

ANALISI SPERIMENTALE TRAMITE SIMULAZIONE SU RETE DI PETRI DEGLI EFFETTI DEL TRAIN COUPLING SULLA CAPACITA' DI UN BINARIO BIDIREZIONALE

SOFTWARE ENGINEERING FOR EMBEDDED SYSTEMS

A.A.2022/2023

Goldin Matteo



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

1. INTRODUZIONE

L'accoppiamento dei treni, noto anche come *train coupling*, è una tecnica che consiste nell'unire due o più veicoli ferroviari. Nel corso degli anni, sono stati sviluppati diversi tipi di accoppiamenti dei treni, ognuno dei quali con caratteristiche specifiche che soddisfano diverse esigenze. Tra i più comuni ci sono gli accoppiamenti a gancio e catenaccio, gli accoppiamenti automatici e gli accoppiamenti magnetici. Ogni sistema di accoppiamento presenta vantaggi e svantaggi, e la scelta del tipo di accoppiamento dipende da diversi fattori, come il tipo di carico, il livello di automazione desiderato e la compatibilità con il materiale rotabile esistente.

Lo scopo di questo studio sperimentale è quello di valutare l'impatto del *train coupling* sulla capacità di un tratto di linea ferroviaria bidirezionale, dove tale capacità è definita come la quantità di traffico che la linea può gestire in modo sicuro e affidabile.

Il sistema in esame è stato modellato e simulato mediante reti di Petri col fine di:

1. Stimare la capacità della linea al variare del numero di accoppiamenti;
2. Individuare il numero di accoppiamenti ottimo che massimizzi la capacità della linea.

2. MODELLO

2.1. CONTESTO

Il contesto che si desidera modellare è rappresentato graficamente in *Figura 1*:

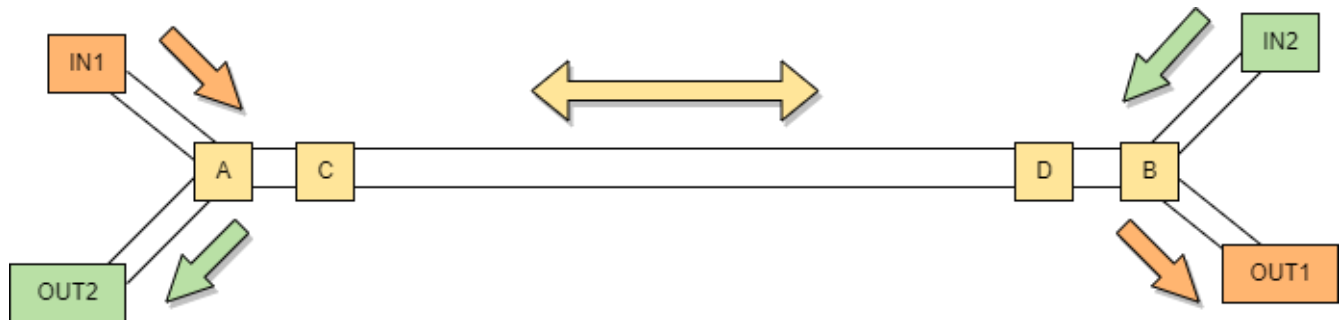


Figura 1: contesto di riferimento

Nel dettaglio si hanno:

- In arancione: due tratti di binario percorribili solo nella direzione da sinistra verso destra; IN1 rappresenta il punto di ingresso nel tratto, mentre OUT1 quello di uscita.
- In verde: due tratti di binario percorribili solo nella direzione da destra verso sinistra; IN2 rappresenta il punto di ingresso nel tratto, mentre OUT2 quello di uscita.
- In giallo: un tratto di binario bidirezionale a cui si accede in una delle due direzioni in modo mutualmente esclusivo. I punti A e B rappresentano i punti di ingresso o uscita dal tratto (a seconda della direzione) mentre C e D rappresentano i punti in cui si effettua l'accoppiamento o il disaccoppiamento (che per semplicità sono considerati gli stessi per ogni treno che costituisce il convoglio). L'accesso mutualmente esclusivo al tratto bidirezionale è garantito da un semaforo.

2.2. RETI DI PETRI

Il contesto di riferimento in *Figura 1* è stato modellato mediante due distinte reti di Petri:

- Un modello *semplificato*: in cui si considera che tutti i treni arrivino all'ingresso del tratto di binario bidirezionale con velocità nulla, effettuando quindi una partenza da fermo. Questa rappresenta una ipotesi conservativa, che non porta quindi a sovrastimare la capacità simulata.
- Un modello *avanzato*: in cui si tiene invece conto della possibilità che un treno possa trovare il tratto di binario bidirezionale libero (semaforo verde) al suo arrivo, e quindi accedervi senza fermarsi all'ingresso.

Per ciascun modello sono state realizzate due reti di Petri: una per simulare la capacità della linea senza accoppiamento dei treni e l'altra con accoppiamento di un numero arbitrario di treni. Ciascuna rete è costituita da due componenti identiche che rappresentano le due direzioni di percorrenza del tratto bidirezionale. Ciascun nodo e transizione della rete è identificato da *nomeX*, dove *nome* viene sostituito dal nome del nodo o della transizione e *X* assume valore 1 in caso il verso di percorrenza sia da sinistra verso destro e 2 nel secondo caso.

2.2.1. MODELLO SEMPLIFICATO: RETE PRIVA DI ACCOPPIAMENTO DEI TRENI

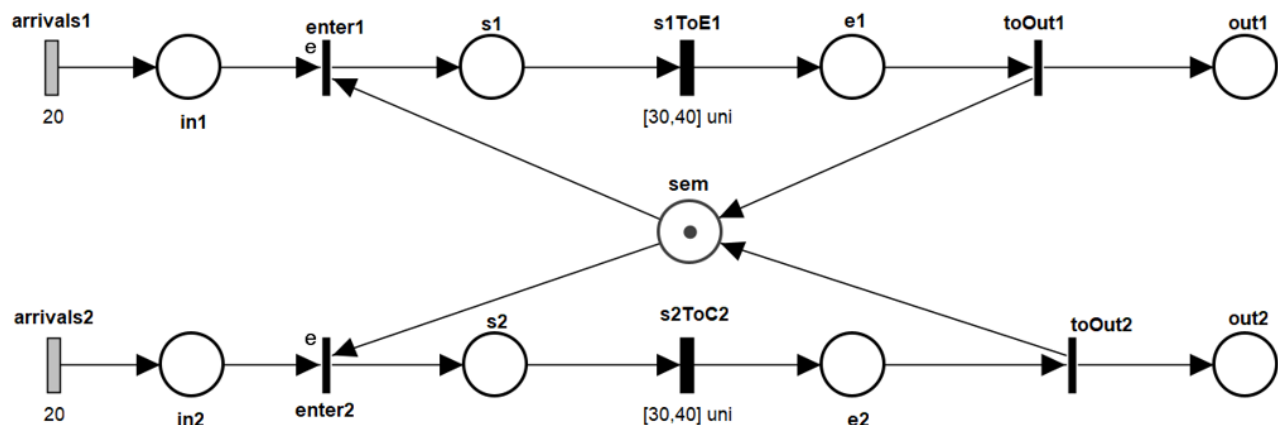


Figura 2: Rete priva di accoppiamento dei treni (modello semplificato)

In *Figura 2* è riportata la rete di Petri priva di accoppiamento dei treni secondo il modello *semplificato*.

Ciascuna delle due componenti (direzioni di percorrenza) è costituita dai seguenti nodi:

- *inX*: rappresenta il punto d'ingresso nella rete.
- *sX*: rappresenta l'inizio del tratto bidirezionale.
- *eX*: rappresenta la fine del tratto bidirezionale.
- *outX*: rappresenta il punto di uscita dalla rete.
- *sem*: rappresenta il semaforo che garantisce l'accesso mutualmente esclusivo al tratto di binario bidirezionale.

Ciascun componente presenta inoltre le seguenti transizioni:

- *arrivalsX*: rappresenta l'arrivo periodico di treni al punto di ingresso *inX*.

- *enterX*: rappresenta l'ingresso di un treno nel tratto di binario bidirezionale. L'enabling function " $inX \geq inY$ " consente di effettuare il firing solo alla transizione *enterX* con maggior numero di treni in attesa.
- *sXToEX*: rappresenta la percorrenza del tratto di binario bidirezionale e il raggiungimento della sua conclusione nello stato *eX*.
- *toOut*: rappresenta l'uscita del treno dal tratto bidirezionale.

2.2.2. MODELLO SEMPLIFICATO: RETE CON ACCOPPIAMENTO DEI TRENI

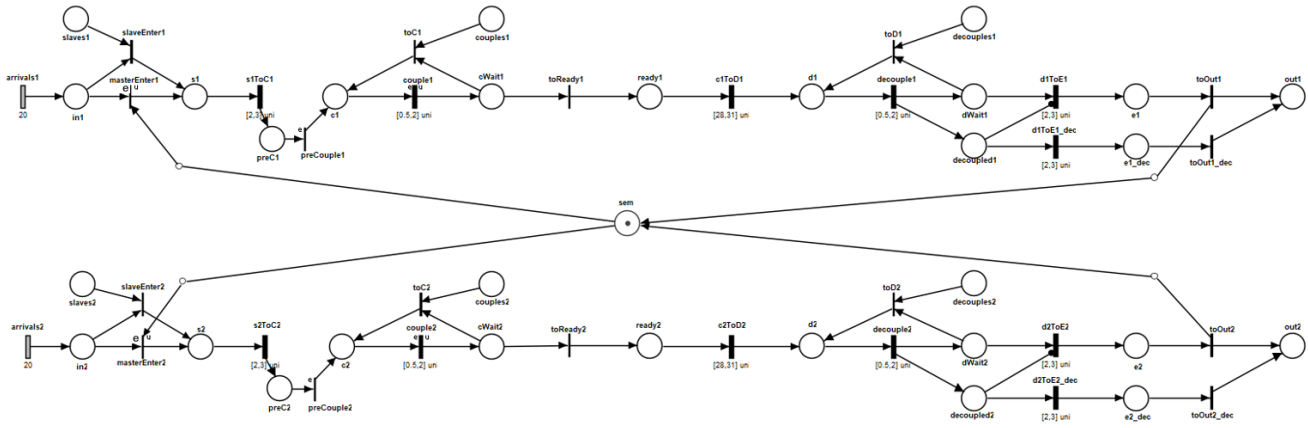


Figura 3: rete con accoppiamento dei treni (modello semplificato)

La rete in *Figura 3* rappresenta la rete di Petri con accoppiamento dei treni secondo il modello *semplificato*. Si noti che la rete mantiene la sua struttura indipendentemente dal numero di treni da accoppiare. Gli unici parametri da modificare sono la update function delle transizioni *masterEnterX*:

$$slavesX = N - 1, \quad couplesX = N - 2, \quad decouplesX = N - 2$$

dove N rappresenta il numero di treni che costituiscono il convoglio.

La sua struttura sarà analizzata nel dettaglio nei successivi paragrafi.

2.2.2.1. DALL'INGRESSO SULLA LINEA AL PUNTO DI AGGANCIO

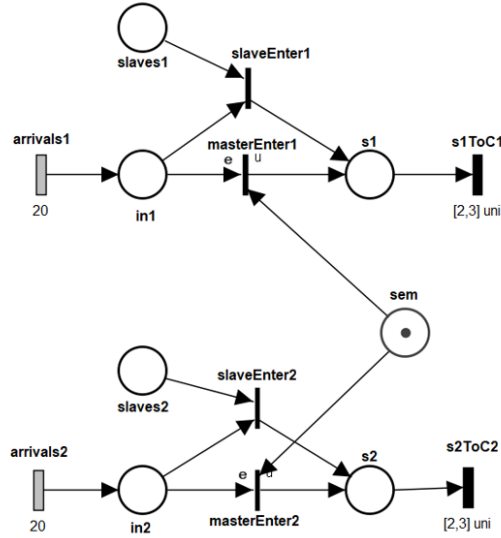


Figura 4: dall'ingresso al punto di aggancio (modello semplificato)

Il primo frammento della rete contiene le seguenti transizioni:

- Le transizioni $arrivalsX$ rappresentano l'arrivo dei treni verso gli ingressi, costituiti dai nodi inX , di ciascuna delle due linee.
- Le transizioni $masterEnterX$ rappresentano l'ingresso del primo treno del convoglio sulla linea condivisa. Tali transizioni comportano l'acquisizione del token in sem garantendo l'accesso mutualmente esclusivo in una delle due direzioni. Inoltre tali transizioni hanno la seguente update function:

$$slavesX = N - 1, \quad couplesX = N - 2, \quad decouplesX = N - 2$$

dove N rappresenta il numero di treni che devono costituire il convoglio.

Di conseguenza all'arrivo di successivi treni l'unica transizione di ingresso alla linea abilitata sarà $slaveEnterX$ e solo per il tratto che ha acquisito il semaforo. Ciò consentirà il passaggio di $N - 1$ treni (provenienti esclusivamente dalla direzione abilitata) per completare il convoglio. Per quanto riguarda, invece, le condizioni “ $couplesX = N - 2$, $decouplesX = N - 2$ ” queste rappresentano il numero di accoppiamenti e disaccoppiamenti necessari successivi al primo e verranno trattate nel dettaglio in seguito.

Anche in questo caso l'enabling function “ $inX \geq inY$ ” permette l'ingresso nel tratto, quando la linea è libera, solo nella direzione che ha il maggior numero di treni in attesa.

- Le transizioni $sXToCX$ rappresentano invece la percorrenza del tratto tra ingresso e punto di aggancio.

2.2.2.2. PROCEDURA DI AGGANCIO

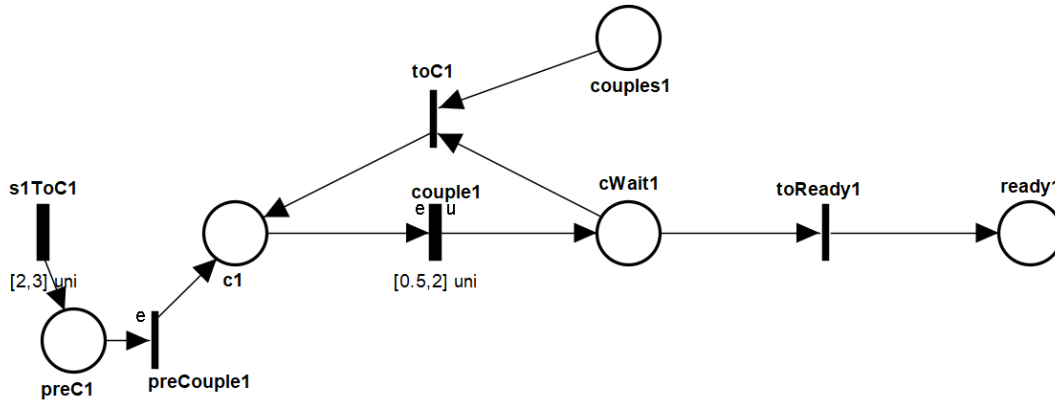


Figura 5: procedura di aggancio

La fase di aggancio si compone delle seguenti transizioni:

- Le transizioni *coupleX* prendono due token da *cX* (enabling function: " $cX \geq 2$ ") e ne portano uno in *cWaitX* realizzando l'accoppiamento tra due treni.
Nota: a causa di un problema con Oris (GUI per la modellazione e analisi di reti di Petri) non è stato possibile decrementare il numero di token in *cX* di 2 (update function di *coupleX*: " $cX = cX - 2$ "). È stato quindi aggiunto il nodo *preCX*, in cui si accumulano i token, e la transizione *preCoupleX*, con enabling function " $cX < 2$ ", che permette di portare in *cX* al massimo due token. La update function di *coupleX* è quindi stata modificata in " $cX = 0$ ".
- La transizione *toCX* permette di realizzare l'accoppiamento tra un treno e un convoglio. Essa può essere eseguita per $N - 2$ volte (come visto nel paragrafo precedente *couplesX* viene popolata all'ingresso del primo treno sulla tratta) che rappresentano il numero di accoppiamenti tra un treno e un convoglio (a sua volta costituito da due o più treni).
 La transizione *toCX* ha priorità maggiore di *toReadyX*, garantendo che si possa progredire nella tratta solo una volta effettuati tutti gli accoppiamenti. Una volta che *toCX* non sarà più abilitata avremo ottenuto un convoglio costituito dal numero di treni desiderato e saremo pronti a percorrere la tratta (stato *ReadyX*).

2.2.2.3. DAL PUNTO DI AGGANCIO A QUELLO DI SGANCIO

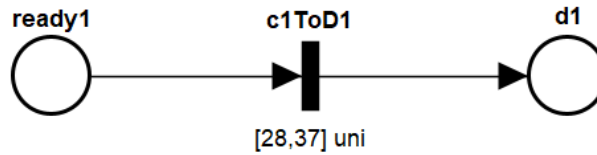


Figura 6: dal punto di aggancio a quello di sgancio

Il tratto di binario che va dal punto di aggancio a quello di sgancio dei treni che compongono il convoglio è modellato attraverso la transizione stocastica con distribuzione uniforme *cXToDX*, che rappresenta il tempo di percorrenza del tratto, e il nodo *dX* che rappresenta il punto in cui si effettua il disaccoppiamento.

2.2.2.4. PROCEDURA DI SGANCIO E USCITA DAL TRATTO CONDIVISO

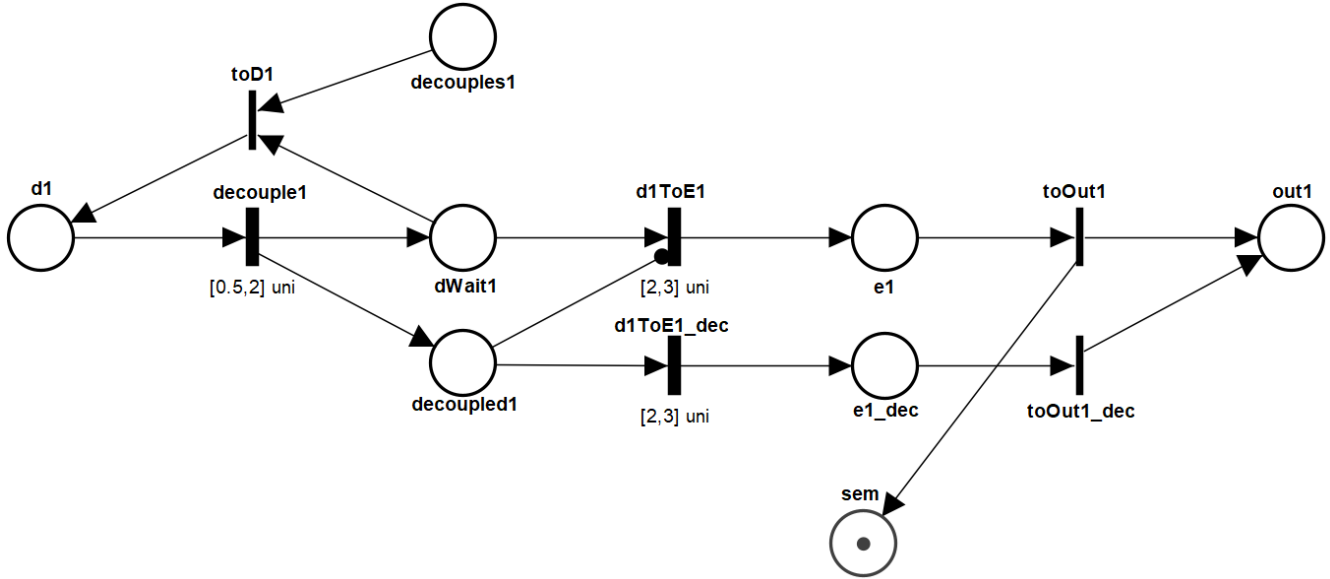


Figura 7: procedura di sgancio e uscita dal tratto condiviso

La procedura di sgancio si compone delle seguenti fasi:

- Quando il token rappresentante il convoglio raggiunge dX il convoglio viene disaccoppiato tramite la transizione $decoupleX$, che inserisce un token in $dWaitX$, che rappresenta il convoglio privo del treno di testa o l'ultimo treno a seconda di quanti disaccoppiamenti sono ancora necessari, e uno in $decoupledX$, che rappresenta il treno in testa al convoglio e che può essere instradato verso l'uscita.
- Dopo la prima esecuzione di $decoupleX$ in $dWaitX$ viene posto un token che rappresenta il convoglio costituito da $N - 1$ treni. Tale convoglio necessita di eseguire $N - 2$ disaccoppiamenti rappresentati dai token in $decouplesX$, popolato al momento dell'ingresso del primo treno sulla tratta.
- L'arco inibitore tra $decoupledX$ e la transizione $dXToEX$ permette di garantire che l'ultimo treno del convoglio sia l'ultimo a uscire dal tratto condiviso, e che solo allora si inserisca il token nel semaforo che abilita la tratta.

2.2.3. MODELLO AVANZATO: RETE PRIVA DI ACCOPPIAMENTO DEI TRENI

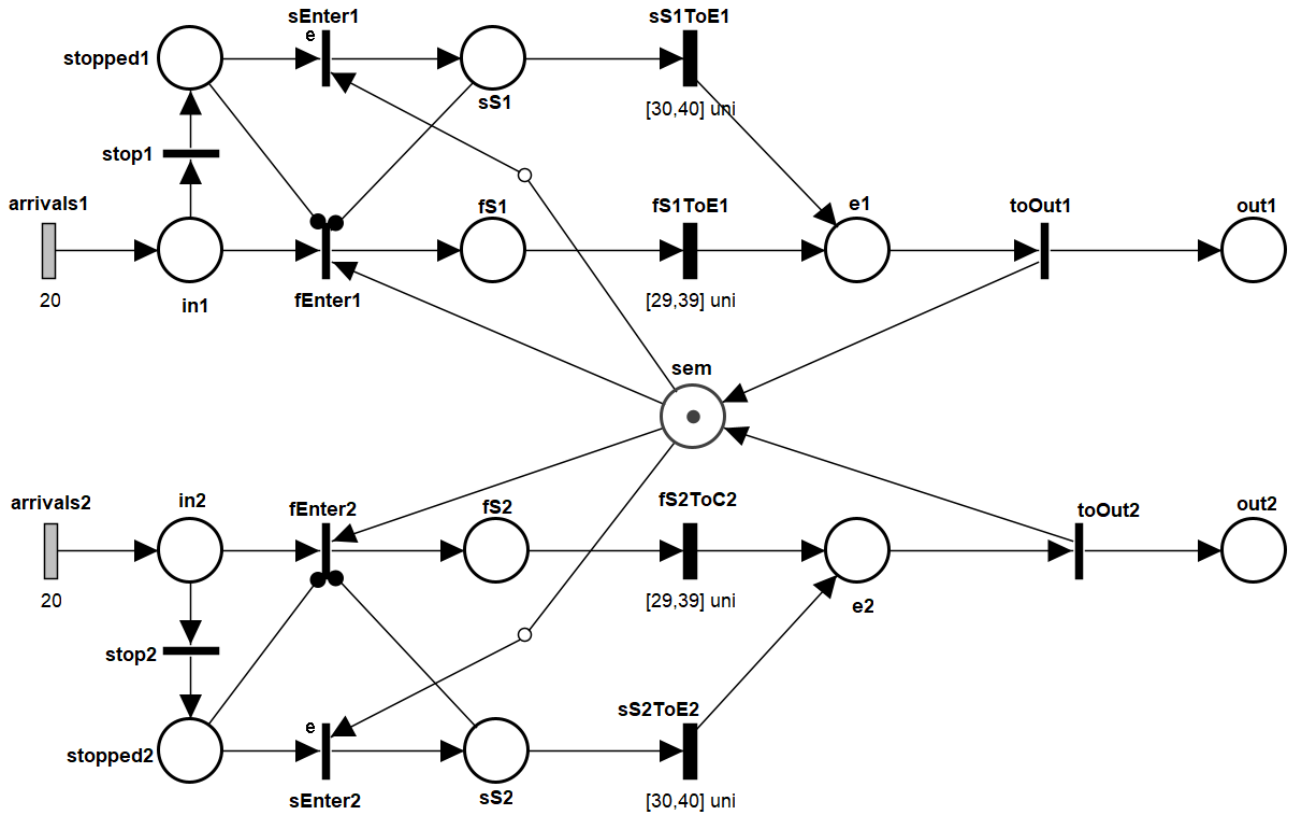


Figura 8: rete priva di accoppiamento dei treni (modello avanzato)

Gli elementi aggiuntivi rispetto alla rete rappresentata in *Figura 2* sono:

- Gli stati *stoppedX*: rappresentano i treni fermi in attesa che il tratto bidirezionale sia libero.
- Le transizioni *stopX*: tali transizioni, immediate e con priorità minore di *fEnterX*, portano un token, rappresentante un treno, nello stato *stoppedX* qualora tale treno non possa accedere immediatamente al tratto bidirezionale (semaforo rosso).
- Le transizioni *sEnterX*: rappresentano l'ingresso nel binario bidirezionale con partenza da fermo. Le transizioni hanno enabling function: "*stopped1* \geq *stopped2*" per *sEnter1* e viceversa per *sEnter2*, in modo da garantire che il diritto di percorrenza del tratto bidirezionale sia dato alla direzione con il maggior numero di treni in attesa.
- Gli stati *sSX*: rappresentano un treno all'ingresso del tratto bidirezionale con velocità nulla.
- Le transizioni *sSXTToEX* rappresentano il tempo di percorrenza con partenza da fermo, mentre le transizioni *fSXTToEX* rappresentano il tempo di percorrenza con partenza lanciata.
- Gli archi inibitori da *stoppedX* e *sSX* verso *fEnterX* impediscono l'esecuzione di *fEnterX*, in caso ci siano treni in attesa.

2.2.4. MODELLO AVANZATO: RETE CON ACCOPPIAMENTO DEI TRENI

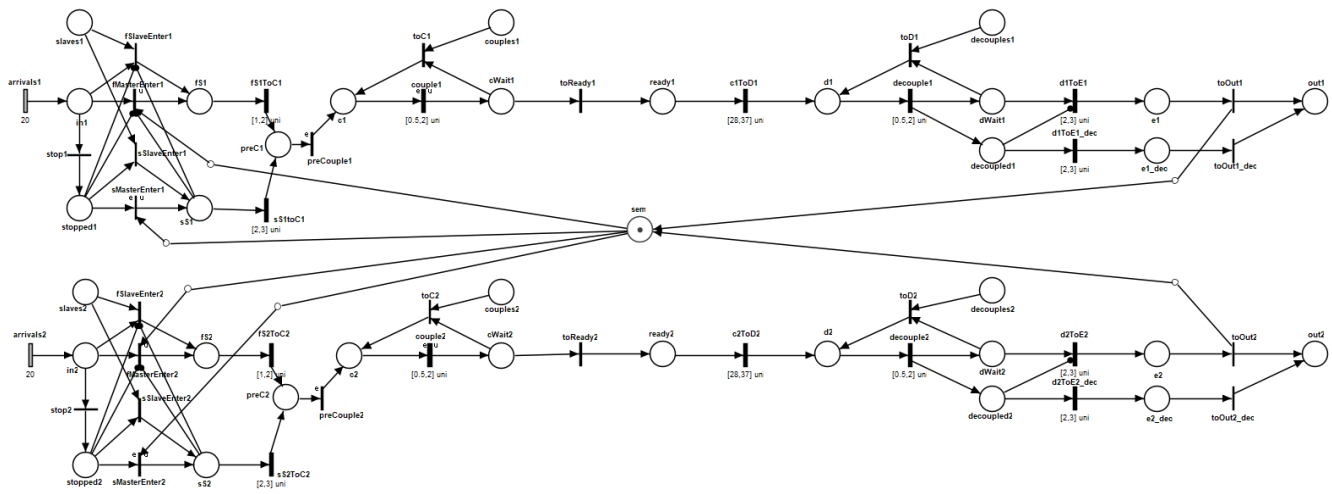


Figura 9: rete con accoppiamento dei treni (modello avanzato)

Anche in questo caso le modifiche alla rete riguardano unicamente la fase d'ingresso nel tratto bidirezionale e sono le stesse descritte nella rete priva di accoppiamento dei treni.

Nel frammento di rete di *Figura 10* è raffigurata tale fase d'ingresso.

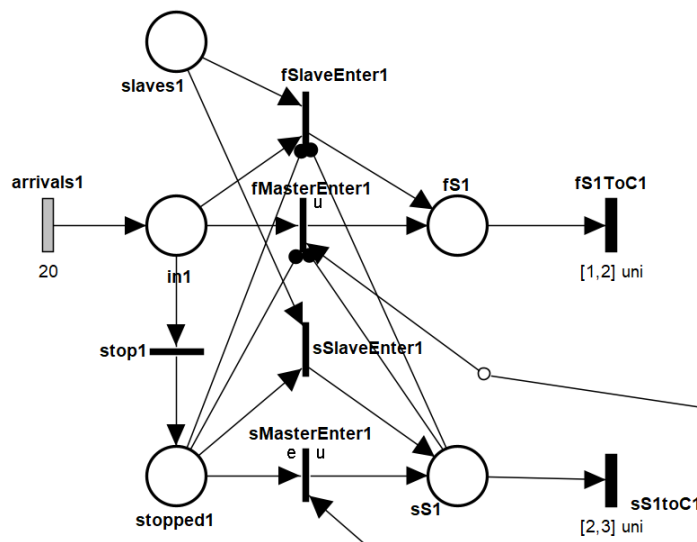


Figura 10: dall'ingresso al punto di aggancio (modello avanzato)

3. SPERIMENTAZIONE

3.1. SETUP DEGLI ESPERIMENTI

Per valutare l'impatto dell'accoppiamento dei treni sulla capacità della linea è stato considerato un tratto di binario bidirezionale con lunghezza di 50 km. Per semplicità i punti di *coupling* e *decoupling* sono stati considerati fissi ad una distanza di 2 km dalle estremità del tratto di binario bidirezionale (ipotesi semplificativa). Il limite di velocità sul tratto è stato considerata pari a 100 km/h.

Per simulare i tempi di percorrenza dei vari tratti è stata utilizzato SUMO, una suite open source per la simulazione del traffico. Sono stati considerati treni con lunghezza di 50 m⁽¹⁾ e velocità massima di percorrenza del tratto compresa tra i 75 km/h e i 100 km/h per simulare variazioni nella condotta del conducente e eventuali variabili esterne che possano decretare un ritardo (es. meteo avverso).

Nelle reti di Petri le transizioni che simulano la percorrenza dei vari tratti del binario bidirezionale saranno considerate come uniformi nell'intervallo $[t_{min}, t_{max}]$ dove t_{min} corrisponderà al tempo di percorrenza del tratto con velocità massima del treno pari a 100 km/h e, viceversa, t_{max} a quello con velocità massima del treno pari a 75 km/h.

Per la simulazione è stata utilizzata la simulazione transiente di reti di Petri offerta dall'API Java Sirio. Per ciascuna rete sono state simulate le capacità al variare del numero di treni accoppiati in un periodo di tempo di tempo di 5, 10 e 15 ore. Ciascuna simulazione è stata ripetuta 10000 volte.

Nota: la simulazione ha evidenziato come, nell'esperimento in questione, i risultati del modello semplice siano sovrapponibili a quelli del modello avanzato. Di conseguenza sono stati riportati i risultati del solo modello semplificato.

(1) È stato verificato che i tempi di percorrenza non cambiano sostanzialmente per treni compresi tra i 50 m e i 200 m.

3.2. ANDAMENTO DELLA CAPACITÀ AL VARIARE DEL NUMERO DI ACCOPPIAMENTI FISSATO IL PERIODO

In questa sezione viene analizzato qual è l'andamento della capacità al variare del numero di accoppiamenti fissando il periodo di arrivo dei treni.

3.2.1. PERIODO DI ARRIVO TRENI PARI A 20 MINUTI

Inizialmente si considera il periodo di arrivo dei treni in entrambe le direzioni pari a 20 minuti ($T_1 = T_2 = 20$).

Per il calcolo della capacità si considerano unicamente i treni che hanno completato la tratta e raggiunto l'uscita al termine del periodo di simulazione.

Effettuiamo, in primo luogo, una simulazione per un intervallo di tempo di 5 ore.

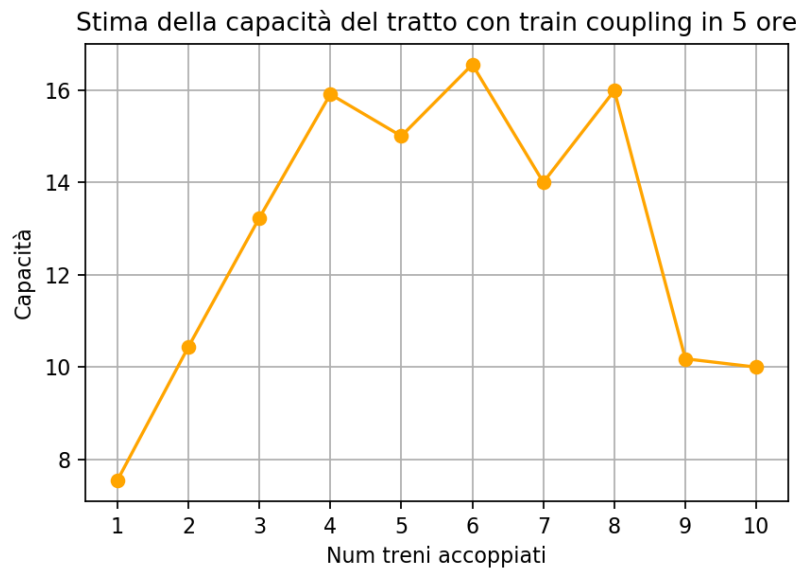


Figura 11

Come si può notare dal grafico in *Figura 11*, simulando la capacità del treno su un periodo di 5 ore, l'accoppiamento anche di soli due treni comporta importanti benefici in termini di aumentata capacità, passando dai 7.5 treni nel caso senza accoppiamento, ai circa 10.4 treni nel caso di singolo accoppiamento (38.7% in più). Si noti inoltre come la capacità sia massimizzata con l'accoppiamento di 6 treni, raggiungendo circa le 16.6 unità (119.2% in più rispetto al caso privo di accoppiamento), per poi decrescere nuovamente.

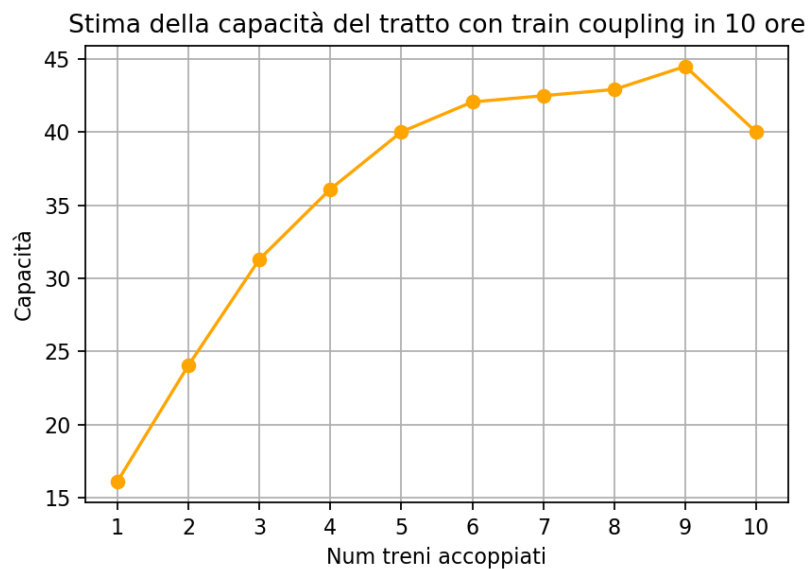


Figura 12

Prolungando il tempo della simulazione a 10 ore, si nota come l'accoppiamenti di 9 treni comporti una capacità di circa 44.5, rispetto al caso privo di accoppiamento che presenta una capacità di circa 16.1, con un aumento del 176.7%. Si noti inoltre che **la scelta della durata della simulazione influenzi il valore ottimo del numero di treni.**

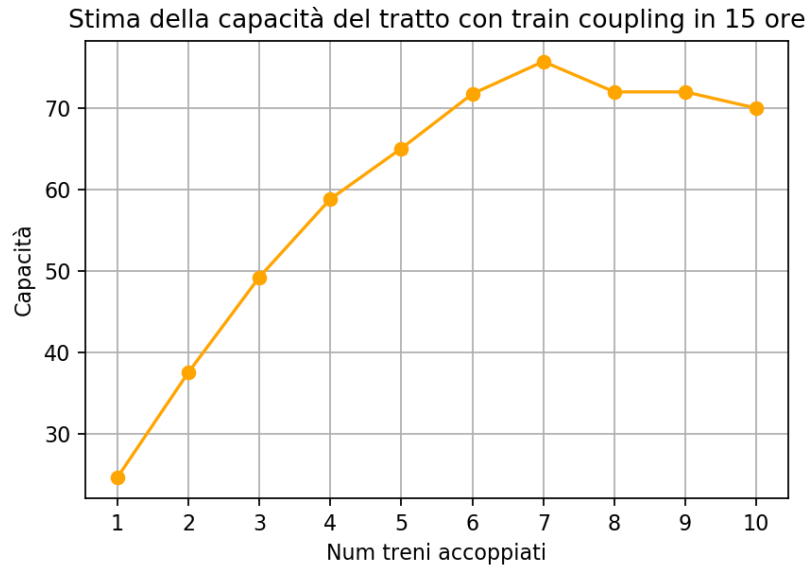


Figura 13

Infine, prolungando la durata della simulazione fino a 15 ore, si nota come il numero di accoppiamenti ottimo sia pari a 7 con una capacità di circa 75.7 unità rispetto alle circa 24.7 unità nel caso privo di accoppiamento, con un aumento della capacità di circa il 207.0%.

La tabella sottostante riassume i risultati delle precedenti simulazioni:

	5 ore	10 ore	15 ore
1	7.55	16.09	24.67
2	10.44	24.03	37.56
3	13.23	31.30	49.25
4	15.91	36.10	58.85
5	15.00	40.02	65.06
6	16.55	42.07	71.76
7	14.00	42.50	75.73
8	15.99	42.93	72.00
9	10.18	44.51	72.00
10	10.00	40.00	70.00

Tabella 1: capacità con periodo di arrivo treni di 20 minuti al variare del numero di accoppiamenti e della durata della simulazione

3.2.2. PERIODO DI ARRIVO TRENI PARI A 30 MINUTI

Consideriamo adesso un periodo di arrivo dei treni in entrambe le direzioni pari a 30 minuti ($T_1 = T_2 = 30$).

Simulando il comportamento della rete su un intervallo di tempo di 5 ore otteniamo il seguente andamento:

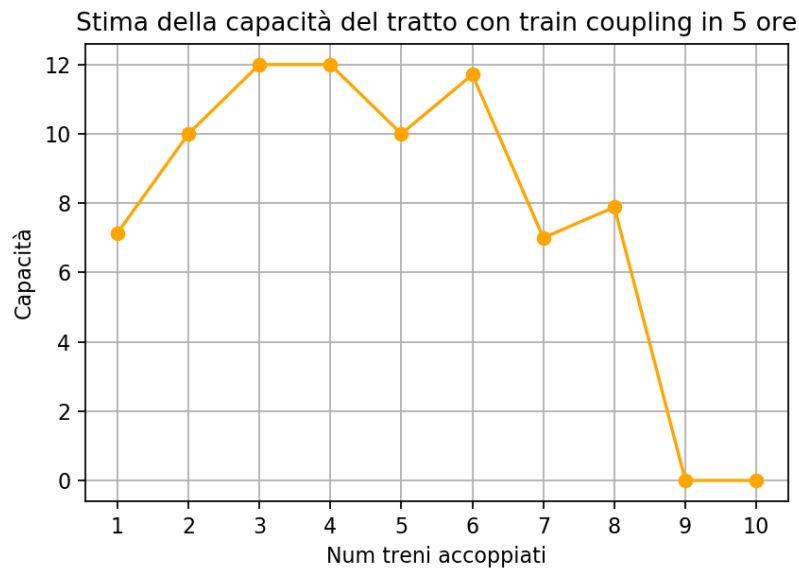


Figura 14

Anche in questo caso notiamo che l'utilizzo del *train coupling* può portare dei benefici in termini di aumentata capacità della rete. Nel caso ottimale si passa da una capacità di circa 7.1 treni nel caso privo di accoppiamento a una capacità di 12.0 (68.2% in più), con valore ottimo del numero di treni accoppiati pari a 4.

Si noti inoltre che i casi con accoppiamento di 9 e 10 treni non sono attuabili su un periodo di 5 ore.

Simulando l'andamento della capacità della rete su un periodo di 10 ore otteniamo la seguente curva:

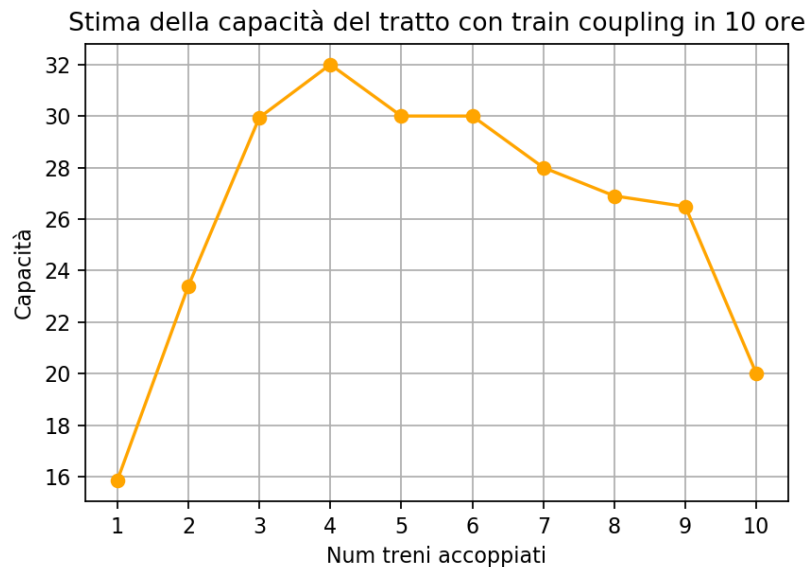


Figura 15

Possiamo osservare come l'utilizzo del *train coupling* permetta di aumentare la capacità della rete passando da una capacità di circa 15.9 treni nel caso privo di accoppiamenti a una capacità di 32.0 treni (101.9% in più) nel caso ottimale, con valore ottimo del numero di treni pari a 4.

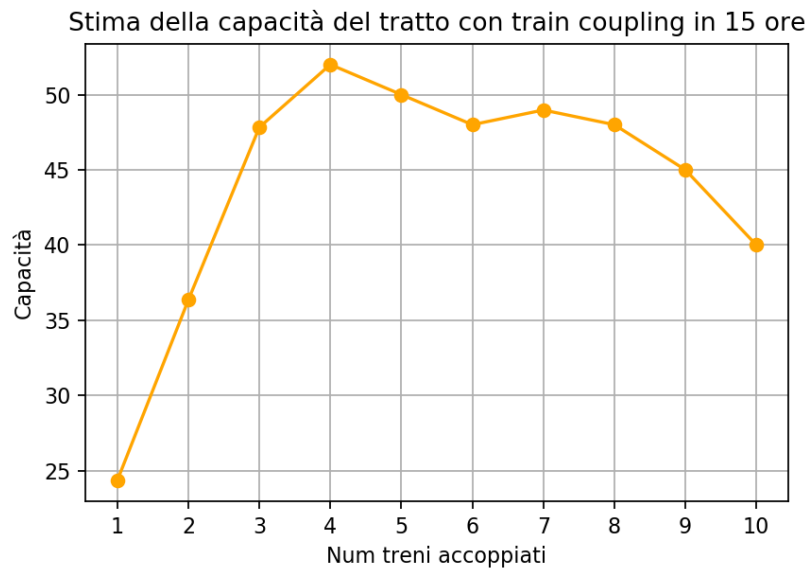


Figura 16

Infine, prolungando la durata della simulazione fino a 15 ore, si nota come il numero di accoppiamenti ottimo sia pari a 4 con una capacità di 52.0 unità rispetto alle circa 24.4 unità nel caso privo di accoppiamento, con un aumento della capacità di circa il 113.5%.

La tabella sottostante riassume i risultati delle precedenti simulazioni:

	5 ore	10 ore	15 ore
1	7.13	15.85	24.35
2	10.00	23.40	36.35
3	12.00	29.94	47.83
4	12.00	32.00	52.00
5	10.00	30.00	50.00
6	11.71	30.00	48.00
7	7.00	28.00	48.98
8	7.88	26.90	48.00
9	0.00	26.49	45.00
10	0.00	20.00	40.00

Tabella 2: capacità con periodo di arrivo treni di 30 minuti al variare del numero di accoppiamenti, del tipo di rete e della durata della simulazione

3.2.3. COMPARAZIONE DEI RISULTATI

La tabella sottostante riassume i risultati degli esperimenti effettuati:

Periodo arrivo treni	20 minuti		
Durata simulazione	5 ore	10 ore	15 ore
N° accoppiamenti ottimo	6	9	7
Capacità senza accoppiamento	7.55	16.09	24.67
Capacità ottima	16.55	44.51	75.73
Incremento capacità (%)	119.24	176.71	207.02
Periodo arrivo treni	30 minuti		
Durata simulazione	5 ore	10 ore	15 ore
N° accoppiamenti ottimo	4	4	4
Capacità senza accoppiamento	7.13	15.85	24.35
Capacità ottima	12.00	32.00	52.00
Incremento capacità (%)	68.19	101.89	113.53

Tabella 3: tabella riassuntiva

Dalle simulazioni effettuate sulle reti di Petri si evince come la tecnica del *train coupling* permetta di ottenere un sostanziale aumento della capacità della rete.

Confrontando le simulazioni con periodo di arrivo dei treni pari a 20 minuti e a 30 minuti si nota che:

- L'aumento percentuale della capacità (confrontando il caso ottimale rispetto a quello privo di *train coupling*) con periodo di arrivo dei treni pari a 30 minuti è inferiore rispetto al caso con periodo pari a 20 minuti. Questo indica che il *train coupling* è tanto più impattante sulla crescita della capacità quanto più è alta la frequenza di arrivo dei treni.
- Il valore ottimo del numero di treni è inferiore con periodo di arrivo dei treni pari a 30 minuti. Si ipotizza quindi che al decrescere della frequenza di arrivo dei treni sia conveniente realizzare un numero inferiore di accoppiamenti.

3.3. NUMERO DI ACCOPPIAMENTI OTTIMO AL VARIARE DEL PERIODO DI ARRIVO

Dopo aver valutato come varia la capacità della linea al variare del numero di accoppiamenti, analizziamo quindi come varia il numero di accoppiamenti ottimo al variare della frequenza di arrivo dei treni.

La seguente tabella riporta, fissata la durata della simulazione pari a 5 ore, per ciascun valore del periodo di arrivo il numero di accoppiamenti ottimo e la corrispondente capacità massima:

Periodo arrivo treni	Capacità massima	N° accoppiamenti ottimo
10	24.00	8
20	16.26	6
30	12.00	4
40	9.00	3
50	8.00	2
60	6.26	1

Tabella 4: numero di accoppiamenti ottimo al variare del periodo di arrivo dei treni (durata della simulazione pari a 5 ore)

La *Tabella 4* conferma l'ipotesi che: al crescere del periodo di arrivo dei treni, il numero ottimo di accoppiamenti decresce, fino al punto in cui non eseguire l'accoppiamento rappresenta la soluzione che garantisce la migliore capacità.

4. CONCLUSIONI

Possiamo quindi concludere che il *train coupling* ha un impatto sulla capacità della rete ferroviaria che è tanto maggiore tanto più la linea è congestionata, cioè tanto più la frequenza di arrivo dei treni è alta. Esso può permettere di ottimizzare il traffico ferroviario senza necessitare di modifiche strutturali della rete, rappresentando quindi una soluzione efficiente e a basso costo.