

Modello ad agenti per la simulazione del traffico davanti ad un casello autostradale

Corso di Sistemi Complessi: Modelli e Simulazione

Morganti Raffaele - Matr.846595

Stievano Matteo - Matr.829535

Università degli Studi di Milano-Bicocca

A.A. 2021/2022

Sommario

Introduzione: In questo lavoro siamo andati a realizzare un modello per l'analisi del fenomeno del traffico che si genera in concomitanza di una barriera per il pedaggio autostradale. Considerando quanto osservato in letteratura abbiamo optato per un simulatore multi-agente implementato in Python che è stato rilasciato con licenza MIT.

Creazione del modello: Siamo andati a definire un insieme di assunzioni che rendesse il modello semplice senza però portare a perdita di aderenza alla realtà. In particolare abbiamo optato per una modellazione dell'ambiente con spazi e tempi discreti, forzato i caselli a non accettare metodi di pagamento multipli e limitato la libertà di movimento dei veicoli.

Risultati: Il nostro modello è stato validato sui risultati di un articolo interessato alla valutazione dei tempi di attesa medi in situazioni di congestionamento. Per mostrare la possibilità di utilizzare lo stesso modello per rispondere ad altri quesiti relativi lo stesso settore di studio abbiamo confrontato anche i risultati ottenuti in uno studio relativo il rischio di incidente davanti a una barriera di pagamento.

Conclusioni: Il modello realizzato è caratterizzato da delle buone performance, nei limiti delle semplificazioni effettuate e del framework utilizzato. Abbiamo mostrato come un singolo modello simulativo sia facilmente generalizzabile, senza la necessità di realizzarne uno ad hoc per ogni caso di studio.

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Obiettivo di studio	3
1.2	Review della letteratura	3
1.2.1	Modelli matematici	4
1.2.2	Modelli ad agente	4
2	Creazione del modello	8
2.1	Agenti	8
2.2	Ambiente	8
2.2.1	Situazione reale e simulata	9
2.2.2	Spazio e dimensioni	13
2.2.3	Forma della cella	13
2.2.4	Dimensione della cella	15
2.2.5	Velocità di movimento	15
2.2.6	Durata del turno	16
2.3	Arrivi	16
2.3.1	Numero di arrivi	16
2.3.2	Distribuzione degli arrivi	17
2.4	Tipi di casello	17
2.5	Logica di movimento	18
2.5.1	Scelta dell'obiettivo	19
2.5.2	Raggiungibilità dell'obiettivo	20
2.5.3	Occupazione della carreggiata	20
2.5.4	Aggressività	20
2.6	Gestione delle collisioni	22
2.7	Comportamento complessivo	22
2.7.1	Movimento del veicolo	23
2.7.2	Controllo delle collisioni	24
2.7.3	Gestione del pedaggio	24
2.7.4	Posizionamento del veicolo	24
3	Risultati	27
3.1	Esecuzione	27
3.2	Validazione	29
3.3	Estensioni	30
4	Conclusioni	33
4.1	Limiti e sviluppi futuri	33
	Riferimenti	34

1 Introduzione

La simulazione del traffico veicolare è un aspetto sicuramente rilevante nell'ambito simulativo, al punto che esistono sia software a pagamento, che software open-source per la simulazione del traffico in ogni sua forma. La differenza principale tra le due soluzioni sta nell'obiettivo del software di simulazione; per esempio quelli open-source si concentrano principalmente sulla simulazione del traffico cittadino.

Un'altra situazione significativa per l'analisi del flusso di automobili è quella del passaggio ai caselli autostradali: luoghi fortemente propensi alla creazione di code o rallentamenti, dove è più probabile una congestione del traffico. In queste aree un flusso molto alto di autovetture viene forzatamente ridotto per il corretto pagamento del servizio autostradale.

Fintanto che il metodo di controllo e pagamento autostradale si baserà sull'impiego di infrastrutture ausiliarie come per l'appunto i caselli autostradali, una riduzione del flusso e quindi una congestione del traffico è inevitabile. Ciò nonostante, con un'attenta analisi è possibile mitigare e ridurre quanto più possibile questo avvenimento.

Il nostro scopo è quello di realizzare un modello open-source in grado di simulare il comportamento del traffico autostradale di fronte ad un collo di bottiglia strutturale: i caselli per il pedaggio all'entrata (o uscita) dall'autostrada.

1.1 Obiettivo di studio

L'idea di simulare una simile situazione è nata dalla necessità di analisi riguardo le differenti combinazioni di agenti mobili e immobili, ovvero le macchine e i caselli autostradali; e come la differente distribuzione numerica e spaziale possa influire sullo scorrere regolare del traffico.

Ci siamo posti come obiettivo quello di realizzare un modello per l'osservazione del traffico che, senza perdita di generalità, fosse adeguatamente efficiente nei confronti dei risultati ottenuti nella ricerca.

1.2 Review della letteratura

Abbiamo deciso inizialmente di ricercare quanti più paper che parlassero dell'argomento, sia specifici che non. Successivamente a fronte di un'attenta analisi, abbiamo deciso di utilizzare quelli che ci sembravano maggiormente coerenti con il problema che stavamo affrontando.

È corretto affermare come esistano principalmente due macro-approcci al problema dell'analisi del traffico veicolare: una strategia basata sull'utilizzo di modelli *macroscopici*, con una rappresentazione *matematica* dell'ambiente e della sua evoluzione; e una strategia basata sull'utilizzo di modelli *microscopici*, tramite l'utilizzo di *sistemi multi-agente* che tentano di simulare il comportamento dell'ambiente in tempo reale.

1.2.1 Modelli matematici

Questi modelli macroscopici offrono soluzioni che portano dei buoni risultati *deterministici* ma sono principalmente adatti a casi di studio ben specifici.

Uno degli studi più recenti riguardo questo ambito è quello effettuato da [1], il quale prendendo in analisi altri studi come [2], dove riesce a sviluppare un modello matematico del tipo *multi-class time-dependent* che permette di affrontare un vasto spettro di situazioni che possono caratterizzare la relazione tra domanda e offerta ad un casello autostradale. In particolare nell'articolo viene analizzata la distribuzione degli arrivi e la successiva formazione di code, tenendo conto della distribuzione della tipologia di pagamento tra le autovetture e i caselli.

Tuttavia a fronte di una maggiore velocità di utilizzo e una richiesta di risorse minore, i modelli matematici soffrono di una alta sensibilità alla variazione dei loro parametri di funzionamento. Questo può portare un modello apparentemente performante a essere completamente invalidato. Tra i lavori osservati infatti in [3] si arriva a concludere che il modello realizzato sia affidabile solo per arrivi inferiori a **500 veh/h**.

1.2.2 Modelli ad agente

Il principale vantaggio della modellazione microscopica, e quindi dell'utilizzo di modelli ad agente, è il livello di dettaglio che si può ottenere durante la fase di modellazione. La modellazione delle dinamiche del traffico stradale è essenziale per la valutazione dell'impatto delle differenti strategie di ottimizzazione applicate. A causa del fatto che molti sistemi software di micro-simulazione non hanno un accurato modello per la simulazione dei caselli autostradali, molte volte si preferisce sviluppare un sistema *custom*. Sempre più ricerche tendono a sviluppare sistemi del genere, quando invece avere a disposizione un modello sufficientemente validato e abbastanza flessibile, permetterebbe la simulazione del problema solamente tramite l'accurata impostazione dei parametri ambientali.

A riguardo dei parametri ambientali, molti articoli hanno evidenziato come i fattori preponderanti nella modellazione di un modello ad agente siano pressoché gli stessi. Per esempio il modello sviluppato da [4] prevede che il modello debba avere le seguenti caratteristiche generali:

- *Numero e tipologia dei caselli autostradali*. Il loro numero e le loro combinazioni possono (e devono) venire aggiustate dai vari gestori delle infrastrutture, così da poter rispecchiare più fedelmente la loro specifica realtà.
- *Capacità dei caselli autostradali*. Questa caratteristica è legata generalmente al tempo medio impiegato da un'autovettura per usufruire del servizio. Questa caratteristica è influenzata generalmente dalla tipologia di veicolo (leggero, pesante) e dal *comportamento del guidatore*.
- *Comportamento guidatore*. Questa variabile non può essere definibile come deterministica (a differenza delle altre) ma anzi è più del tipo stocastica. Infatti può essere vista come un insieme di incertezze che caratterizzano il

comportamento di un guidatore umano, che possono aumentare o diminuire in relazione a fattori interni (il guidatore stesso) o esterni (la tipologia di pagamento).

- *Capacità di flusso*. Questo parametro serve a capire la relazione che esiste tra il numero di autovetture in arrivo per una data tipologia di pagamento, il numero di corsie disponibili per il suddetto pagamento e la loro disposizione in relazione alla disposizione delle corsie di immissione.

Queste caratteristiche sono fondamentali e sufficienti per la realizzazione di un buon modello. Anche nell'articolo di [5] si nota come pressoché le stesse assunzioni vengono prese in considerazione per l'analisi di un modello microscopico ad agenti per la simulazione del traffico ad un casello. Questo sta ad indicare come il comportamento di un modello per la simulazione del traffico ad un casello richieda generalmente di tenere in considerazione gli stessi parametri per il corretto funzionamento del modello.

Osservando la strategia di movimento descritta da entrambi gli articoli sopracitati, possiamo osservare come a livello microscopico l'algoritmo di scelta del percorso migliore sia abbastanza simile per entrambi gli studi. L'algoritmo può essere quindi riassunto attraverso le seguenti fasi:

- Scelta della corsia in base al metodo di pagamento e alla distanza tra la vettura e la corsia obiettivo.
- Aggiustamento della corsia obiettivo. Questa operazione viene effettuata in base all'analisi della coda già presente sulla corsia obiettivo all'istante di tempo t e sulla coda che si stima possa esserci all'istante di tempo $t + 1$. Questo aggiustamento viene influenzato da dei fattori aggiuntivi che possono variare, ma che generalmente sono rappresentati dalla proprietà *driver behaviour* sopra descritta.

Osserviamo come il modus operandi per approcciarsi alla modellazione di un sistema ad agente per studiare il fenomeno del traffico ai caselli sia pressoché simile per qualsiasi tipologia di articolo, differenziandosi principalmente sull'unico parametro che crea reale incertezza: il *driver behaviour* ovvero il comportamento umano.

Nello studio proposto da [4] il comportamento umano viene classificato in quattro differenti modelli che simulano il comportamento di un guidatore rispetto a differenti stimoli.

1. *Modello car-following*. Il modello proposto rappresenta la *reazione* del guidatore alla valutazione di un possibile cambiamento nel percorso in base alla distanza coperta con ogni step. Questa reazione viene influenzata da degli *stimoli* e dalla *sensibilità* individuale del guidatore.

$$reaction_n(t) = sensibility_n(t - \tau_n) \cdot stimulus_{n-1}(t - \tau_n)$$

Dipendentemente dal tipo di risultato e dal tipo di stimolo i veicoli vengono classificati come: *Free flow state*, *Constrained state* *Queued state*.

2. *Modello lane-changing.* Questo modello tiene in considerazione tre fattori fondamentali: la *necessità* di cambiare corsia, il *desiderio* di cambiare corsia e il *rischio* di cambiare corsia.
3. *Modello booth selection.* Questo modello afferma che ogni guidatore seleziona la propria destinazione quando arriva ad una distanza consona che permette la *visibilità* sull'attuale distribuzione del traffico veicolare. In particolare viene associato un valore di utilità $U_{i,n}$ ad ogni corsia che dipende dalla coda che è presente nel momento $L_i(t)$ e al numero di veicoli ancora non in coda nella stessa corsia $N_i(t)$.

$$U_{i,n} = -L_i(t) - \alpha \cdot N_i(t) \quad \text{con} \quad \alpha = .5$$

Il modello tenderà a massimizzare $U_{i,n}$.

4. *Modello service.* Questo modello tiene in considerazione principalmente il metodo di pagamento delle vetture soffermandosi principalmente sul comportamento una volta davanti al casello e non tanto su quello che viene fatto precedentemente.

Nell'articolo si cerca comunque di ottimizzare il modello per ottenere i risultati migliori in relazione al problema studiato. Questo approccio, seppur corretto, potrebbe portare ad avere un errore di fondo non trascurabile, in quanto si potrebbero minimizzare dei comportamenti umani fondanti della psiche dei guidatori, che se tenuti correttamente in conto farebbero emergere dei risultati totalmente differenti.

Di contro nell'articolo [6], pur utilizzando un approccio *MAS-Based* (Multi-Agent System), si tenta di riprodurre il comportamento umano in maniera più veritiera piuttosto che concentrarsi sull'ottimizzazione globale del traffico dando per scontato il comportamento dei guidatori.

L'articolo si concentra infatti sulla simulazione del comportamento di un guidatore in relazione all'occupazione delle strade in un contesto urbano con un'alta densità. Anche in questo caso l'approccio è simile a quanto sopra descritto, ovvero che ogni guidatore ha un obiettivo e tenderà in tutti i modi di perseguirlo. Ovviamente in questo caso l'approccio sarà meno ottimizzato dal punto di vista del traffico e più ottimizzato dal punto di vista comportamentale. A tal proposito vi è una critica riguardo alcuni modelli più strettamente legati all'ottimizzazione del traffico in cui viene criticato ad esempio il comportamento degli agenti che sembra poco umano in quanto segue troppo pedissequamente le corsie fisiche, mentre nella realtà si tende a seguire delle corsie cosiddette *virtuali*¹.

Successivamente l'articolo procede con un'analisi dei diversi comportamenti di guida, che possono essere riassunti nei seguenti:

1. *Comportamento ego-centered.* Questo insieme di comportamenti si basa principalmente su di una reward del guidatore nel medio o corto periodo.

¹Le corsie virtuali sono corsie che non rispettano quelle fisiche della segnaletica orizzontale, ma che nascono quasi spontaneamente in situazioni di alta densità di traffico

2. *Comportamento allo-centered*. Questo insieme di comportamenti si basa principalmente su una reward del guidatore nel lungo periodo.

Questo approccio non è di nostro interesse primario, ma abbiamo voluto citarlo in quanto mette in luce una dualità insita nel problema della simulazione dei comportamenti umani nei gruppi, nello specifico alla guida. L'articolo infatti mette in risalto come in ambito simulativo bisogna scendere per forza a compromessi, i quali potrebbero non sempre essere adatti o calzanti. Simulare il traffico veicolare tentando di ottimizzare il problema delle code, pone molti presupposti e interrogativi il più dei quali imprevedibili in quanto dettati dal comportamento irrazionale umano. Perciò in base a quello che si vuole ottenere si decide quanto realisticamente si vuole far agire il proprio modello che in un modo o nell'altro sarà un'approssimazione abbastanza goffa della realtà.

Ciò nonostante è chiaro come sia impossibile prescindere da queste assunzioni e generalizzazioni poiché non esiste (attualmente) un metodo che permetta di simulare la vastità di comportamenti umani irrazionali in maniera credibile e veritiera. Queste differenze però ci permettono di creare modelli diversi pur avendo le stesse assunzioni.

2 Creazione del modello

Per la realizzazione del modello abbiamo scelto di utilizzare il linguaggio *Python*, in particolare appoggiandoci a *MESA*² che sembra essere il framework più utilizzato per la modellazione di sistemi multi-agente su questo linguaggio.

All'interno di questo capitolo sono presentate tutti i comportamenti del modello e le motivazioni che ci hanno portato a effettuare decisioni e assunzioni. Nell'ultima sezione viene riproposto schematicamente il funzionamento di tutte le componenti.

2.1 Agenti

Nel nostro modello sono presenti tre tipi di agenti:

1. **Muri:** delimitatori fisici che identificano nel mondo reale delle aree non calpestabili (guard-rail, muri o cordoli). Nel modello sono rappresentati con delle celle color nero.
2. **Caselli:** delimitatori fisici che identificano nel mondo reale le infrastrutture atte al controllo del flusso del traffico e al pagamento del servizio autostradale. Nel modello sono rappresentati con delle celle di tre possibili colori: giallo, blu o grigio.
 - Le celle gialle sono associate al pagamento tramite telepass, o comunque tecnologie similari;
 - le celle blu rappresentano invece tutti quei tipi di pagamenti elettronici effettuabili con carte di credito, debito o analoghe;
 - le celle grigie sono associate al classico pagamento in contante.
3. **Autovetture:** rappresentano le autovetture del mondo reale. Per semplificare, il modello non considera la possibile presenza né di mezzi pesanti come camion, veicoli con rimorchio, etc., né di mezzi leggeri come moto, scooter e similari. Di fatto il modello tiene in considerazione solamente il traffico veicolare di autovetture.

2.2 Ambiente

Per la realizzazione del modello abbiamo deciso di utilizzare uno spazio discreto con celle di forma esagonale: con la discretizzazione sicuramente vi è una perdita di aderenza al fenomeno reale dal punto di vista microscopico. Tuttavia l'interesse delle analisi sono incentrate sul comportamento globale piuttosto che del singolo autista, pertanto anche un modello che rappresenti bene il fenomeno a livello mesoscopico lo riteniamo accettabile.

La scelta della forma della cella viene descritta nel dettaglio nelle sezioni successive.

Ogni cella può essere occupata al più da un singolo agente, indipendentemente dal tipo; inoltre ogni agente occuperà in un dato istante una singola cella. Questo spiega

²<https://mesa.readthedocs.io>

perché abbiamo scelto di considerare il muro come un agente, così da non realizzare un ambiente preimpostato ma consentire l'adeguamento di forma e dimensioni dell'area di incolonnamento per qualsiasi configurazione reale.

Gli agenti *muro* e *casello* assumono posizioni fisse all'atto dell'inizializzazione e non hanno possibilità di movimento nel corso della simulazione.

2.2.1 Situazione reale e simulata

Nella situazione reale in prossimità di una barriera è generalmente presente della segnaletica che anticipa l'allargamento della carreggiata e le corsie da mantenere per il raggiungimento del casello di interesse (figura 1), ne segue un aumento delle corsie per permettere ai veicoli di dirigersi ad effettuare il pagamento (figura 2). Osservando un'immagine satellitare (figura 3) appare evidente la forma che assume la strada in questa sezione.



Figura 1: Segnaletica posta a 330 metri dalla barriera Milano Est sull'autostrada A4 in direzione Torino (fonte: Google Earth)



Figura 2: Ampiezza della carreggiata per i caselli della barriera Milano Est sull'autostrada A4 in direzione Torino (fonte: Google Earth)

Proprio questa è l'area di nostro interesse: il modello dell'ambiente in figura 4 offre



Figura 3: Vista dall'alto della barriera Milano Est sull'autostrada A4 con focus sulla carreggiata in direzione Torino (fonte: Google Earth)

una rappresentazione topologicamente corretta della struttura della carreggiata nella situazione reale riportata nell'immagine precedente.

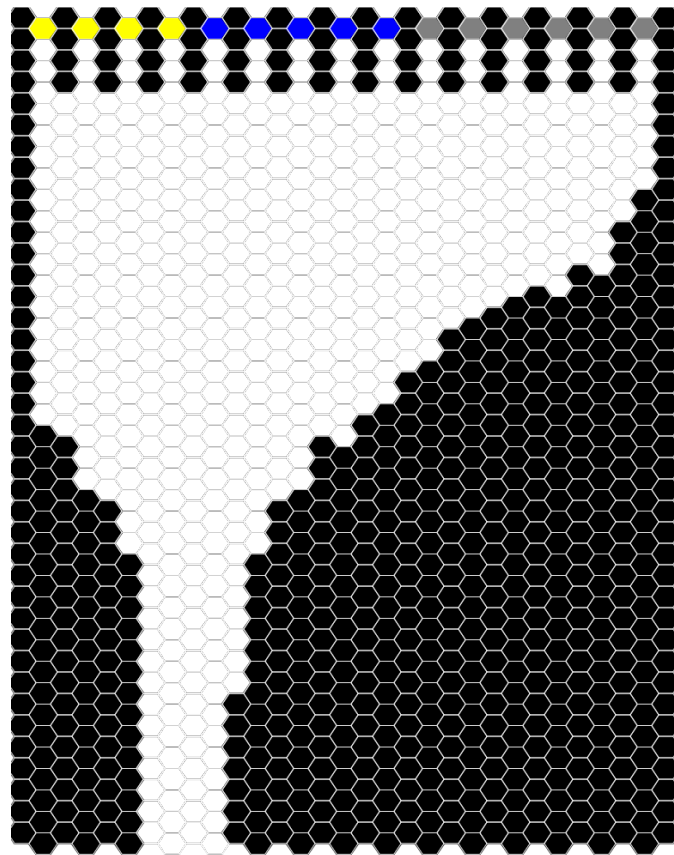


Figura 4: Rappresentazione topologica dell'ambiente all'interno del nostro modello

Tuttavia il framework utilizzato permette di rappresentare le singole celle solo come equilatero, condizione che non poniamo a livello concettuale al nostro modello, risultando in una visualizzazione geometricamente imprecisa. In figura 5 si può notare come apparirebbe la rappresentazione geometricamente corretta.

Si noti che sono state trascurate le due corsie Telepass più a destra, questo perché sono generalmente utilizzate dai mezzi pesanti, che noi assumiamo non esistere, non rimuovere queste corsie avrebbe comportato una sovrastima dell'efficienza della barriera nel favorire il deflusso dei veicoli considerati.



Figura 5: Sovrapposizione tra rappresentazione del modello e situazione reale, con l'esclusione delle 2 corsie Telepass a destra per favorire il passaggio dei mezzi pesanti

2.2.2 Spazio e dimensioni

L'intero ambiente ha una lunghezza (intesa come distanza tra il lato da cui appaiono i veicoli all'inizio della simulazione e quello in cui si trovano i caselli che i veicoli attraversano per uscire dall'ambiente) che è regolabile in base alla situazione reale che si vuole rappresentare. Non tutte le barriere hanno infatti le stesse dimensioni, non appare pertanto sensato forzare uniformità su questa dimensione.

La larghezza massima (ovvero l'ampiezza raggiunta da tutti i caselli appaiati tra loro con relativi separatori) è invece assunta dipendente esclusivamente dal numero di caselli presenti. In particolare ogni casello come quello in figura 6 occupa dello spazio: i dati in [7] indicano che l'occupazione di un casello è pari a 5.8 m di larghezza, di cui 3.5 m dimensione della corsia.



Figura 6: Spazio occupato dall'area per il casellante e ampiezza della corsia all'altezza della sbarra (fonte: fanpage.it)

Questa situazione viene approssimata da 2 celle appaiate, una non calpestabile occupata da un muro (a rappresentazione dell'area occupata dal casellante), l'altra al termine di una corsia coincidente con il luogo in cui è posizionata la sbarra per consentire il passaggio solo dopo il pagamento del pedaggio.

2.2.3 Forma della cella

Come già detto, una cella è occupabile al più da un veicolo contemporaneamente. Dato che i veicoli potranno muoversi ad ogni turno solo in celle vicine è necessario definire cosa si intende per vicinato. In figura 7 si possono notare tre diverse concezioni di vicinato.

Quella in analisi è però una situazione particolare, con tutti i veicoli che si muovono nello stesso senso di marcia. Appare evidente come i movimenti sono sensati solo

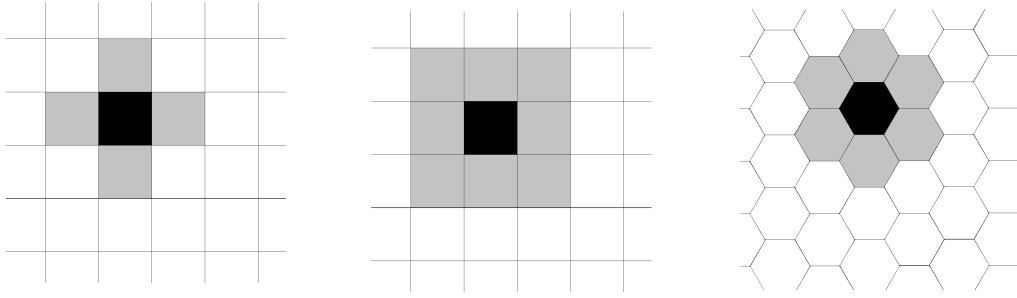


Figura 7: Da sinistra a destra: (1) Tassellazione quadrata con vicinato di von Neumann, (2) Tassellazione quadrata con vicinato di Moore, (3) Tassellazione e vicinato esagonale

verso vicini che consentano uno spostamento che coincida col senso di marcia, in particolare il sottoinsieme dei vicini di interesse è rappresentato in figura 8.

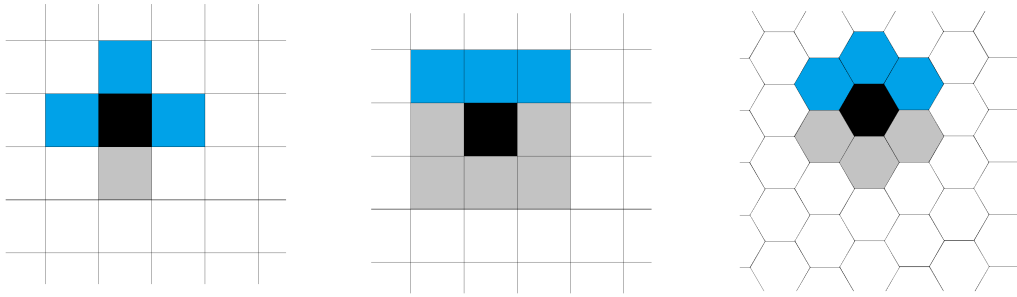


Figura 8: In azzurro le celle vicine a quella nera nel rispetto del senso di marcia secondo i vicinati rispettivamente: di von Neumann, di Moore, esagonale

Nel caso del vicinato di von Neumann per consentire ai veicoli il cambio di corsia sarebbe necessario consentire dei movimenti laterali, situazione assolutamente irrealistica per la rappresentazione del movimento di un'automobile. Il vicinato di Moore e quello esagonale appaiono subito più appropriati.

Utilizzando il vicinato di Moore tuttavia appare chiaro come il cambio di corsia non abbia alcun costo, infatti un veicolo che in due turni consecutivi scelga di procedere secondo la sequenza avanti, avanti (quindi senza cambio di corsia) raggiungerebbe la stessa posizione di un veicolo che si muova avanti-destra, avanti-sinistra (effettuando 2 cambi di corsia).

Poiché il modello si concentra su una situazione in cui i cambi di corsia sono sicuramente più frequenti rispetto al normale comportamento che viene tenuto durante la marcia, è chiaro come sia più consono scegliere di utilizzare la tassellazione esagonale che è per costruzione più adatta a rappresentare questo fenomeno rispetto alla tassellazione quadrata indipendentemente dalla tipologia di vicinato utilizzata.

2.2.4 Dimensione della cella

Ricordando ancora l'imposizione della relazione biunivoca tra cella ed agente in un dato istante, un'altra caratteristica da valutare è la dimensione della cella, in particolare è di interesse la sua lunghezza L che, in accordo con la notazione relativa le dimensioni dell'ambiente, coincide con la dimensione che si estende nel senso di marcia dei veicoli.

In particolare la sua dimensione deve essere tale da potere contenere l'auto per tutta la sua lunghezza, considerando inoltre che la distanza media tra due veicoli in coda non è mai nulla, altrimenti avremmo una collisione.

Questa dimensione in [8] viene calcolata come pari a 8.6 m per i veicoli leggeri, di cui 5 m di ingombro del mezzo e 3.6 m di distanza tra due veicoli, questo è stato scelto come valore di riferimento.

Nel nostro modello il valore è rappresentato comunque da un parametro regolabile; questo perché in nazioni diverse le tipologie di veicoli maggiormente diffusi non sono uniformi, risultando poco opportuno trascurare questa differenza in un modello che voglia essere il più generalizzabile possibile.

2.2.5 Velocità di movimento

Si assume che i veicoli raggiungano il casello con velocità massima limitata (V_{max}). Se sul loro cammino non sono presenti ostacoli, allora la velocità di movimento coincide con la velocità massima (e corrisponde a L metri per ogni turno).

La velocità di arrivo al casello in assenza di traffico è un parametro regolabile, poiché è sicuramente influenzata dalla geometria della carreggiata in prossimità della barriera e da limiti di velocità imposti dagli enti competenti. Di default l'abbiamo assunta pari a 60 km/h , ritenendola ragionevole in base a quanto osservato nello studio [9].

Questa semplificazione di avere una velocità massima omogenea per tutti i veicoli è stata effettuata anche perché le situazioni di interesse sono quelle che vedono un accumulo di veicoli, dove la velocità si regola in base alla possibilità di movimento piuttosto che a una velocità massima raggiungibile dal mezzo.

In presenza di ostacoli il veicolo ha capacità frenante illimitata e può arrestarsi istantaneamente. La rappresentazione di velocità intermedie tra 0 e V_{max} avviene tramite la discretizzazione, in particolare nei casi di:

- Veicolo fermo: in n turni il veicolo si muove di 0 celle.
- Veicolo in marcia: in n turni il veicolo si muove di n celle, che corrisponde a una velocità pari a V_{max} .
- Veicolo nel traffico: in n turni il veicolo si muove di $m \in (0, n)$ celle, situazione che corrisponde a una velocità di $\frac{m}{n} V_{max}\text{ km/h}$.

2.2.6 Durata del turno

La durata di un singolo turno in secondi (Δ_t) viene regolata dal modello in relazione ai parametri presentati di velocità massima e dimensione della cella, secondo la formula:

$$\Delta_t = 3.6 \frac{L}{V_{max}}$$

Visto che questa scelta rende la durata di un turno non costante tra diverse situazioni, il modello calcola anche il tempo effettivo trascorso e lo mostra come riportato in figura 9.



Figura 9: Interfaccia utente dove: (1) *Frames per seconds* indica la velocità di simulazione indicando quanti turni calcolare in un secondo. (2) *Current step* riporta il numero di turni trascorsi dall’inizio della simulazione, anche se il dato presenta un interesse relativo. (3) *Tempo trascorso* mostra i minuti e secondi nel mondo reale della situazione simulata, valore calcolato secondo le formule riportate in questa sezione

2.3 Arrivi

Nuovi veicoli possono essere creati dal modello ad ogni step, nel rispetto del numero di arrivi (definito come numero di veicoli al minuto attesi) e distribuzione del metodo di pagamento preferito dai veicoli (proporzione di auto che pagano in contanti, con carta, o utilizzano il servizio Telepass).

Ogni nuovo veicolo viene posizionato all’inizio dello spazio simulato, in corrispondenza dell’area di massima distanza dai caselli, posti invece al termine del nostro ambiente.

2.3.1 Numero di arrivi

Il numero di auto attese al minuto è un parametro regolabile. Il modello dell’ambiente si occupa della creazione delle auto assumendo l’indipendenza tra le corsie a disposizione. Genera auto con tempo di attesa distribuito secondo la legge di Poisson di parametro:

$$\lambda = \frac{\#(\text{corsie}) \cdot \#(\text{step/min})}{\#(\text{auto/min})}$$

Nel caso in cui la cella sia occupata al momento della creazione si attenderà il turno successivo per effettuare il posizionamento del veicolo. Questo significa che

impostando un numero di arrivi troppo elevato l'ambiente non sarà sempre in grado di generare il quantitativo di auto richieste.

Poiché un'auto può essere posizionata solo se la cella è libera e al turno successivo potrà muoversi solo se l'auto precedente si è spostata, il limite superiore di auto al secondo per corsia generabili è asintoticamente pari a $(2 \cdot \Delta_t)^{-1}$.

Il fatto di non poter generare un numero arbitrario di arrivi più che un limite del modello è un tentativo di riprodurre un limite reale dovuto alla dimensione della carreggiata. Ciò nonostante, dall'osservazione di diverse esecuzioni sembra che il numero di arrivi massimi generabili dal modello possa superare valori ottenibili in situazioni reali. Regolando opportunamente il parametro del numero di arrivi attesi questo discostamento tra modello e mondo reale diviene irrilevante.

Avere il parametro costante durante tutta l'esecuzione della simulazione è sicuramente un limite, come anche mostrato dai dati forniti in [8]. Questa semplificazione è sicuramente eliminabile in un possibile sviluppo futuro.

2.3.2 Distribuzione degli arrivi

La distribuzione della tipologia di pagamento preferita dagli utenti non è generalizzabile ed è in continua evoluzione.

Dall'introduzione del Telepass il servizio è stato via via sempre più utilizzato, studi di 20 anni fa sono quindi poco utili per valutare la situazione odierna.

Inoltre, in alcuni stati questo servizio ha un sovrapprezzo rispetto al costo del normale pedaggio, in altri comporta invece una diminuzione del costo del pedaggio, è lecito supporre che diverse politiche contrattuali influenzino il tasso di utilizzo del servizio.

Nel caso di studio [1] la distribuzione della tipologia di pagamento che gli automobilisti preferiscono adottare quando arrivano di fronte un casello autostradale è riportata in tabella 1.

Tabella 1: Frequenza degli autisti per metodo di pagamento nel caso di veicoli leggeri [1]

Metodo di pagamento	Percentuale di auto
Telepass	76%
Carta	14%
Contante	10%

2.4 Tipi di casello

Ogni casello può accettare un singolo metodo di pagamento tra Telepass, carta e contante. Appena un'auto raggiunge un casello inizia l'operazione di pagamento che assumiamo con durata distribuita secondo legge di Poisson di parametro λ che include oltre alla durata del pagamento il tempo per la liberazione dell'area e il

posizionamento dell'auto successiva a patto che quest'ultima fosse già incolonnata prima del termine del pagamento.

Secondo quanto osservato in alcuni articoli, buone approssimazioni del tempo di servizio rispetto al metodo di pagamento sono riportate in tabella 2.

Tabella 2: Tempo di servizio (in secondi) medio secondo alcuni studi

Metodo di pagamento	[10]	[11]	[5]
Telepass	3.8	2	3
Carta	7.5	-	9.6
Contante	20	16	-

Per il Telepass la durata dell'operazione è dovuta al rallentamento forzato rispetto alla velocità di crociera. Va considerato anche che lo studio [10] considera i tempi di pagamento per un parcheggio a pedaggio, senza alcuna garanzia che i dati ottenuti siano generalizzabili al caso autostradale.

Rispetto al mondo reale abbiamo semplificato alcune condizioni assumendo:

- l'assenza di caselli che accettano più metodi di pagamento, ad esempio: caselli telepass-carta oppure caselli carta-contanti, in modo analogo anche ogni veicolo sarà disposto ad effettuare un solo tipo di pagamento noto a priori.
- l'operatività di tutti i caselli, nonostante sia stata implementata una variabile per inibire l'operatività del casello e impedirne il funzionamento. È però assente qualsiasi logica da parte dei veicoli per evitare di accodarsi ad un casello chiuso.

Ogni casello accetta come unico metodo di pagamento il proprio, per cui se un'autovettura dovesse arrivare ad un casello sbagliato creerebbe una coda permanente, intasando la simulazione. Ciò non può accadere per via delle regole di movimento assegnate ai veicoli, descritte nella sezione successiva.

2.5 Logica di movimento

Ogni veicolo ha facoltà di muoversi di 1 cella soltanto in una delle 3 direzioni: avanti, avanti-destra, avanti-sinistra. Non cercherà di muoversi in una cella che sia occupata nello stato attuale, né tenterà di muoversi all'indietro. I movimenti consentiti sono schematicamente rappresentati in figura 10.

Durante un singolo turno gli agenti compiono la loro azione in maniera parallela rispetto agli altri agenti presenti nell'ambiente. L'operazione non è effettuata istantaneamente ma si suddivide in tre fasi:

1. All'inizio del turno tutti gli agenti osservano lo stato attuale e comunicano la propria intenzione di movimento all'ambiente.
2. L'ambiente verifica la presenza di possibili intenzioni conflittuali e le gestisce potendo decidere di impedire il movimento ad alcuni.

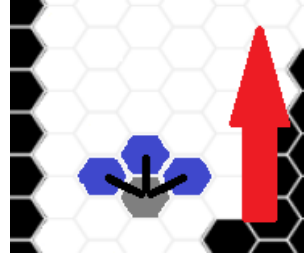


Figura 10: Possibili movimenti di un veicolo nelle celle adiacenti. Un'auto che allo step t si trovi nella cella indicata in grigio, allo step $t+1$ potrà muoversi solo in una di quelle blu, con il senso di marcia indicato dalla freccia rossa

3. Se l'agente non viene interrotto dall'ambiente allora effettua il movimento previsto.

Data la scelta di impossibilitare il movimento all'indietro dei veicoli, è stato deciso di forzare questi ultimi ad andare sempre in un casello corretto, eliminando il fattore umano che nella realtà prevede degli errori di scelta. Questa decisione ha sicuramente un impatto sulla generalizzabilità del modello al mondo reale, ma permette di ridurre la complessità.

2.5.1 Scelta dell'obiettivo

La logica primaria di movimento delle autovetture è relativamente semplice. All'avvio del simulatore, vengono generati i vari caselli (o gate) e in appoggio viene creata una struttura dati dove vengono salvate le posizioni di ogni gate in relazione alla loro tipologia. Questa struttura dati verrà poi utilizzata per la scelta del casello da parte dell'agente autovettura.

Quando viene creata un'autovettura, gli viene associata una tipologia di pagamento in maniera consona alla distribuzione globale. Una volta creata, questa sceglierà in maniera randomica uno dei possibili suoi obiettivi senza effettuare alcuna analisi riguardo la distribuzione degli altri veicoli in coda e senza osservare le condizioni del traffico. Una volta scelto il proprio obiettivo tra quelli disponibili, questo non viene cambiato più per tutta la durata della vita dell'agente.

Questa assunzione potrebbe variare in un possibile sviluppo futuro che possa prevedere che l'auto, vista l'impossibilità di muoversi nel punto voluto, sia in grado di riformulare la sua scelta.

Questa scelta randomica non coincide esattamente con quanto osservato in [12] (mentre lo stesso articolo supporta la preferenza degli autisti di non modificare in fasi successive la scelta effettuata), come descritto invece in [2] porta a un comportamento globale consona dove i caselli vengono occupati approssimativamente in modo uniforme.

Non ci attendiamo quindi che il modello riproduca il mondo reale con precisione a livello microscopico, ma seguendo la via già intrapresa all'atto della scelta del metodo di discretizzazione ci accontentiamo di un'accuratezza a livello mesoscopico.

2.5.2 Raggiungibilità dell'obiettivo

Ad ogni turno l'agente prima di proporre la sua mossa valuta se questa possa precludere il raggiungimento del casello obiettivo. Il controllo è semplice poiché, per come sono definite le regole di spostamento, un veicolo può muoversi lateralmente al più di tante celle quante si muove in direzione del senso di marcia.

Se lo spostamento che ha intenzione di effettuare non impedisce l'obiettivo ultimo del veicolo allora questo è ammesso e viene informato l'ambiente. In caso contrario si attiva una procedura che forza una delle sole azioni possibili valide:

- Esiste una cella vicina libera che avvicina il veicolo al casello, in questo caso l'agente propone come scelta candidata quella di muoversi in quella cella.
- Tutte le celle vicine che avvicinerebbero il veicolo al casello sono occupate, allora l'agente non ha possibilità di movimento e comunica l'intenzione di rimanere fermo.

Il fatto di effettuare il controllo prima di effettuare ogni passo assicura che in nessun caso l'agente si trovi in una posizione dalla quale non sappia più come muoversi secondo le regole descritte nei prossimi paragrafi.

2.5.3 Occupazione della carreggiata

All'atto pratico l'autista procederà verso il casello scelto muovendosi secondo un concetto di corsia piuttosto lasco, preoccupandosi di direzionarsi verso l'obiettivo piuttosto che seguire un percorso preciso prestabilito. In particolare, ricordando i dati di [7], in prossimità della barriera è possibile che due auto siano affiancate, entrambe con lo stesso casello obiettivo, con la creazione delle cosiddette “*corsie virtuali*”, fenomeno studiato in [6] nell'ambito urbano.

Questo perché l'esperienza ci suggerisce che in questa circostanza la segnaletica orizzontale non venga seguita rigorosamente. Va comunque segnalato che tale ipotesi non ha alcuno studio a supporto. Peraltro, l'applicabilità a nazioni diverse potrebbe portare ad accuratezze del modello differenti proprio per quanto deciso in questa fase.

In particolare si assume che il veicolo conosca la posizione del casello relativamente all'ampiezza della carreggiata in prossimità della barriera, il suo obiettivo è quello di minimizzare la differenza tra la sua posizione attuale rispetto all'ampiezza della carreggiata in quel punto nei confronti di quella dell'obiettivo.

In caso di traffico l'agente accetta di potersi allontanare lateralmente fino a 1 cella rispetto alla posizione obiettivo, a patto che ciò non pregiudichi la possibilità di raggiungere il target. Alcuni esempi di traiettorie sono mostrati in figura 11.

2.5.4 Aggressività

Ulteriori deviazioni rispetto alla traiettoria ideale sono consentite limitatamente all'aggressività dell'autista: il parametro relativo indica la propensione a compiere

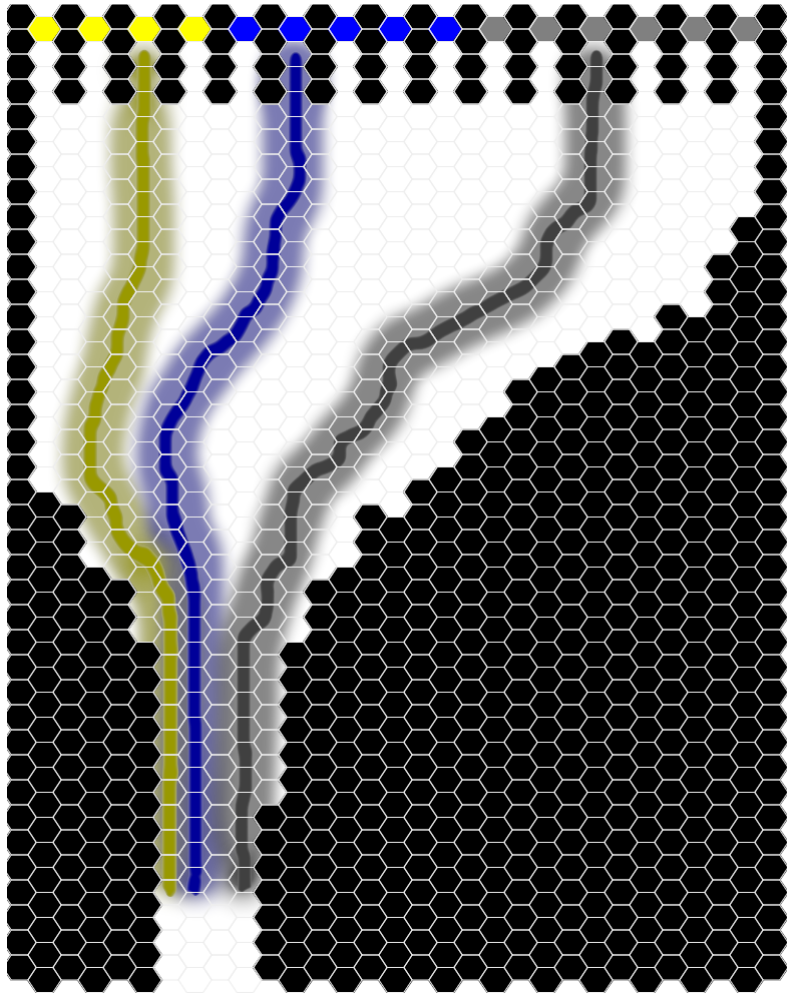


Figura 11: Esempi di traiettorie ideali con relativo margine di manovra accettato dal modello della barriera di Milano Est (A4 - dir. Torino)

cambi di corsia nonostante comportino un allontanamento rispetto all'obiettivo, al fine di saltare la coda.

È regolabile in una scala da 0 a 5, dove l'aumento lineare su un valore della scala corrisponde a un aumento esponenziale dell'aggressività. Ciò significa che per ogni secondo in cui il veicolo sia costretto a restare fermo in coda esso avrà una probabilità di effettuare una manovra evasiva per cercare di ridurre il tempo di attesa secondo la formula seguente.

$$\bar{P} \propto \exp\left(\frac{\text{Aggressivity}}{5}\right) - 1$$

Ogni autista è caratterizzato da un'aggressività personale che è campionata secondo una distribuzione Beta con i parametri legati all'aggressività media degli autisti, ovvero $P_i \sim \text{Beta}(\bar{P}, 1 - \bar{P})$. In questo modo si riesce a simulare situazioni più realistiche con la presenza di autisti con stili di guida differenti.

2.6 Gestione delle collisioni

Ad ogni step tutti i veicoli segnalano all'ambiente la propria intenzione di movimento verso una cella che sia attualmente libera. Esiste la possibilità che 2 o 3 auto vogliano occupare la stessa cella, in questo caso l'ambiente ne estrae casualmente 1 e la decreta vincitrice. L'auto eletta potrà effettuare il movimento, le altre saranno costrette a fermarsi.

Il sistema realizzato garantisce l'impossibilità di generare incidenti, nonostante questa assunzione limiti la generalizzabilità del modello al mondo reale, è stata ritenuta una limitazione necessaria per evitare di andare ad aumentarne troppo la complessità.

Questa assunzione potrebbe variare in un possibile sviluppo futuro che possa prevedere che l'auto, vista l'impossibilità di muoversi nel punto voluto, sia in grado di riformulare la sua scelta.

Un limite dell'algoritmo utilizzato è quello di non considerare lo stato attuale delle auto nella scelta del veicolo a cui consentire il movimento. Ipoteticamente si potrebbe infatti pensare che un'auto in coda sia meno propensa a cambiare corsia vedendo sopraggiungere un veicolo a velocità sostenuta nella corsia da occupare, piuttosto che il comportamento opposto con l'auto in movimento che si arresta per lasciare cambiare corsia al veicolo in coda.

Questa ipotesi è dettata da un ragionamento deduttivo piuttosto che dati empirici, prima di valutarne l'implementazione sarebbe opportuno verificare la validità dell'assunzione sul campo, soprattutto per poter stimare effettivamente il valore numerico di questa differenza, e valutare se è costante o dipende da situazioni ambientali.

2.7 Comportamento complessivo

In questa sezione sono raccolte rappresentazioni schematiche di tutte le componenti che determinano il comportamento complessivo, riassumendo quanto descritto in

questo capitolo.

2.7.1 Movimento del veicolo

All'atto della creazione del veicolo vengono effettuate due operazioni:

- La scelta delle coordinate della cella obiettivo $(x^*, y^*) \in \mathbb{G}_{\text{tipo}}$, estratte in maniera casuale tra le coordinate dall'insieme di tutti i caselli in cui può effettuare il pagamento $\mathbb{G}_{\text{tipo}} \leftarrow \bigcup (x', y') \mid \text{Gate}_{\text{tipo}} \in (x', y')$.
- La determinazione dell'aggressività del veicolo estratta in accordo con quella media impostata. La distribuzione da cui viene estratto questo parametro è definita come $A \sim \text{Beta}(\bar{A}, 1 - \bar{A})$, con $\bar{A} \propto \exp(\text{Aggressivity}/5) - 1$.

Successivamente, ad ogni turno, ogni veicolo esegue la logica riportata in figura 12.

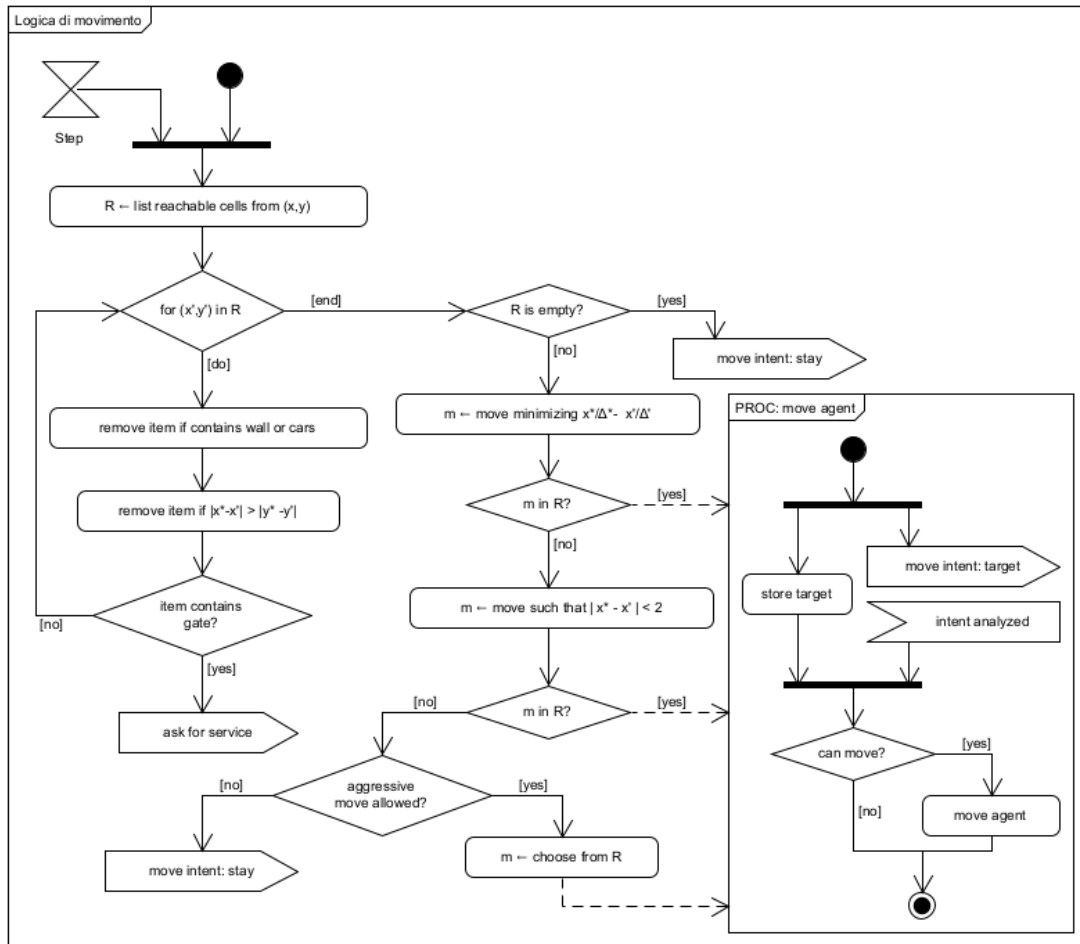


Figura 12: Diagramma della meccanica di movimento dei veicoli (Δ^i indica l'ampiezza della carreggiata in i)

2.7.2 Controllo delle collisioni

La richiesta di movimento dei veicoli viene approvata o rifiutata dall'ambiente secondo la logica riportata in figura 13, con la fase di scelta che avviene con un'estrazione casuale in cui ogni elemento dell'insieme ha la stessa probabilità di essere selezionato.

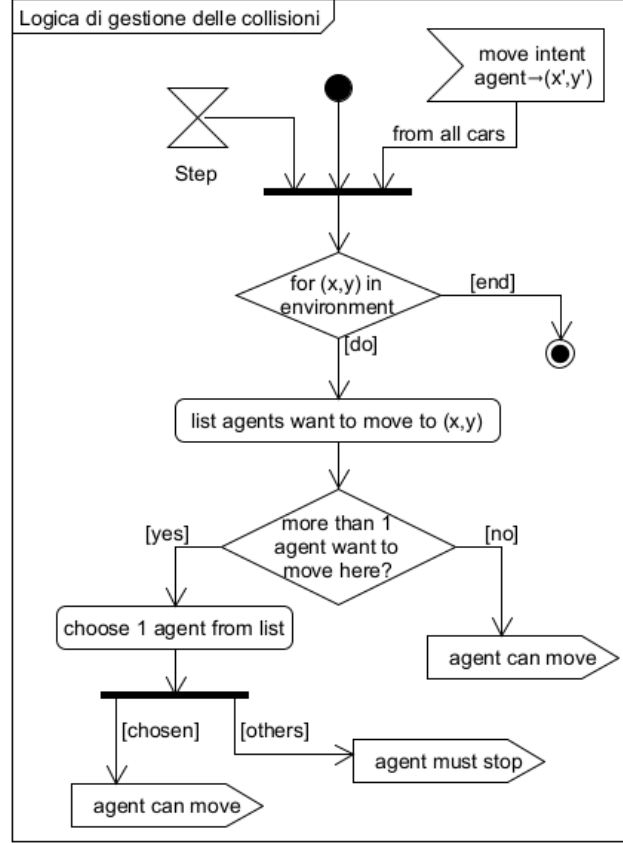


Figura 13: Diagramma della meccanica di prevenzione degli incidenti

2.7.3 Gestione del pedaggio

Ad ogni turno ogni casello esegue la logica riportata in figura 14, affidandosi alla distribuzione riportata nella formula, in cui l'unica differenza tra caselli che accettano tipologie di pagamento differenti risiede nella durata media del servizio.

$$W \sim \text{Poisson}(\lambda = \#(\text{step/sec}) \cdot \#(\text{sec}_{\text{servizio}} \mid \text{casello}_{\text{tipo}}))$$

2.7.4 Posizionamento del veicolo

Il posizionamento del veicolo avviene nelle celle definite dalla coppia di coordinate $(x, y) \mid y = 0 \wedge \text{Wall} \notin (x, y)$. Per ognuna delle celle di questo insieme l'ambiente ad ogni turno esegue la logica riportata in figura 15, con le distribuzioni riportate nelle formule seguenti.

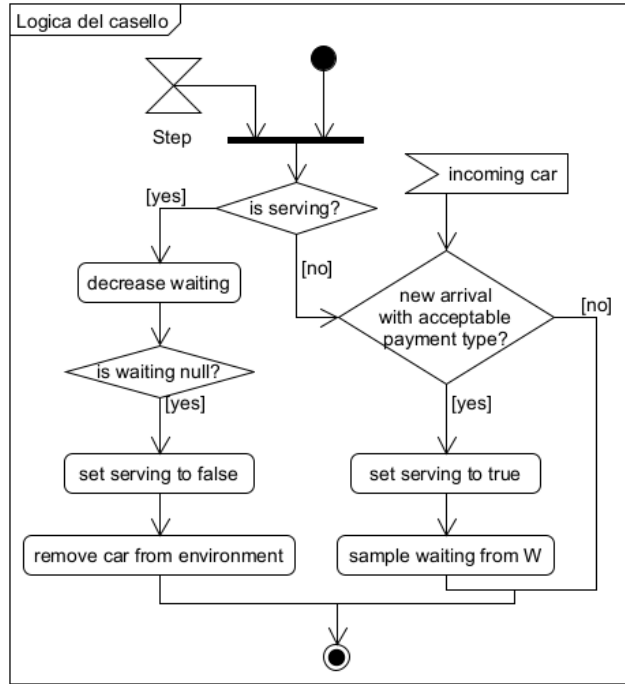


Figura 14: Diagramma della meccanica di gestione delle tempistiche di servizio del casello

$$W \sim \text{Poisson} \left(\lambda = \frac{\#(\text{corsie}) \cdot \#(\text{step/min})}{\#(\text{auto/min})} \right)$$

$$T \sim \begin{cases} \text{PASS}, p = \#(\text{paga}_{\text{telepass}}) / \sum_{\text{tipo}} \#(\text{paga}_{\text{tipo}}) \\ \text{CARD}, p = \#(\text{paga}_{\text{carta}}) / \sum_{\text{tipo}} \#(\text{paga}_{\text{tipo}}) \\ \text{CASH}, p = \#(\text{paga}_{\text{contanti}}) / \sum_{\text{tipo}} \#(\text{paga}_{\text{tipo}}) \end{cases}$$

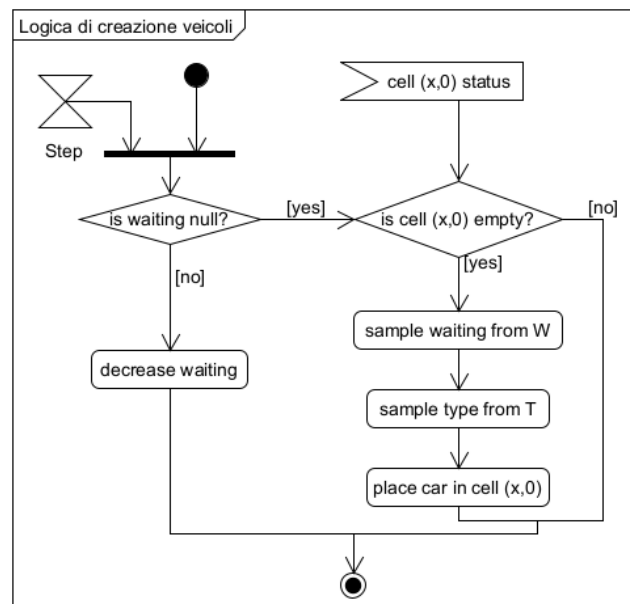


Figura 15: Diagramma della meccanica di posizionamento dei veicoli

3 Risultati

3.1 Esecuzione

Utilizzando il modello già presentato della barriera di Milano Est, sull'autostrada A4 Torino-Trieste in direzione Torino siamo andati a verificare il funzionamento del simulatore.

Nel dettaglio la barriera è composta da 15 caselli di cui 4 Telepass, 5 per i pagamenti con carta e 6 casse per pagamento cash. Si ricorda che rispetto la barriera reale sono assenti i 2 caselli Telepass aggiuntivi sulla destra (principalmente utilizzati da mezzi pesanti) e che rispetto alla situazione reale sono assenti veicoli diversi da automobili.

Prima di iniziare la simulazione, in assenza di osservazioni empiriche, abbiamo scelto di considerare i tempi di servizio presentati in [10], poiché si tratta dell'unico studio che presenta dati su tutti e 3 le tipologie di casello.

Per quanto riguarda la distribuzione del metodo di pagamento utilizzato dai veicoli invece l'idea iniziale di utilizzare i dati forniti in [1] è stata scartata poiché con i tempi di servizio considerati già con livelli di traffico bassi si potevano osservare situazioni simili a quelle riportate in figura 16.

Tempo trascorso: 06:49

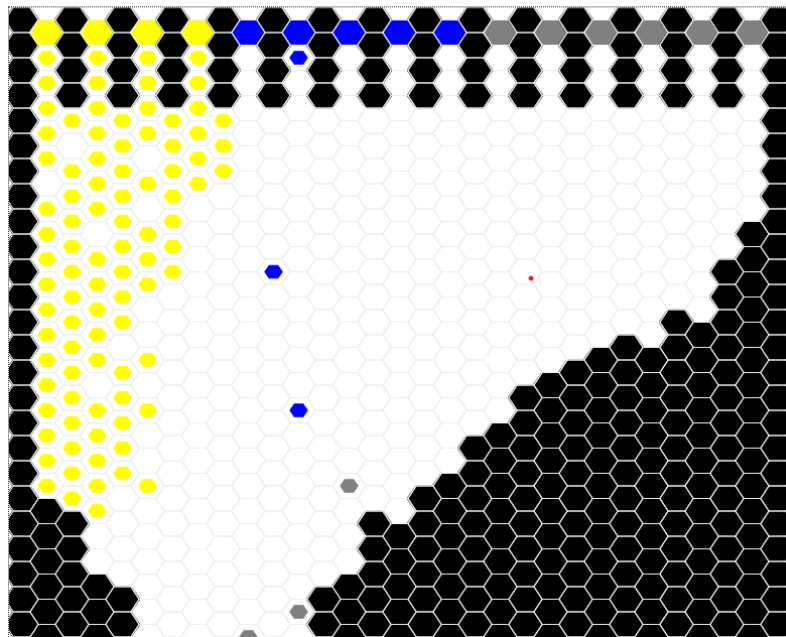


Figura 16: Esempio di simulazione con parametri non corretti che causa la creazione di traffico tra i soli utenti Telepass

Andare ad effettuare simulazioni con dati iniziali sicuramente errati avrebbe prodotto risultati poco significativi. Non disponendo di studi osservazionali su questo casello abbiamo deciso di assumere corretti i tempi di servizio, poiché li riteniamo meno variabili tra nazioni diverse rispetto al tasso di utilizzo del Telepass o tecnologie similari.

Abbiamo quindi assunto un tasso di utilizzo del Telepass pari al 46% dei veicoli, dei pagamenti con carta per il 34% e l'utilizzo di contanti per il restante 20%. Simulando con questi dati le situazioni di traffico sembrano rappresentare meglio delle situazioni reali come osservabile in figura 17.

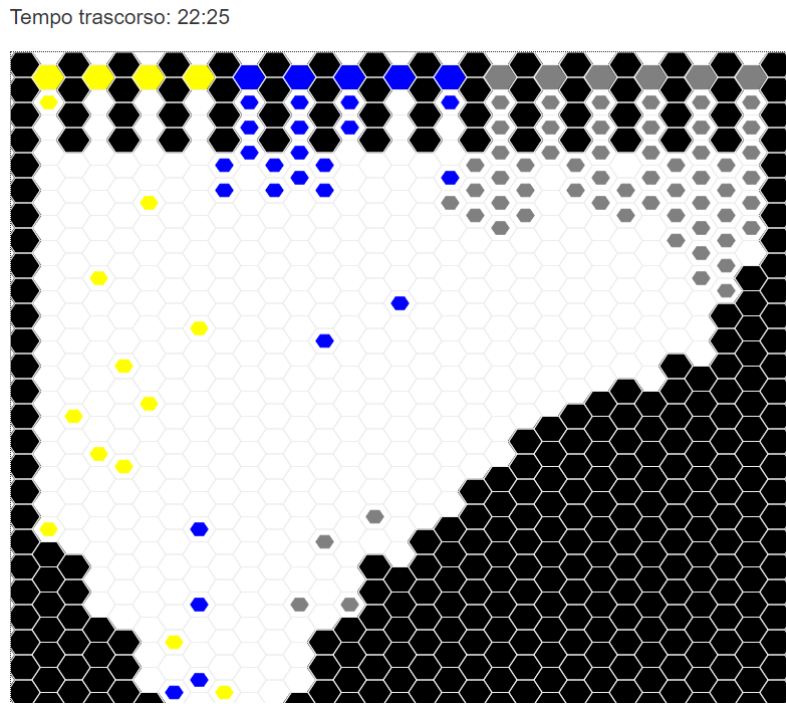


Figura 17: Simulazione con parametri aggiustati per avere situazioni di traffico più realistiche

Ripetendo 25 esecuzioni con flussi di arrivo di diversa entità abbiamo osservato il comportamento del modello in diverse situazioni di traffico. Come osservabile nel diagramma fondamentale (figura 18), la curva del flusso in relazione della densità appare sensata.

Si può notare infatti come per densità che non comportino l'accumulo di traffico (circa 17 veh/km) i punti si dispongano seguendo idealmente una retta, con flussi maggiori iniziano a formarsi rallentamenti ma l'efficienza globale del sistema resta elevata. Una volta raggiunte densità troppo elevate si ha una saturazione che comporta la diminuzione del flusso.

Il fatto di non arrivare a saturazione completa e l'azzeramento totale del flusso è probabilmente dovuta al limite imposto dal modello nel numero massimo di arrivi.

Tuttavia, poiché nessuno degli studi individuati presenta risultati in termini di diagramma fondamentale, non risulta possibile confrontare quanto ottenuto con altri modelli di incolonnamento davanti a un casello. Ai fini della validazione utilizziamo quindi differenti metriche.

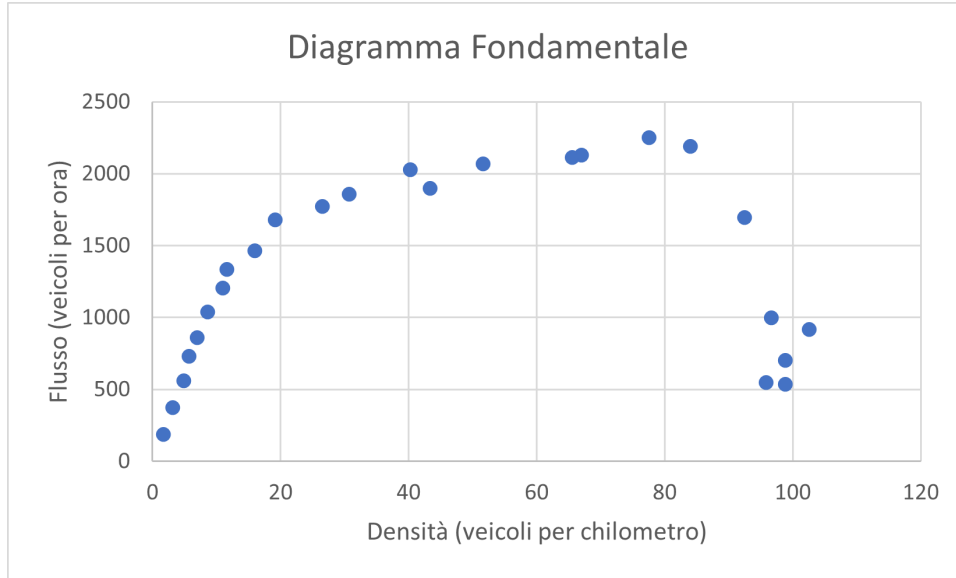


Figura 18: Simulazione con parametri aggiustati per avere situazioni di traffico più realistiche

3.2 Validazione

Tra gli articoli osservati si nota una diffusa leggerezza nella validazione del modello presentato, fatto che non permette la riproducibilità dei risultati presentati.

A titolo esemplificativo, in [4] non vengono riportati i tempi di servizio per tipo di casello utilizzato, tutti i risultati ottenuti sono quindi da assumere corretti senza alcuna possibilità di riproducibilità.

Abbiamo considerato che provare a stimare i valori mancanti per fare in modo che il nostro modello si avvicinasse ai risultati ottenuti negli articoli analizzati avrebbe sicuramente causato un bias e una possibile sovrastima della qualità proprio a causa del fatto che andare a cercare la combinazione di parametri più adatta per mostrare la similarità tra i risultati non sarebbe stata una scelta equa.

A causa dell'incompletezza dei dati forniti è impossibile effettuare una validazione su dati reali, ci affidiamo invece ad un confronto con il modello simulativo utilizzato in [5].

Anche in questo caso mancano alcune informazioni, in particolare relativamente al numero di corsie della carreggiata prima dell'allargamento per raggiungere tutti i caselli, tuttavia non lo consideriamo di vitale importanza ai fini della valutazione dei tempi di attesa.

L'articolo si concentra sulle barriere di **Goethals Bridge**, **Holland Tunnel** e **Lincoln Tunnel** sia per i picchi di traffico mattutini sia per quelli pomeridiani. Va precisato che delle tre solo la prima situazione è relativa a un casello in situazione di traffico autostradale.

In tutti i casi sono presenti solo 2 tipi di caselli: uno per il pagamento con Telepass e un altro misto; tuttavia, come indicato anche nello stesso si può assumere che gli

utenti Telepass prediligano l'utilizzo di corsie riservate, soprattutto in situazioni di traffico intenso.

Pertanto nella nostra simulazione esistono solo i pagamenti con Telepass e con carta secondo la distribuzione fornita dagli autori.

Siamo andati a simulare 30 minuti di arrivi uniformi e calcolare il tempo di attesa medio tra tutti gli utenti ovvero:

$$\Delta_t(\text{Medio}) = \frac{\#(\text{Usa Pass}) \cdot \Delta_t(\text{Usa Pass}) + \#(\text{Usa Carta}) \cdot \Delta_t(\text{Usa Carta})}{\#(\text{Usa Pass}) + \#(\text{Usa Carta})}$$

Abbiamo poi confrontato i valori ottenuti con quanto riportato nel paper e, come riportato in tabella 3, sembra esserci un buon adattamento. Tuttavia va segnalato che il nostro modello sembra funzionare meglio nei casi di traffico più intenso, presentando un valore assoluto dell'errore relativo generalmente più basso in questi casi. Sembra inoltre che l'errore relativo tenda ad essere principalmente minore di 0: sembrerebbe che il nostro modello sia più efficiente rispetto a quanto ottenuto dagli altri autori.

È utile ricordare che il fatto che sia maggiormente efficiente non è un fattore positivo, lo scopo della simulazione è quello di ottenere risultati che avrei effettuando osservazioni nel mondo reale, in questo caso assumendo il mondo reale come quanto simulato nel lavoro originale il nostro simulatore tende a sottostimare gli effetti del traffico.

Tabella 3: Confronto dei secondi di attesa medi per veicolo tra le simulazioni nell'articolo originale e quella qui proposta con relativo errore

Ambiente	[5]	Simulazione	Errore Relativo (%)
Goethals Bridge - AM peak	79,36	74,88	-5,65
Goethals Bridge - PM peak	358,57	353,89	-1,31
Holland Tunnel - AM peak	39,65	37,92	-4,36
Holland Tunnel - PM peak	155,24	156,85	1,04
Lincoln Tunnel - AM peak	86,74	85,53	-1,39
Lincoln Tunnel - PM peak	80,40	82,25	2,30

In figura 19 si può anche osservare che abbiamo ottenuto un coefficiente di correlazione pari al **99,95%** che ci permette di confermare la bontà del nostro modello.

3.3 Estensioni

Senza applicare modifiche al modello, ma solo con il settaggio dei parametri relativi alla situazione analizzata in [3], è possibile valutare quale sia la disposizione dei caselli che comporti una maggiore sicurezza.

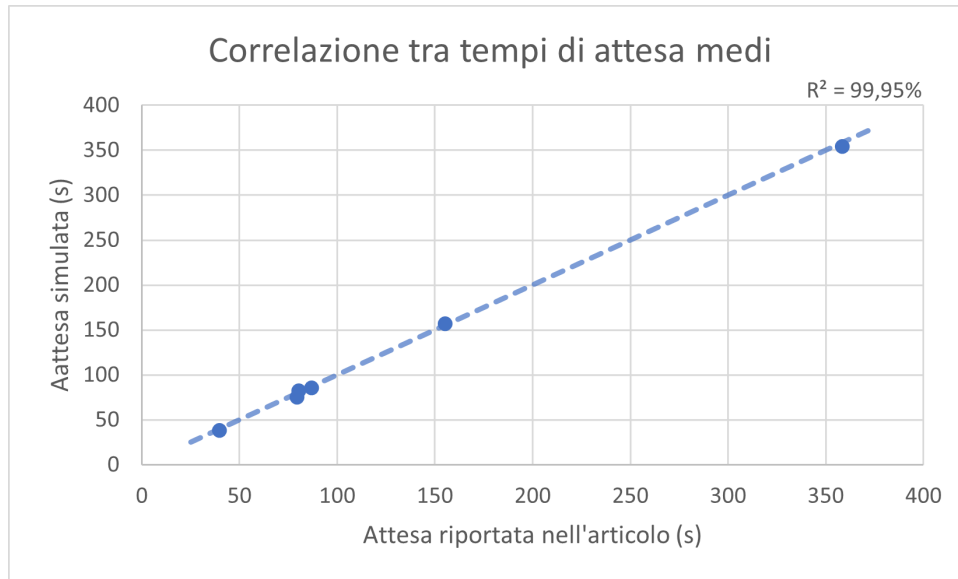


Figura 19: Correlazione tra i risultati ottenuti e quelli attesi dallo studio precedente

Nonostante il nostro modello preveda l'impossibilità per due veicoli di collidere, appare sensato assumere che il numero di volte che il gestore dell'ambiente debba intervenire per evitare la collisione sia correlato con il numero di incidenti effettivi che avvengono realmente.

Per la creazione del dataset aggiungiamo al modello un collezionatore di dati che salva una media mobile con ritardo di 5 minuti del tasso di collisioni per mille auto.

Non essendo disponibili in [3] risultati quantitativi, utilizziamo le conclusioni tratte dagli autori per valutare se il modello realizzato sia in linea con quanto indicato nel paper.

In particolare sia nel caso della barriera *A12 - Lucca Ovest* (figura 20), sia in quella *A12 - Livorno* (figura 21), si osserva che quello presentato come *Minimal Risk Layout* porti a un tasso di collisioni attese più basso rispetto alla disposizione dei caselli del *Maximal Risk Layout*.

Si può notare come nel primo caso la riduzione del rischio converga a un calo del numero di interventi dell'ambiente per la risoluzione di collisioni di quasi il 2 per mille, mentre nel secondo caso si raggiunga una riduzione addirittura del 3 per mille.

Appare quindi che i nostri risultati coincidano con i risultati forniti nell'articolo originale, nonostante l'assenza di indicazioni nel paper relative alla diminuzione del rischio effettiva non ci permette di accertare di aver ottenuto gli stessi risultati.

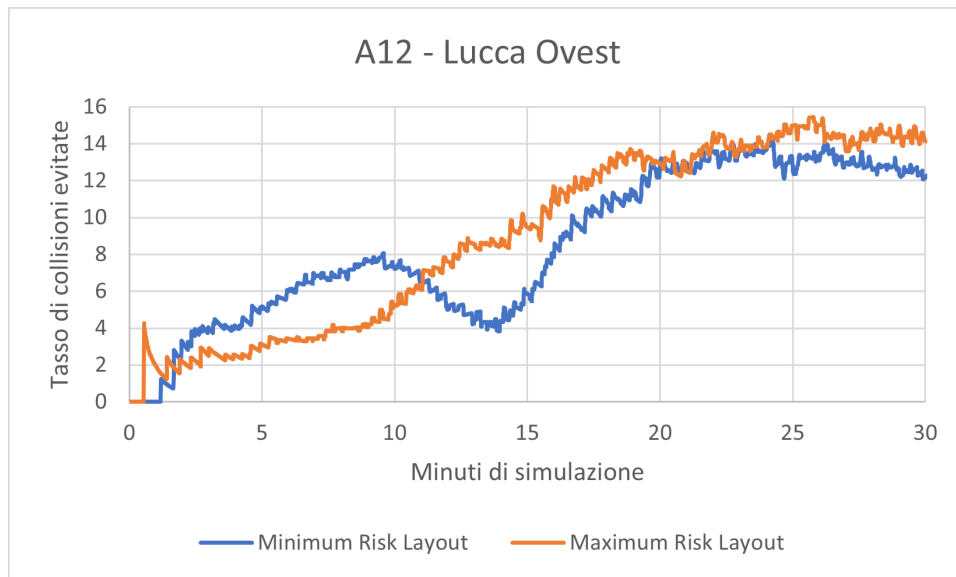


Figura 20: Media mobile del tasso di collisioni per 1000 auto alla barriera *A12 - Lucca Ovest*

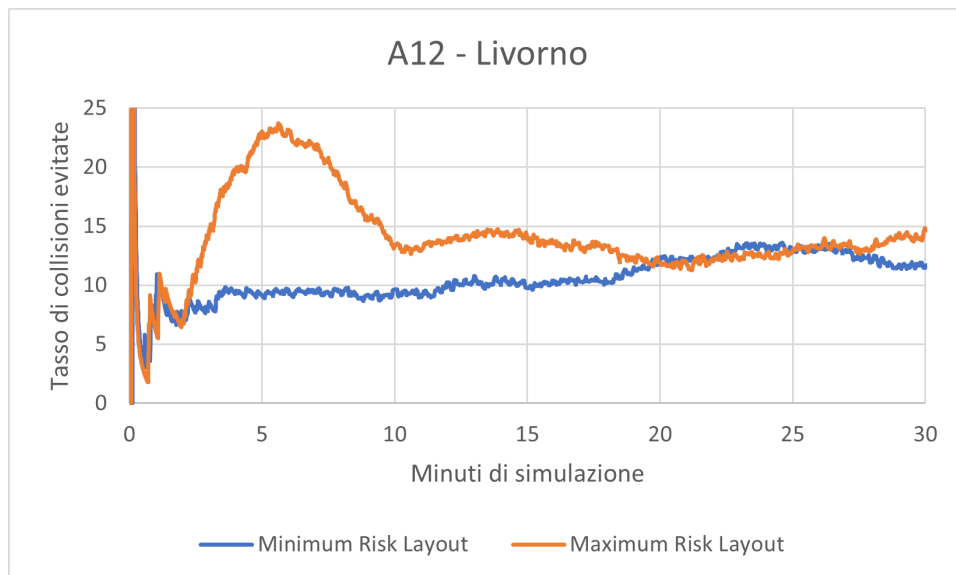


Figura 21: Media mobile del tasso di collisioni per 1000 auto alla barriera *A12 - Livorno*

4 Conclusioni

Abbiamo mostrato come un modello ad agenti abbastanza semplice possa simulare piuttosto accuratamente il fenomeno dell'accumulo di veicoli in entrata ad un casello.

L'analisi del fenomeno delle code davanti a un casello è interessante per molteplici aspetti:

- I tempi di percorrenza, se l'accumulo di traffico per pagamenti che richiedono tempo di servizio maggiore può causare occlusione della carreggiata anche per veicoli dotati di Telepass.
- Il rischio di incidenti, dovuto alla presenza di molti veicoli intenzionati a compiere cambi di corsia con l'intenzione di raggiungere il casello di interesse.
- La struttura stradale, dalle dimensioni della carreggiata alla numerosità e disposizione dei caselli in modo da migliorare afflusso e deflusso dei veicoli.

Il vantaggio rispetto alla modellazione matematica del fenomeno è quello di permettere l'estensione per la misurazione di diverse metriche senza andare a effettuare modifiche strutturali. Ne è stata mostrata l'applicabilità calcolando, oltre al semplice tempo di percorrenza, una stima sul tema degli incidenti.

4.1 Limiti e sviluppi futuri

Un limite è dato da **MESA**, il framework utilizzato, che si mostra ancora piuttosto acerbo in alcuni aspetti: su tutti il fatto di non prevedere modalità con cui l'utente possa modificare parametri del modello in tempo reale senza forzare il riavvio dell'esecuzione.

Analizzando criticamente il modello da noi proposto invece risulta sicuramente approfondibile l'aspetto dell'algoritmo di scelta del casello verso cui dirigersi che è sicuramente molto più complessa di quanto da noi assunto, come peraltro già descritto in precedenza.

Rilasciando il modello con licenza MIT³ speriamo che il quanto presentato possa essere ulteriormente aggiornato, o utilizzato come modello base di riferimento per dimostrare l'esistenza di strategie significativamente migliori.

³<https://github.com/RaffaeleMorganti/Toll-Gate-Simulator>

Riferimenti

- [1] A. Pompigna e R. Mauro, «A multi-class time-dependent model for the analysis of waiting phenomena at a motorway tollgate», *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, n. 2, pagg. 237–256, 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2020.09.001.
- [2] S. Kim, «The toll plaza optimization problem: Design, operations, and strategies», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 45, n. 1, pagg. 125–137, 2009, doi: 10.1016/j.tre.2008.03.004.
- [3] A. Pratelli e F. Schoen, «Multi-toll-type motorway stations optimal layout», *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 89, 2006, doi: 10.2495/UT060881.
- [4] V. Astarita, M. Florian, e G. Musolino, «A microscopic traffic simulation model for the evaluation of toll station systems», pagg. 692–697, 2001, doi: 10.1109/ITSC.2001.948744.
- [5] D. Ozmen-Ertekin, K. Ozbay, S. Mudigonda, e A. M. Cochran, «Simple Approach to Estimating Changes in Toll Plaza Delays», *Transportation Research Record*, vol. 2047, n. 1, pagg. 66–74, 2008, doi: 10.3141/2047-08.
- [6] F. Ksontini, S. Espié, Z. Guessoum, e R. Mandiau, «Representation of the Agent Environment for Traffic Behavioral Simulation.», *Transactions on Computational Collective Intelligence*, vol. 15, pagg. 49–68, 2014, doi: 10.1007/978-3-662-44750-5_3.
- [7] K. Wang, P. Wang, X. Chen, e L.-T. Zhao, «Multiobjective Optimization Design of Toll Plaza», *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pagg. 1–9, 2020, doi: 10.1155/2020/2324894.
- [8] M. F. Aycin, «Simple methodology for evaluating toll plaza operations», *Transportation research record*, vol. 1988, n. 1, pagg. 92–101, 2006, doi: 10.1177/0361198106198800112.
- [9] C. Bari, S. Chandra, A. Dhamaniya, e Y. Navandar, «Novel Approach for Design of Merging and Diverging Length at Toll Plazas: A Case Study», *Transportation Research Record*, vol. 2676, n. 3, pagg. 17–37, 2022, doi: 10.1177/03611981211049105.
- [10] B. Sadoun, «Optimizing the Operation of a Toll Plaza System Using Simulation: A Methodology», *SIMULATION*, vol. 81, n. 9, pagg. 657–664, 2005, doi: 10.1177/0037549704047603.
- [11] R. Opoku-Boahen, C. A. Adams, e M. G. Salifu, «Performance Evaluation Of Two Toll Plazas On The Accra – Tema Motorway», *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 2 (5), pagg. 16–23, 2013.
- [12] V. Gulewicz e J. Danko, «Simulation-based approach to evaluating optimal lane staffing requirements for toll plazas», *Transportation research record*, vol. 1484, pag. 33, 1995.