato
PezzoDaEspellere	Uscita	-

## Osservazioni:

- ▶ 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

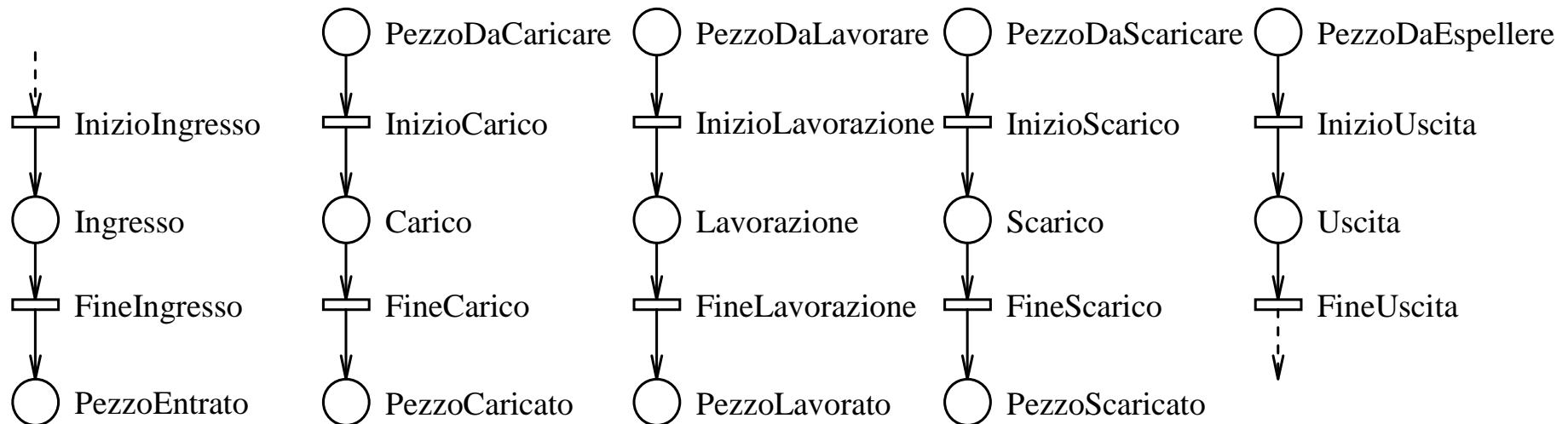
## Tabella di eventi di inizio e fine attività:

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

### Osservazioni:

- ▶ gli eventi di InizioIngresso, FineIngresso, InizioUscita e FineUscita 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:



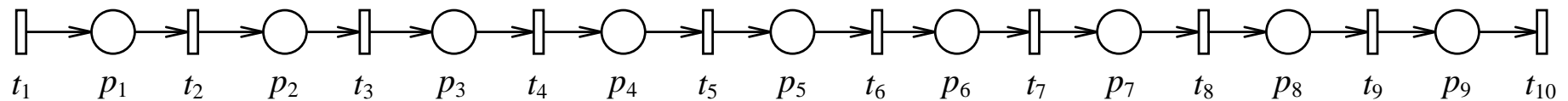
Il modello della ricetta si ottiene connettendo le attività, osservando che ci sono degli stati duplicati, ciascuno dei quali rappresenta uno stato di attività conclusa per un'operazione e di attesa attività per l'operazione successiva:

- ▶  $\text{PezzoEntrato} = \text{PezzoDaCaricare}$
- ▶  $\text{PezzoCaricato} = \text{PezzoDaLavorare}$
- ▶  $\text{PezzoLavorato} = \text{PezzoDaScaricare}$
- ▶  $\text{PezzoScaricato} = \text{PezzoDaEspellere}$

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.



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

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

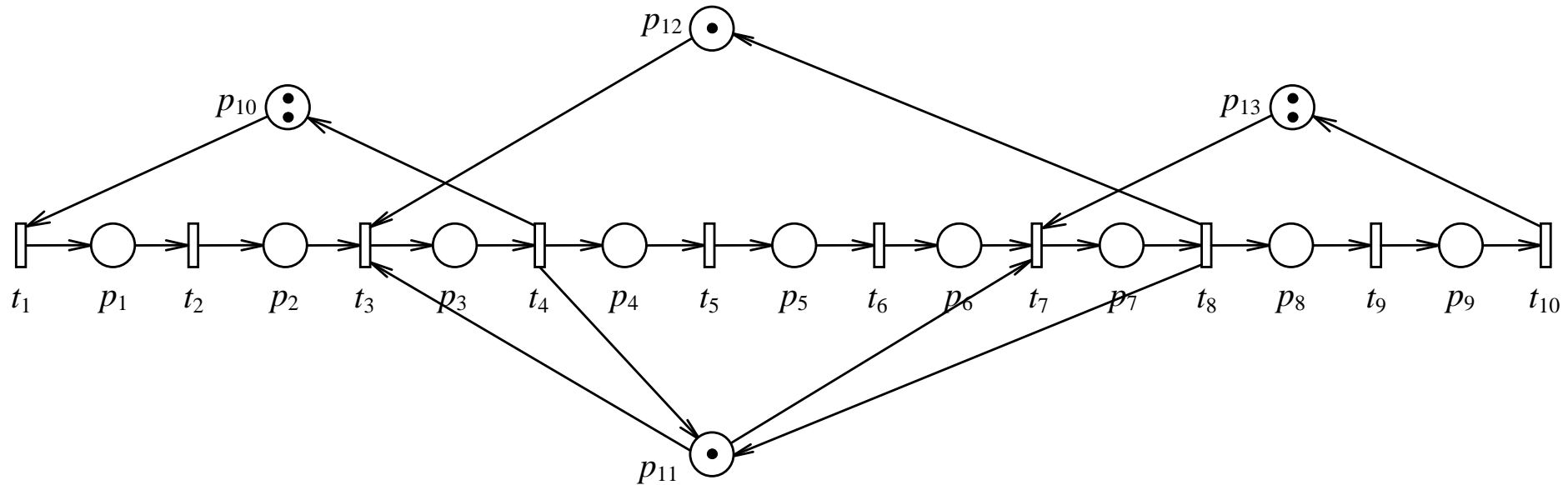
Per rappresentare il modello delle risorse occorre specificare la tabella delle pre- e post-condizioni di ogni attività:

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

### Osservazioni:

- ▶ 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
- ▶ 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

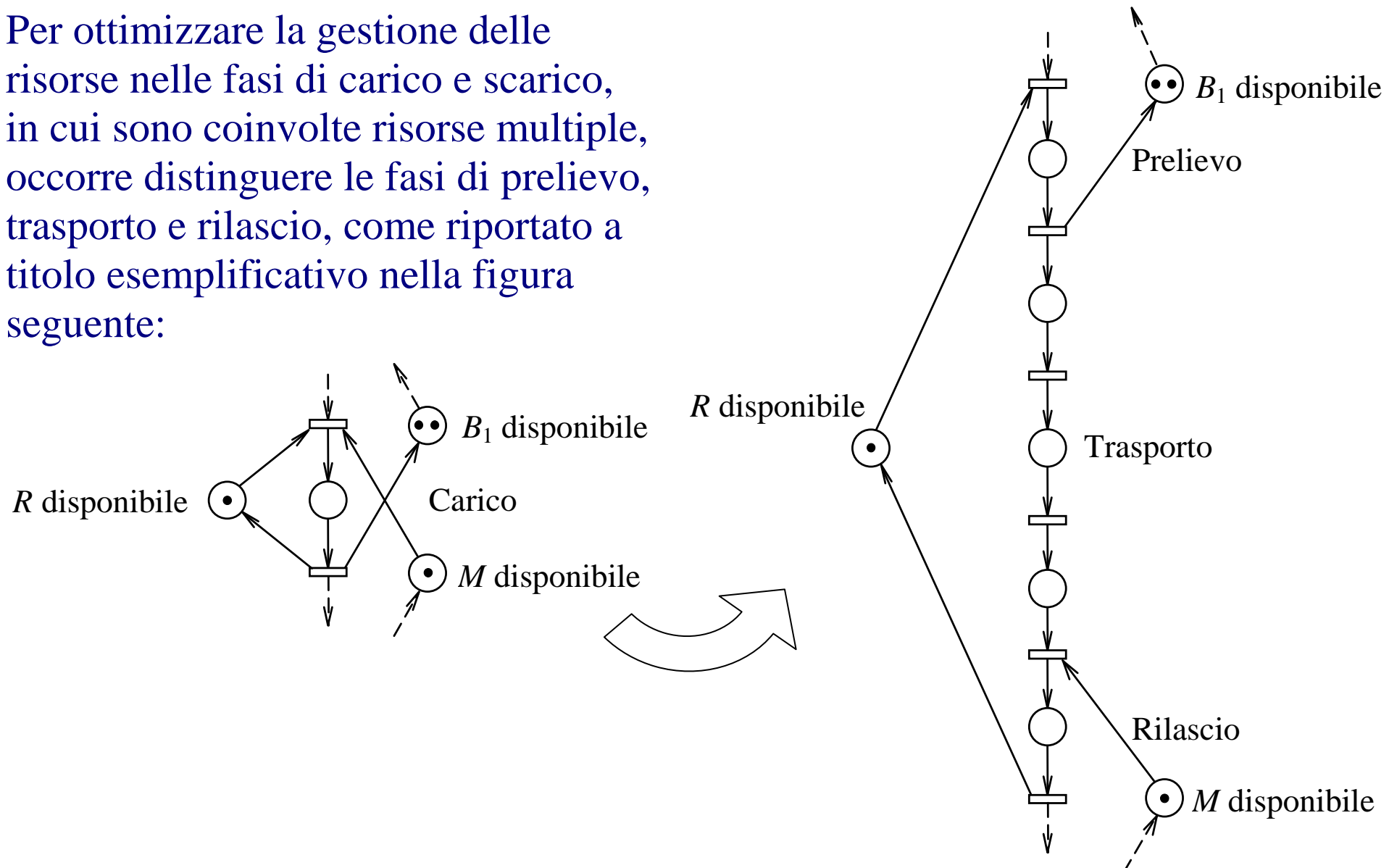
$t_7$ : InizioScarico

$t_8$ : FineScarico

$t_9$ : InizioUscita

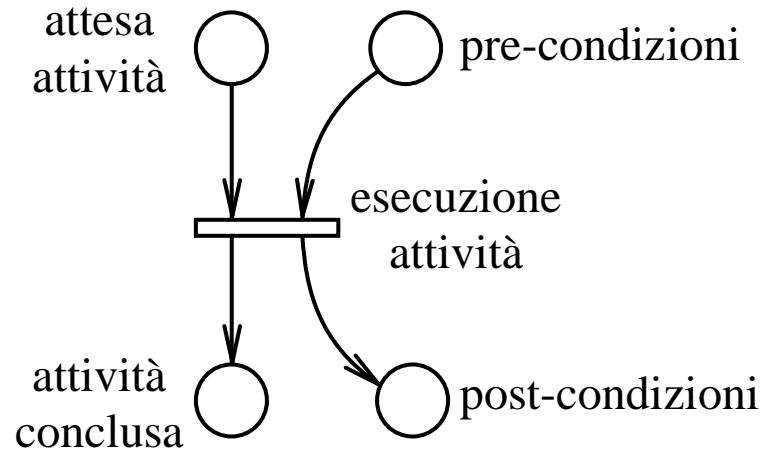
$t_{10}$ : FineUscita

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.



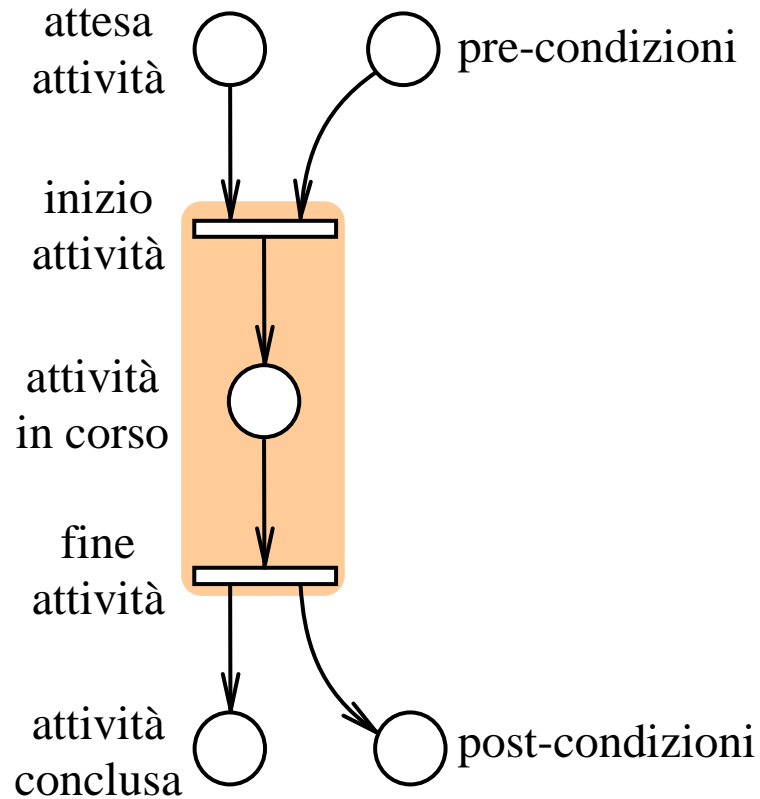
Eventi (associati a transizioni):

- ▶ *esecuzione attività*  
comprende sia l'inizio attività che la fine attività

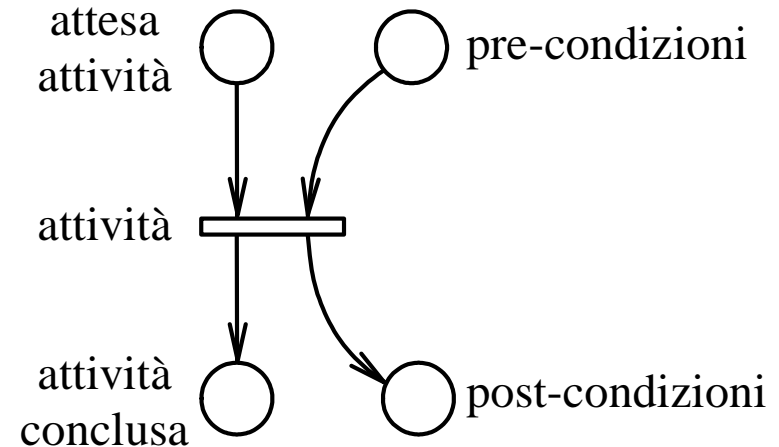
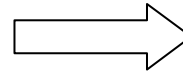
Stati (associati a posti):

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

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.



modello attività a 2 eventi

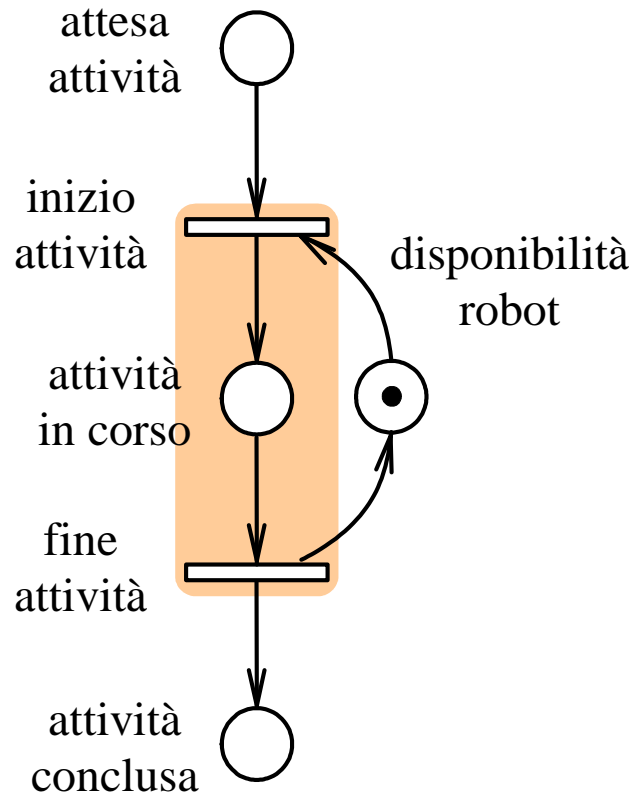


modello attività a 1 evento

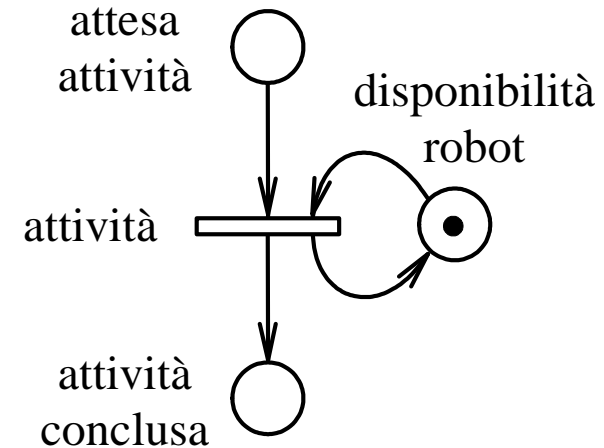
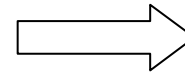
## Commenti:

- ▶ 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  $\Rightarrow$  attenzione nell’implementazione

## Esempio (trasporto di un pezzo con un robot)



modello attività a 2 eventi

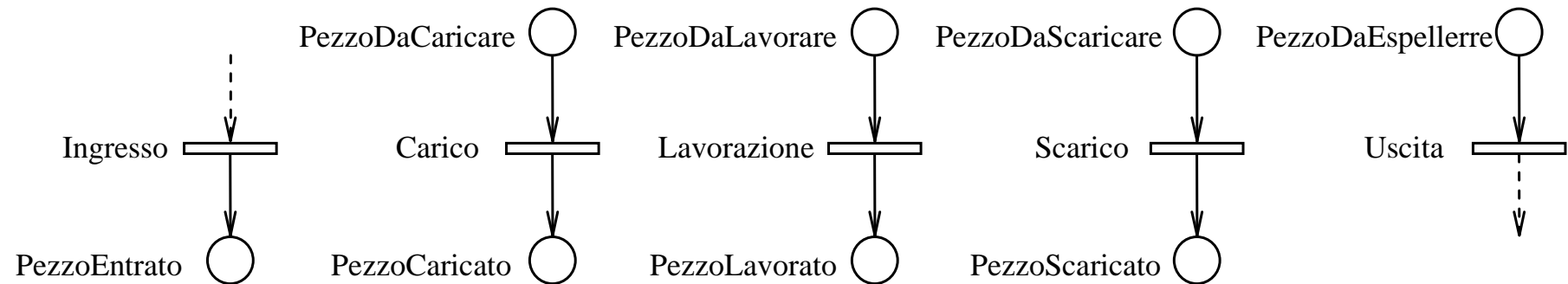


modello attività a 1 evento

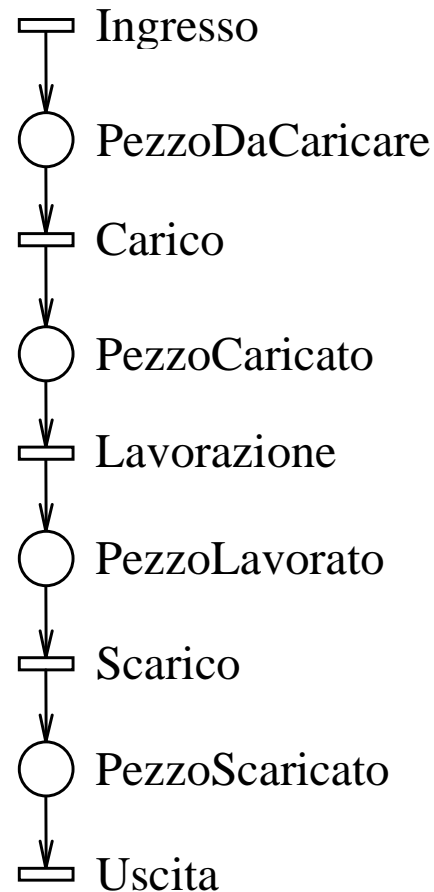


## Esempio: FMS con macchina, robot e due buffer (cont.)

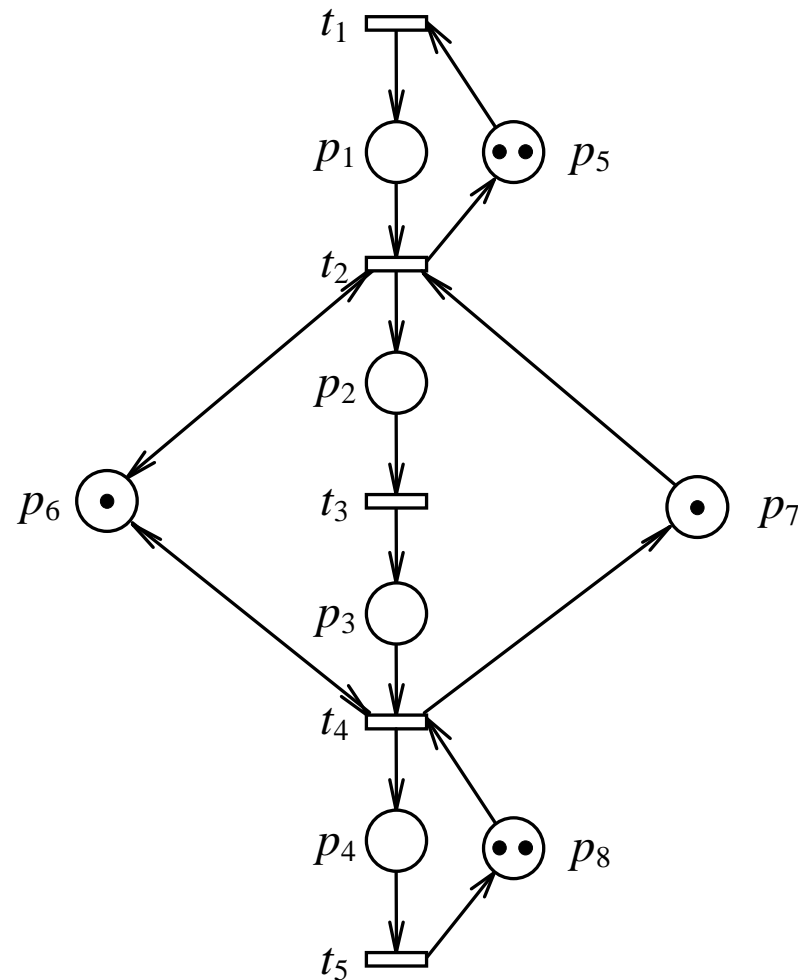
Modello delle attività (5 attività  $\Rightarrow$  5 transizioni):



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

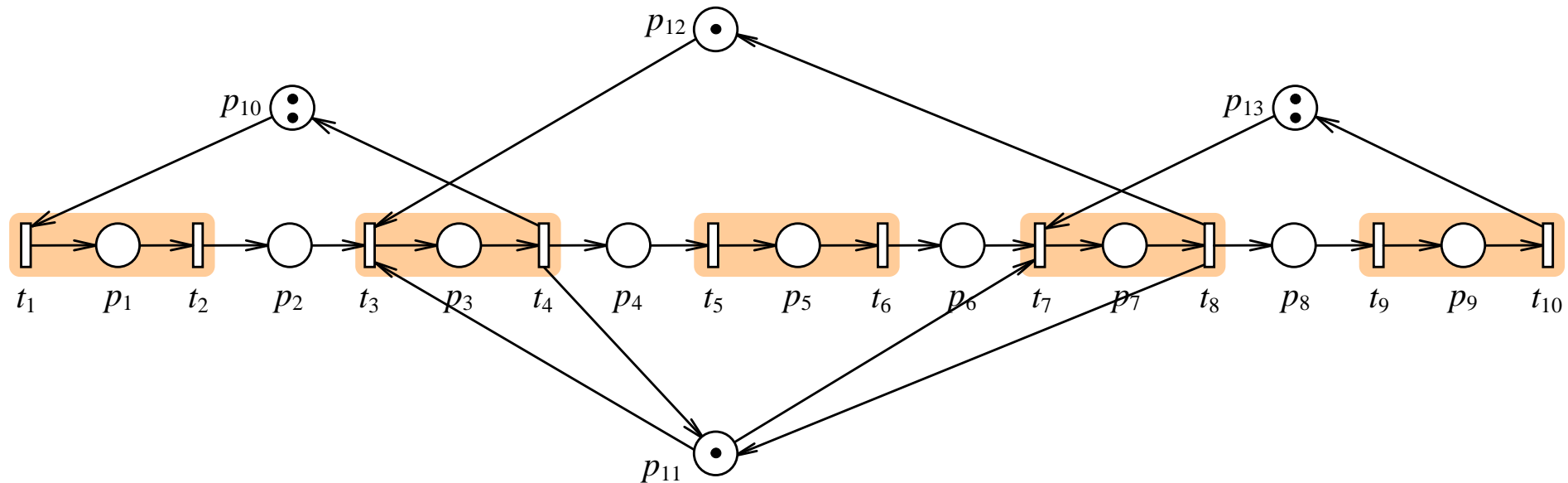
$t_2$ : Carico

$t_3$ : 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

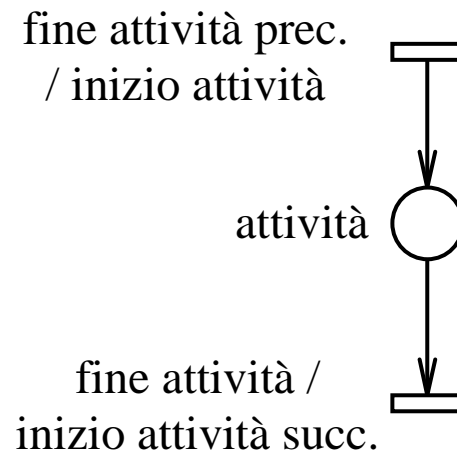
$t_{10}$ : FineUscita

## 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)

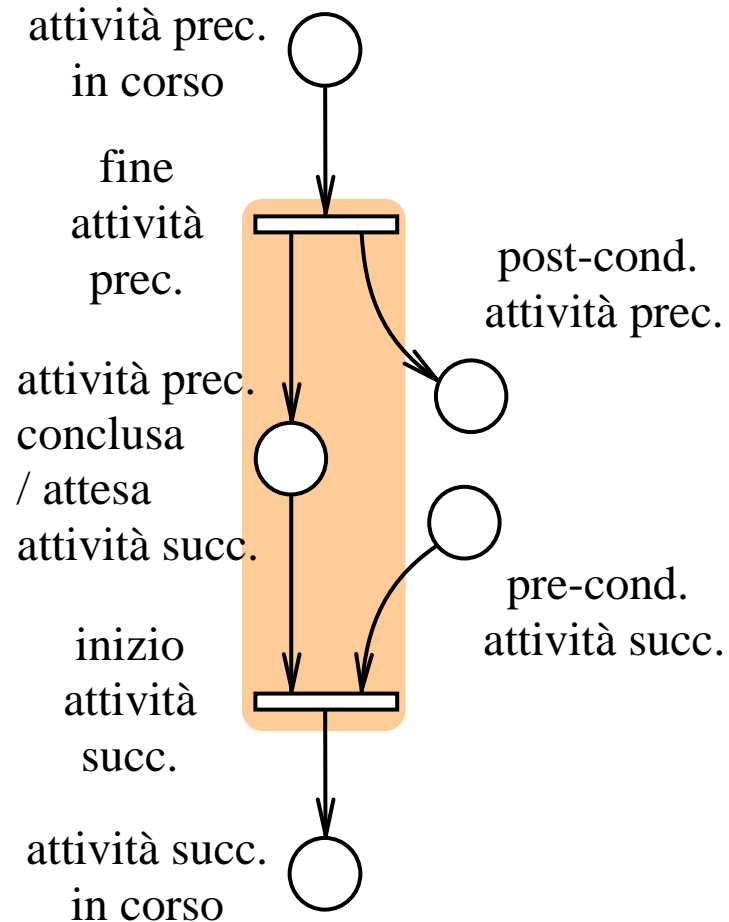
Nei modelli FMS si modella un'attività con un singolo posto, detto anche *posto-operazione*.



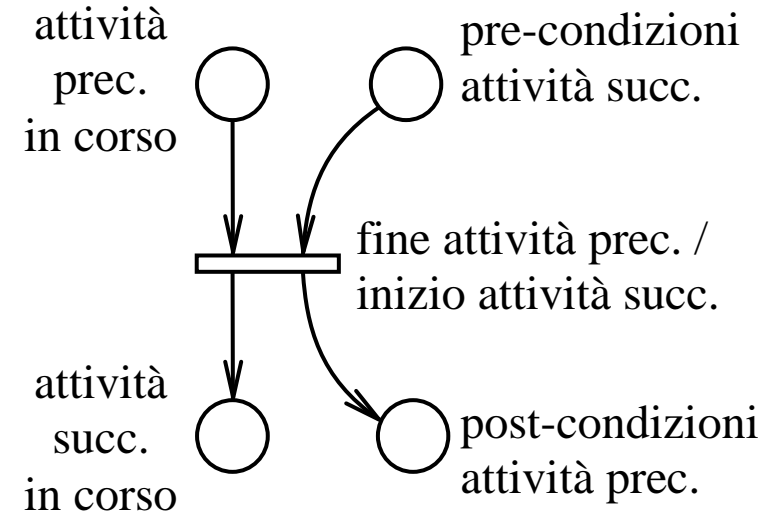
### Osservazioni:

- ▶ 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.



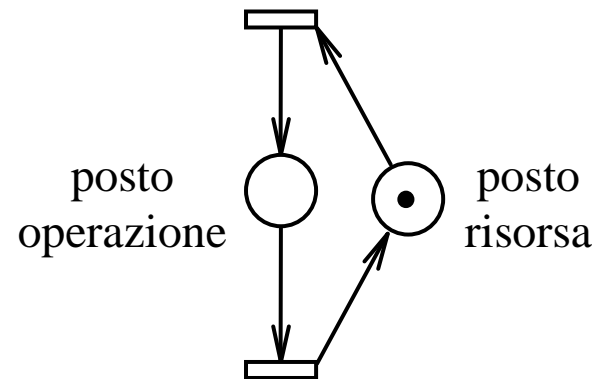
modello attività a 2 eventi



modello FMS

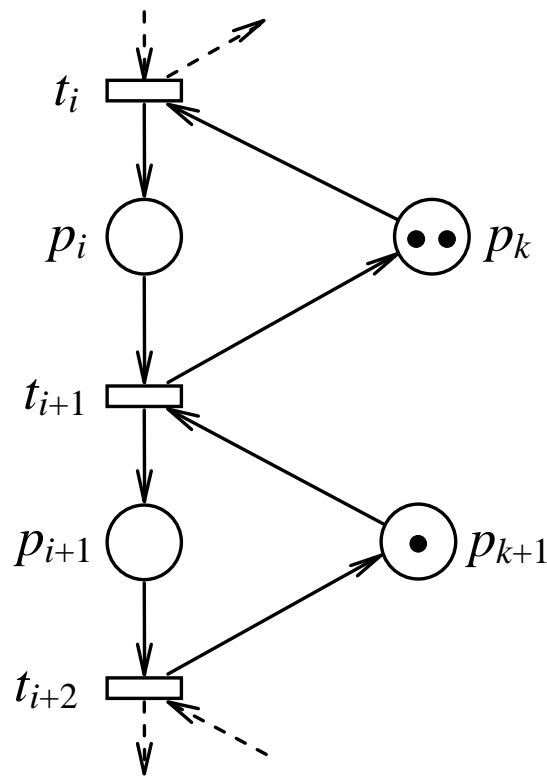
Le risorse sono sempre rappresentate con posti (*posti-risorsa*).

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.)

In un modello FMS ogni attività rappresentata è tipicamente associata all'uso di una sola risorsa.

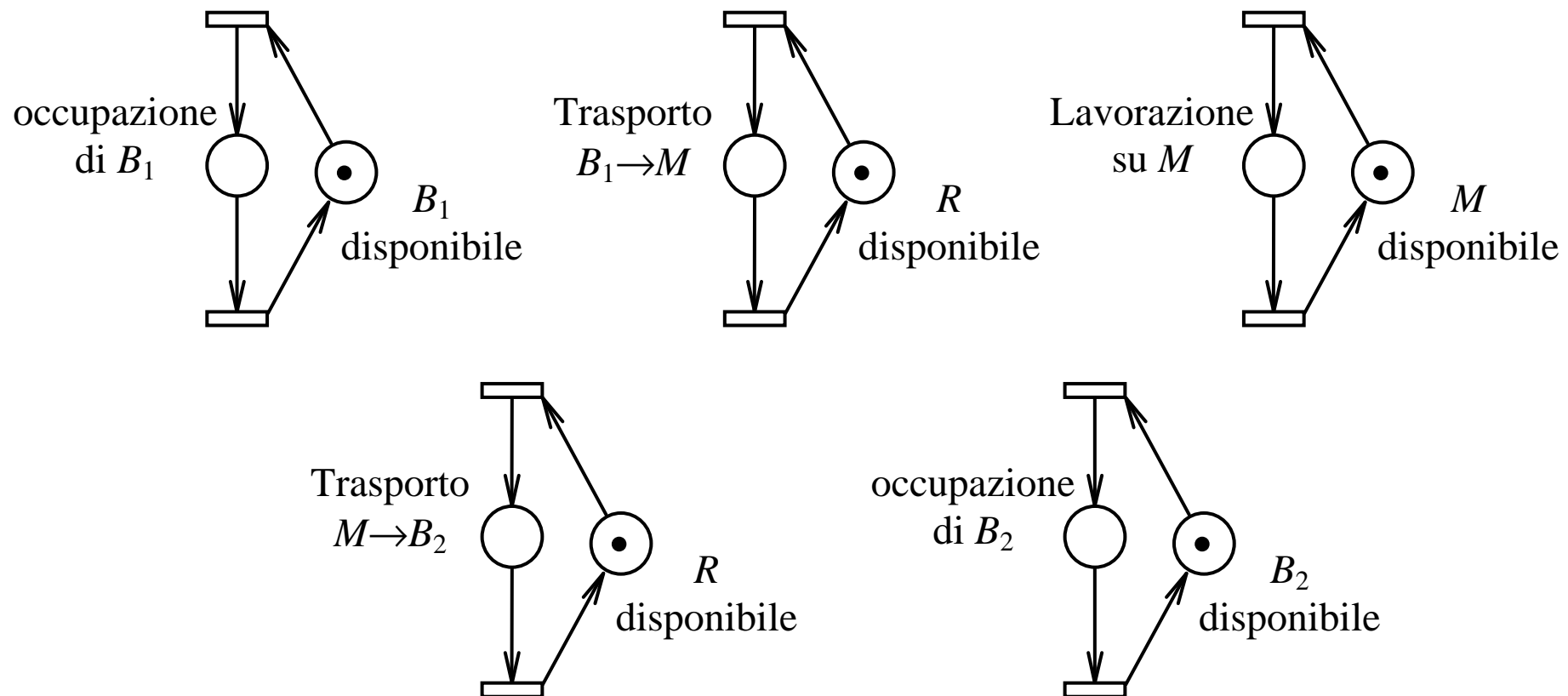
Abbiamo visto in precedenza, però, che alcune attività come l'effettivo carico/scarico di pezzi con il robot richiedono l'allocazione di due risorse alla volta (robot e macchina, oppure robot e buffer).

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

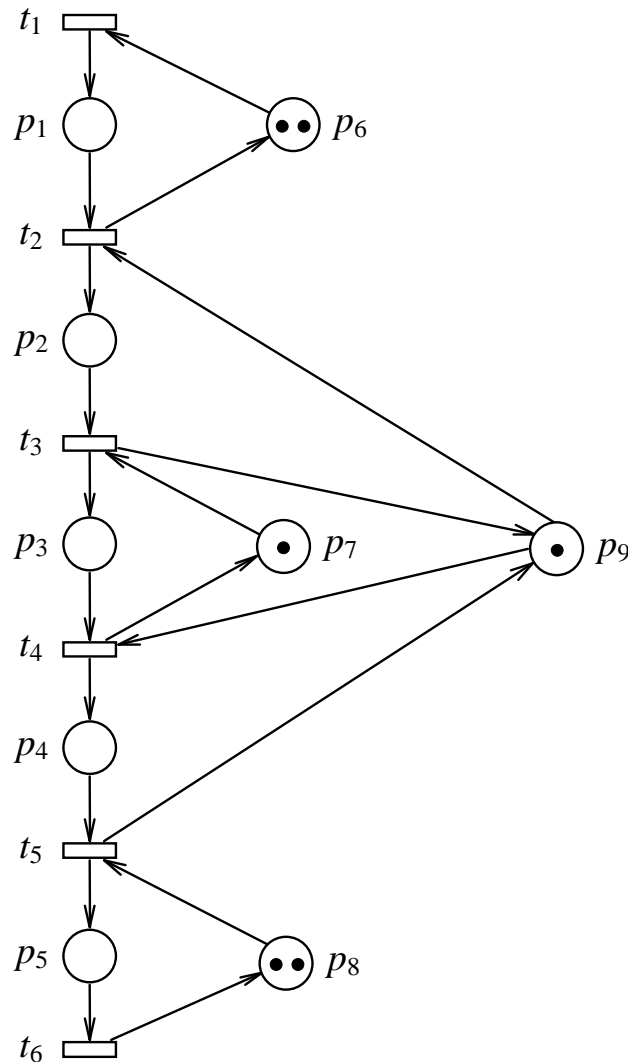
Bisogna allora ridefinire correttamente le attività e le relative risorse utilizzate:

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 poiché 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:



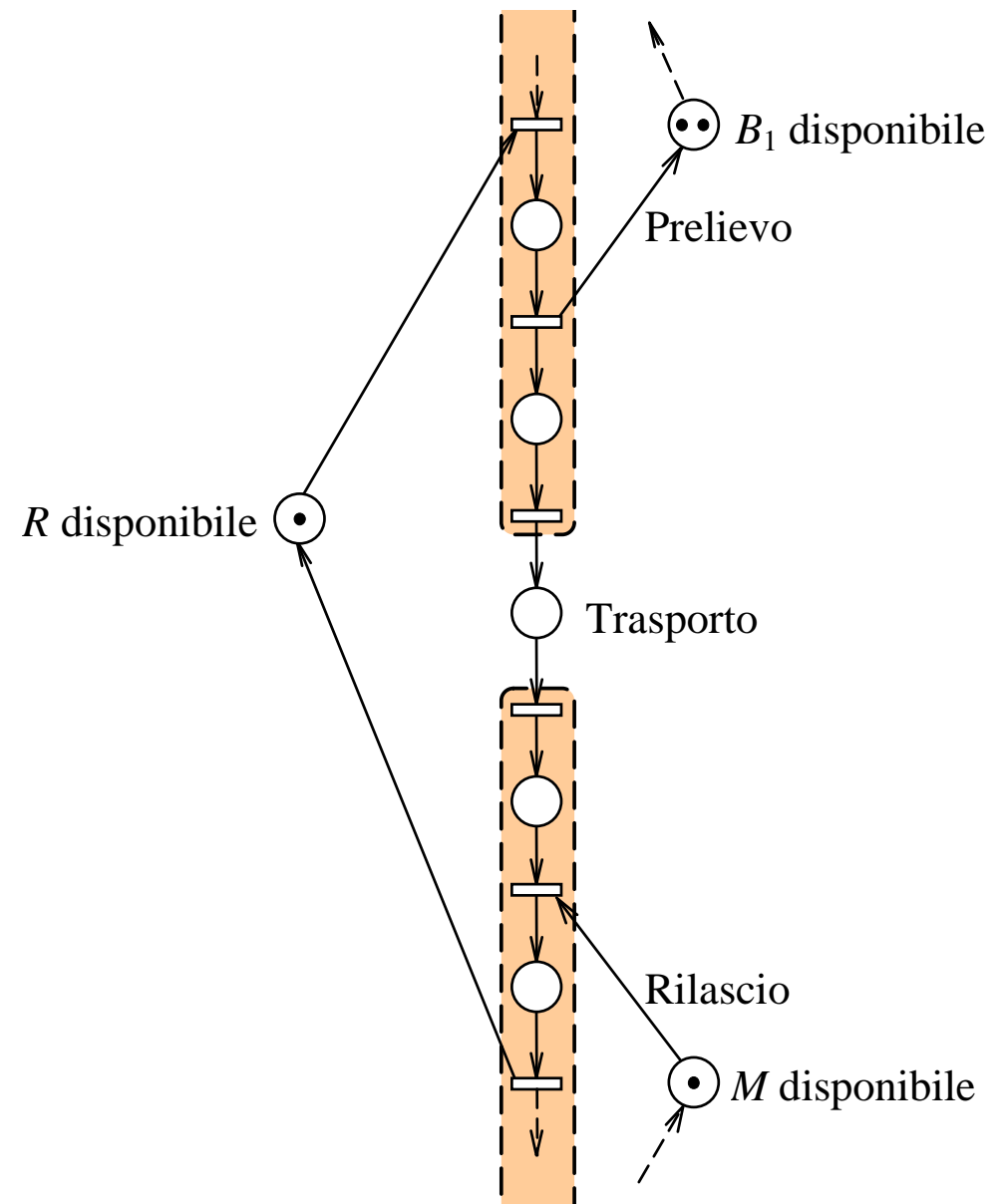
Significato posti:

- $p_1$ : 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  $B_1$  / (Presenza Pezzo) / Inizio Trasporto  $B_1-M$
- $t_3$ : Fine Trasporto  $B_1-M$  / (Rilascio Pezzo) / Inizio Lavorazione
- $t_4$ : Fine Lavorazione / (Presenza Pezzo) / Inizio Trasporto  $M-B_2$
- $t_5$ : Fine Trasporto  $M-B_2$  / (Rilascio Pezzo) / Inizio Attesa Uscita
- $t_6$ : Fine Attesa Uscita / Uscita / -

A patto di modificare il modello a 2 eventi descritto in precedenza, per tenere conto della ridefinizione delle operazioni, finalizzata a mascherare le operazioni in cui sono coinvolte coppie di risorse, anche questo modello può essere ricavato per riduzione da un corrispondente modello a 2 eventi.



## 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