Progetto di Sistemi Complessi: Modelli e Simulazione
Supermarket Simulation

Tonelli Lidia Lucrezia (m. 813114)
Grassi Marco (m. 830694)
Giudice Gianluca (m. 829664)

University of Milano Bicocca

Settembre 2021

Introduzione

Il nostro progetto è un modello basato su agenti che **simula** il comportamento dei clienti in un supermercato durante le fasi di scelta della coda relativa a diversi tipi di casse.
Prenderemo in considerazione 3 tipi di casse diverse (standard, self-service e self-scan) e 2 tipi di scelte fatte dai clienti (scelta della coda, jockeying).
L'utilizzo di code è fondamentale per gestire le grandi quantità di clienti.

Obiettivo

Sperimentare diverse **configurazioni di casse** e **strategie di scelta della coda** per gestire in modo ottimale il flusso di clienti e ridurre al minimo il tempo d'attesa passato in coda.

Un supermercato è un **sistema complesso** in cui agiscono diverse entità, come clienti e casse.
Si verificano aspetti emergenti difficilmente prevedibili dovuti a diversi aspetti:

- Flusso di clienti in ingresso variabile
- Numero di prodotti che un cliente acquista
- Numero di casse aperte contemporaneamente
- Strategia di scelta della coda dei clienti
- Strategia di cambio della coda dei clienti

Stato dell'arte

Il principale spunto per il modello è stato l'articolo *Data-driven simulation modeling of the checkout process in supermarkets: Insights for decision support in retail operations*[1], che utilizza 5 strategie di scelta della coda confrontando i **tempi d'attesa medi** dei clienti.

[1] Antczak, Tomasz and Weron, Rafał and Zabawa, Jacek, 2020

Estensioni

Abbiamo voluto estendere il modello introducendo nuovi concetti:

- **Jockeying**[2]: quando un cliente sta attendendo in coda, confronta i tempi d'attesa della propria coda con quelli delle code vicine e può decidere di spostarsi di conseguenza.
- **Code parallele e N-Fork**[3]: vogliamo indagare sull'effetto della disposizione delle code sui tempi di attesa medi, questa può essere **parallela**, se ogni cassa ha una coda dedicata, oppure **N-Fork**, se c'è un'unica coda condivisa.

[2] *On jockeying in queues*, E. Koenigsberg, 1966

[3] *Methods for improving efficiency of queuing systems*, Yanagisawa, D and Suma, Y and Tanaka, Y and Tomoeda, A and Ohtsuka, K and Nishinari, K, 2011

Estensioni

- **Casse self-scan**: l'articolo sopra citato prende in considerazione solo 2 tipi di casse, le casse **standard** e le casse **self-service**. Nel modello sono presenti le casse **self-scan**, usate attualmente in molti supermercati, che permettono di scannerizzare i prodotti in fase di spesa e rendere la fase di pagamento molto più veloce.
- **Simulazione non deterministica**: per far emergere comportamenti non banali nel supermercato e rendere più realistiche le simulazioni sono state aggiunte alcune variabili probabilistiche.

Approccio ad agenti

- **Sistema multiagente** sviluppato in Python con il framework Mesa
  - **Ambiente**: supermercato
    - Il supermercato è una struttura divisa in zone, composta da code e casse
    - I clienti entrano nel supermercato per fare la spesa minimizzando il tempo impiegato
  - **Agenti**: clienti e casse
- I clienti sono agenti intelligenti (pianificano e decidono) con una componente impredicibile che fa emergere un comportamento complesso interagendo con gli altri agenti

Ambiente

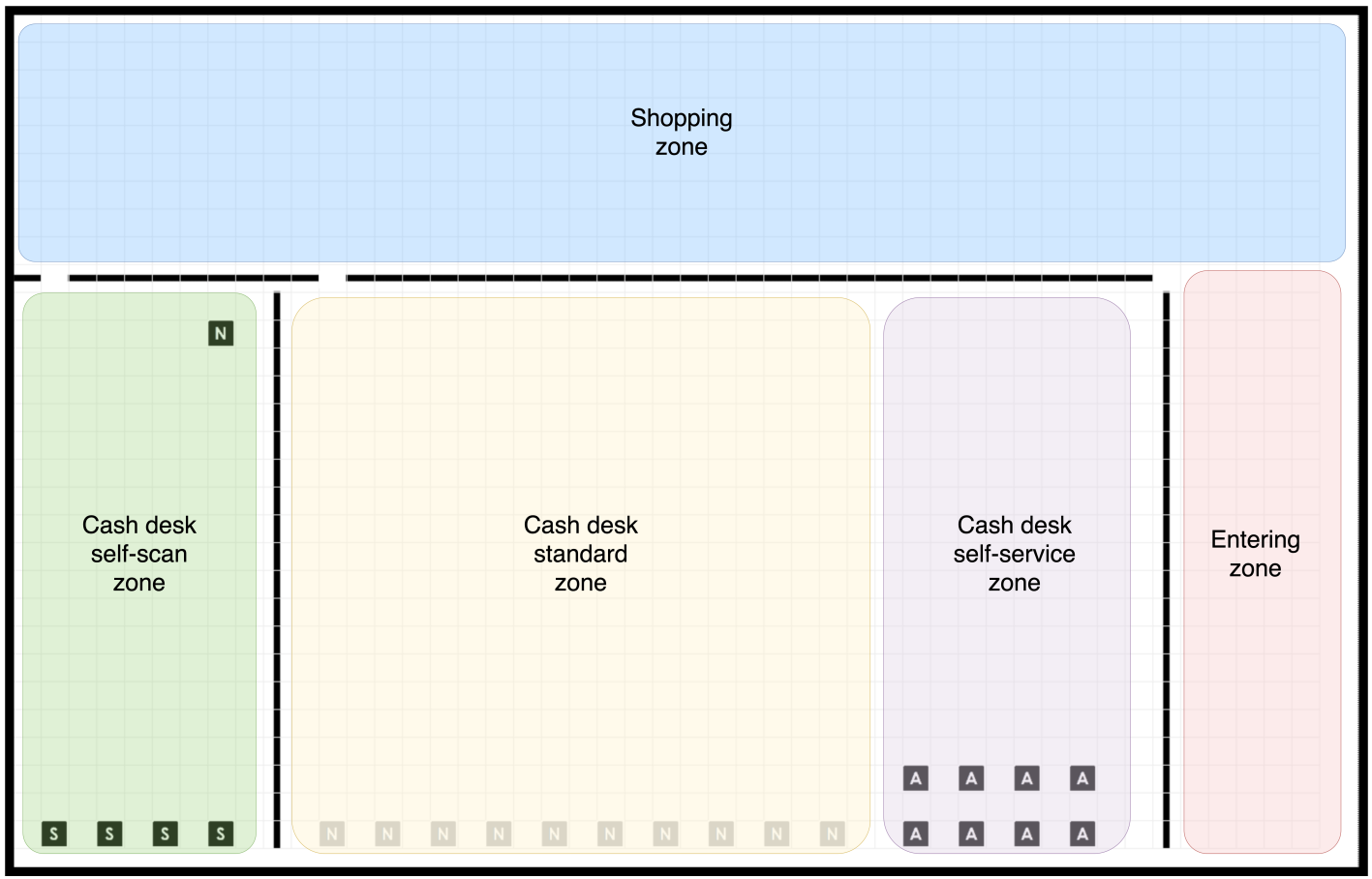


Figure: Stuttura del supermercato diviso in zone.

Ambiente

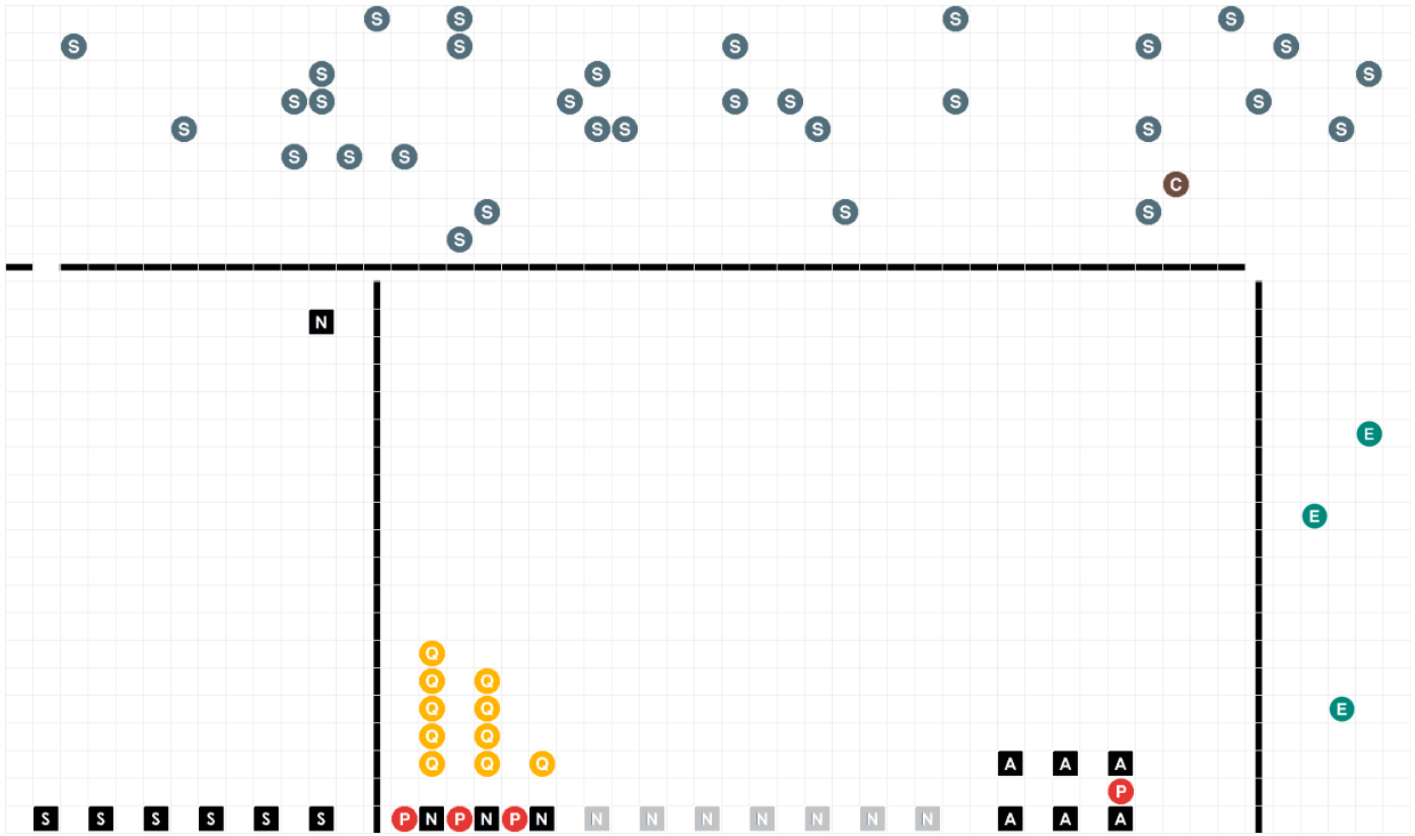


Figure: Interazione tra agenti e ambiente.

Agente Cliente

- I clienti sono gli agenti principali, si muovono nel supermercato con l'obiettivo di fare la spesa e attendere il minimo tempo possibile in coda
- Per minimizzare il tempo in coda il cliente usa strategie di **scelta della coda** e di **jockeying**, quindi ha bisogno di una pianificazione
- Il cliente è un agente di tipo *utility-based* perchè per la pianificazione e la valutazione dei tempi d'attesa utilizza una utility function

Agente Cliente - workflow

1. **Attesa all'entrata del supermercato**: l'agente è in attesa fino a che non può mettersi nella zona d'entrata.
2. **Fase di shopping**: si muove nella zona di shopping e inizia a raccogliere elementi fino a raggiungere il *basket size* desiderato; questa fase dipende dalla velocità di shopping, un parametro del modello.
3. **Scelta della coda**: finita la spesa, deve scegliere la cassa in base alla utility function; viene scelta la coda q^* tale che

$$q^* = \underset{q \in Q}{\operatorname{argmin}} f(q)$$

dove Q è l'insieme delle code dedicate e f varia con la strategia.

Agente Cliente - workflow

1. **Attesa in coda e jockeying**: mentre il cliente è in coda può decidere di lasciarla per una coda migliore. Considera le 2 code adiacenti (parametro del modello) alla propria e per ognuna calcola la coda migliore secondo la sua strategia di jockeying. Se il "guadagno" risulta maggiore di un certo **threshold**, allora il cliente può decidere di cambiare coda. Si estrae quindi un numero casuale che determina se cambiare coda o no (perchè non tutte le persone fanno jockeying).
2. **Attesa alla cassa**: il cliente viene servito dalla cassa e deve attendere la fine del pagamento per uscire dal supermercato.

Agente Cassa

- I clienti, una volta conclusa la fase di spesa, scelgono una coda in attesa di essere serviti in cassa per il pagamento.
- Ogni cassa ha al più una coda associata.
- La cassa è un'agente di tipo *model-based reflex*, in cui lo stato è il cliente che si sta processando in un determinato momento.
- Il comportamento di una cassa è piuttosto semplice:
  1. Prendi un cliente dalla coda (se disponibile)
  2. Processa il cliente
  3. Ripeti
- Le code (FIFO) ammissibili per ogni cassa sono di 2 tipi:
  1. Coda dedicata: ogni cassa ha una coda dedicata
  2. Coda condivisa: una coda è associata a più casse, tutte le casse serviranno i clienti che si sono accodati alla coda condivisa
- Nel modello sono stati modellati 4 tipi di casse diverse.

Agente Cassa - Tipo 1: Standard

- Rappresenta la classica cassa di un supermercato.
- Questa cassa può avere una coda dedicata o condivisa, in entrambi i casi:
  1. Il cliente si accoda
  2. La cassa prende il primo cliente dalla coda
  3. Il cassiere processa gradualmente tutti gli articoli del cliente
  4. Ripeti

Agente Cassa - Tipo 2: Self-service

- Cassa in cui non è presente un cassiere ma è il cliente stesso a dover passare uno alla volta gli articoli acquistati.
- Tutte le casse self-service hanno una coda condivisa
  1. Il cliente si accoda alla coda condivisa
  2. La cassa prende il primo cliente dalla coda
  3. Il cliente processa ogni articolo
  4. Il cliente lascia il supermercato

Agente Cassa - Tipo 3: Self-scan

- Il cliente scannerizza gli articoli durante la spesa mediante un dispositivo fornito dal supermercato.
- Avendo già scanerizzato gli articoli a priori non è necessario farlo in cassa.
- Vengono effettuati controlli a campione per verificare il corretto comportamento dei clienti (tutti gli articoli devono essere stati effettivamente scannerizzati durante la spesa).
- Tutte le casse hanno una coda condivisa
  1. Il cliente si accoda alla coda condivisa
  2. La cassa prende il primo cliente dalla coda
  3. Nel caso in cui il cliente è stato estratto per una rilettura della spesa si reca ad una cassa riservata, altrimenti paga ed esce dal supermercato

Agente Cassa - Tipo 4: Riservata

- Comportamento analogo alla cassa standard.
- Ha una coda dedicata.
- Nel caso di rilettura alla cassa "self-scan", il cliente viene normalmente processato in questa nuova cassa.
- La rilettura può essere **parziale** (vengono controllati solo 10 elementi), o **totale** (viene controllata tutta la spesa).
- Nessun cliente può venire processato nella cassa riservata a meno di una rilettura.

Considerazioni

- Il modello da noi descritto é stato implementato con l'obiettivo di essere facile da modificare.
- Il comportamento degli agenti viene gestito con una macchina a stati finiti implementata tramite il pattern **State**. Questo isola logicamente aspetti quali azioni da compiere e rappresentazione grafica da assumere in determinati stati.
- Dove esistono diversi approcci ad una scelta, per esempio nella scelta della coda, questi vengono gestiti con il pattern **Strategy**, dando possibilitá di scelta tra piú opzioni e una facilitazione nel crearne di nuove.
- I parametri che regolano il modello descritti a seguire sono configurabili a piacere.

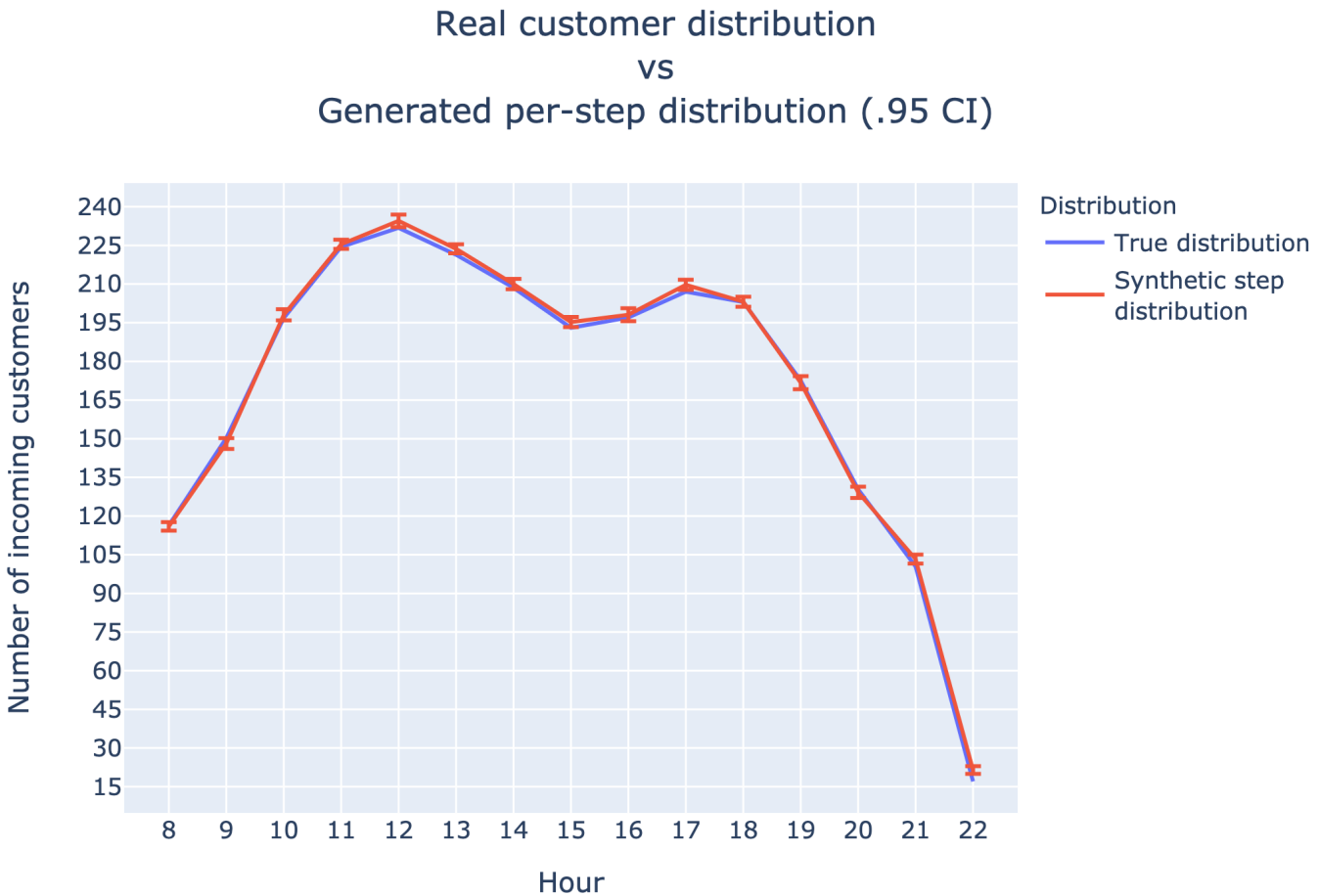
Parametri

- Configurazione del supermercato:
  - Dimensione delle zone (entering zone, shopping zone)
  - Numero di casse (standard, self-service o self-scan + 1 riservata)
  - Code N-fork o parallele per le casse standard
- Parametro per l'errore di stima del basket size: usato nelle strategie di scelta della coda e jockeying per simulare l'errore commesso dagli umani nello stimare la quantità di oggetti nei carrelli
- Jockeying:
  - Numero di code adiacenti considerate
  - Threshold
  - Probabilità di fare jockeying
- Distribuzione dei clienti in entrata (presa dai dati di Antczak e altri[4])
- Distribuzione dei basket size (presa dai dati di Antczak e altri[4])

[4] Antczak, Tomasz and Weron, Rafał and Zabawa, Jacek, 2020

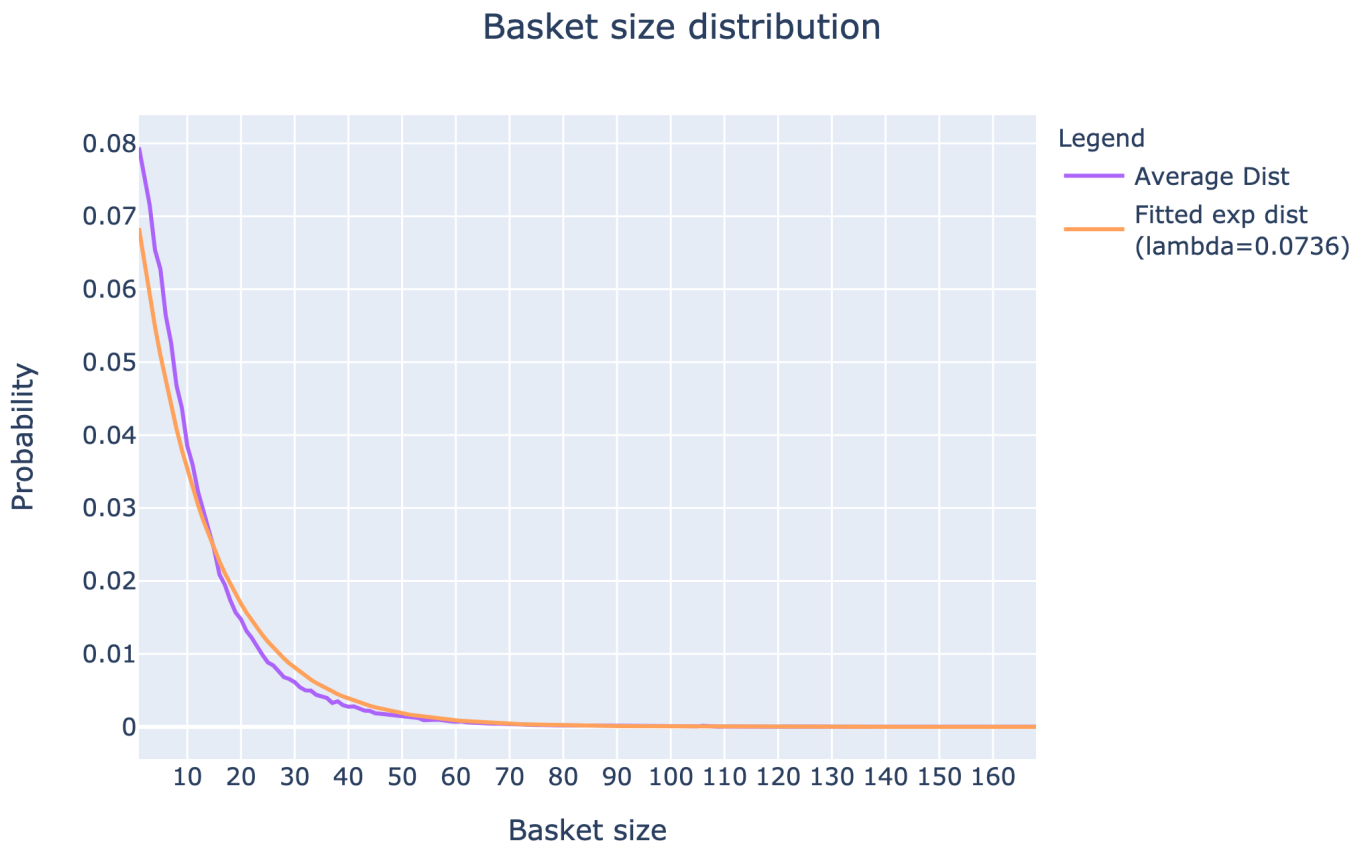
Parametri - distribuzione dei clienti

Nella figura si riporta la distribuzione di entrata dei clienti reale e la distribuzione generata effettuando normalizzazione, media e divisione per step.



Parametri - distribuzione dei basket size

Nella figura viene mostrata la distribuzione reale dei dati e la distribuzione esponenziale derivata aggregandoli, la quale viene usata nel modello per generare il basket size di ogni cliente.



Parametri

- Parametri di tempo:
  - Durata di uno step (attualmente 30 secondi)
  - Velocità di shopping del cliente: numero di articoli messi nel carrello ad ogni step
  - Tempo di elaborazione della spesa da parte delle casse: per le self-scan è 1 step, per le standard e le self-service è governato dai parametri $a, b, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$, presi dall'articolo di Antczak e altri sopra citato

Implementazione dei comportamenti e delle strategie

- Il cliente una volta presi tutti gli articoli si reca alla coda.
- La cassa self-scan deve essere scelta prima di fare la spesa e non è possibile cambiare.
- Il cliente vuole minimizzare il tempo speso all'interno del supermercato tramite:
  - **Scelta iniziale della coda**: il cliente sceglie la coda ottima rispetto ad una determinata strategia
  - **Fase di jockeying**: una volta in coda il cliente può scegliere di cambiarla se ne esiste una migliore

Scelta della coda

- Terminata la fase di spesa un cliente decide tra le casse aperte dove accodarsi individuando la coda ottimale per una determinata metrica.
- A questo comportamento fanno eccezione i clienti che hanno inizialmente optato per la modalitá di spesa self scan per i quali é obbligatorio recarsi alle casse di tipo self scan.
- Un cliente puó accodarsi ad una cassa self-service solo se ha un numero di prodotti inferiore al limite imposto.

Strategie di scelta della coda 1-2

La scelta della coda puó avvenire in base a 4 strategie:

1. Minor numero di elementi

$$\arg\min_{q} \sum_{i=1}^{N} \text{estimate-basket-size}(c_i) \tag{1}$$

   Per rendere piú realistico il calcolo é possibile "sbagliare" il conto di articoli per cliente tramite il parametro *standard deviation coefficient*.

2. Minor numero di persone

$$\arg\min_{q} |q| \tag{2}$$

Dove q é una coda e c_i é l'i-esimo cliente.

Strategie di scelta della coda 3-4

3. Minor tempo di attesa rispetto al tempo di servizio medio

$$\arg\min_{q} |q| * \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} (\text{total-service-time}(q_j)) \tag{3}$$

   Dove M é il numero di code nel supermercato

4. Minor tempo di attesa rispetto alla *power regression*

$$\arg\min_{q} |q| * \text{total-service-time}(q) \tag{4}$$

La quantità total-service-time è calcolata secondo le seguenti formule.

Formule cassa standard

- Transaction time

$$\text{transaction-time}_i = e^{a\log(\text{estimate-basket-size}(c_i))+b} \tag{5}$$

- Break Time

$$\text{break-time}_i = \frac{\beta^{\alpha}\text{estimate-basket-size}(c_i)^{\alpha-1}e^{-\beta\text{estimate-basket-size}(c_i)}}{\Gamma(\alpha)} \tag{6}$$

- Dove Γ è la funzione **gamma**

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1}e^{-x}dx \quad \forall z \in \mathbb{C} \tag{7}$$

- Total service time

$$\text{total-service-time}(q_j) = \sum_{i=1}^{N}(\text{transaction-time}_i + \text{break-time}_i) \tag{8}$$

$$a = 0.6984, \quad b = 2.1219, \quad \alpha = 3.074209, \quad \beta = \frac{1}{4.830613} \tag{9}$$

Formule cassa self-service

- Transaction time

$$\text{transaction-time}_i = e^{a\log(\text{estimate-basket-size}(c_i))+b} \tag{10}$$

- Break Time

$$\text{break-time}_i = e^{c\log(\text{estimate-basket-size}(c_i))+d} \tag{11}$$

- Total service time

$$\text{total-service-time}(q_j) = \sum_{i=1}^{N} (\text{transaction-time}_i + \text{break-time}_i) \tag{12}$$

$$a = 0.6725, \quad b = 3.1223, \quad c = 0.2251, \quad d = 3.5167 \tag{13}$$

Jockeying

- Un cliente fa **jockeying** se calcola che nelle code adiacenti a quella in cui è in attesa c'è un tempo di attesa minore, e quindi si sposta.
- Il *parametro di adiacenza* determina il numero di code adiacenti che il cliente prende in considerazione per il suo calcolo.
- Il cliente calcola un *guadagno* di tempo nel cambiare coda, se questo supera un certo threshold, allora fa jockey, altrimenti no perchè per lui "non ne vale la pena".
- Anche se esistono code migliori di altre, può non avvenire il jockey: viene estratto un parametro che rende il jockey aleatorio, in quanto non tutte le persone lo fanno.

Jockeying - strategie

- Sono 2 le strategie per fare jockeying:
  1. **Minimo numero di elementi**: è scelta la coda con il minor numero di elementi nei carrelli di tutti i clienti. Il guadagno è:

     $$g = \#\text{elementi nei carrelli nella coda pivot} - \min_{q \in Q_{adj}} \#\text{elementi nei carrelli}$$

  2. **Minimo numero di persone**: è scelta la coda con il minor numero di persone accodate. Il guadagno è:

     $$g = i - \min_{q \in Q_{adj}} |q|$$

     dove i è la posizione del cliente nella coda pivot

Simulazione

Introduciamo la definizione di densità di clienti ad ogni step al fine di avere una misura della gestione dell'affluenza di clienti nel negozio per le simulazioni.
La **densità** di clienti per step corrisponde al numero di clienti medio per ogni cassa; la densità allo step i è:

$$\text{density}_i = \frac{\#\text{ customers in the supermarket}}{\#\text{ open cashdesks}}$$

Validazione

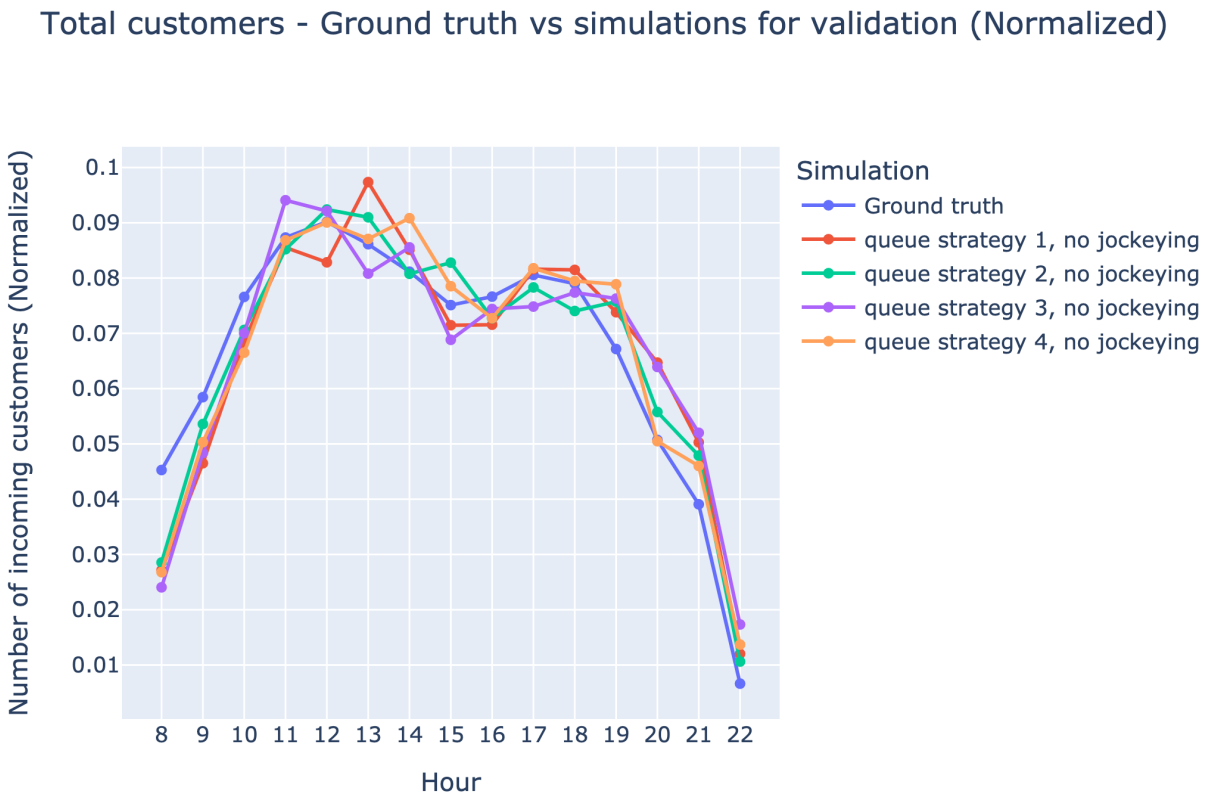
Simulazione con gli stessi parametri del lavoro di Antczak e altri[5]:

- 20 casse standard con code parallele
- 6 casse self-service
- No jockeying

4 simulazioni, una per ogni strategia di scelta della coda

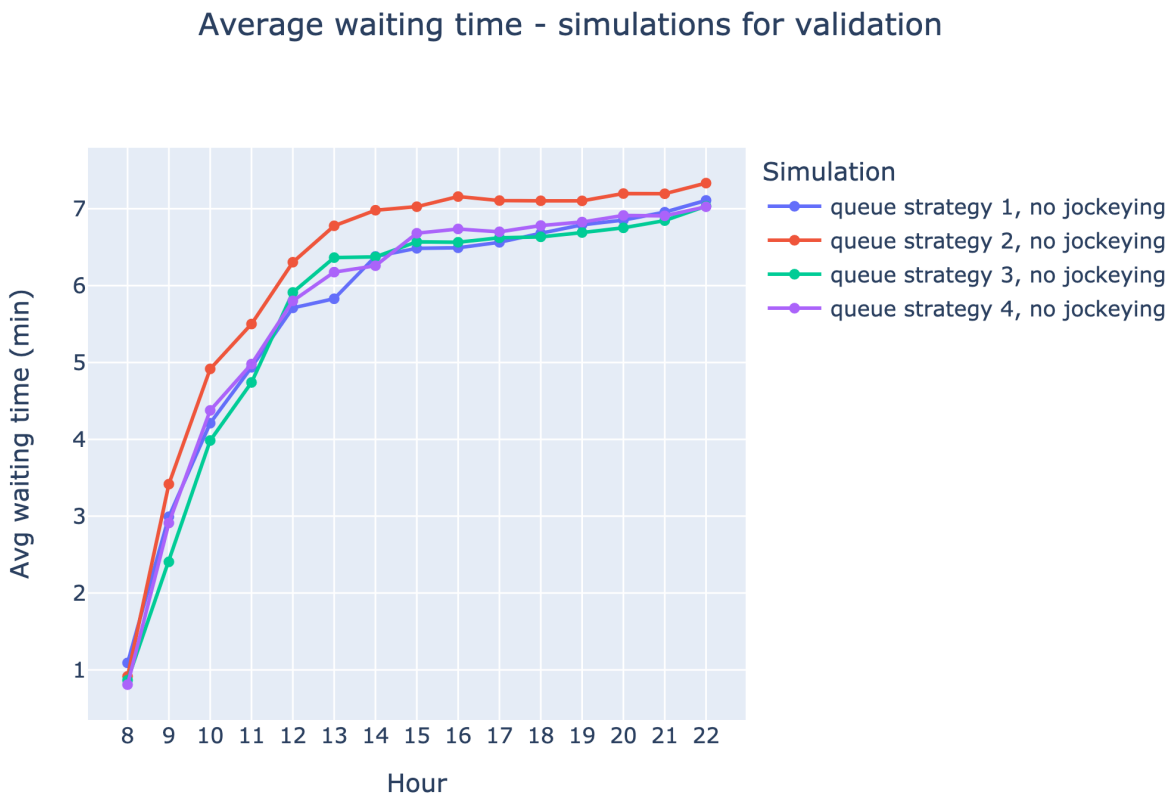
[5] *Data-driven simulation modeling of the checkout process in supermarkets: Insights for decision support in retail operations*, Antczak, Tomasz and Weron, Rafał and Zabawa, Jacek, 2020

Validazione



A parità di parametri il nostro modello e quello dell'articolo sopportano allo stesso modo il numero di clienti nel negozio.

Validazione



In assenza di jockey le strategie 3 e 4 sono quelle che tengono il tempo d'attesa medio più basso.

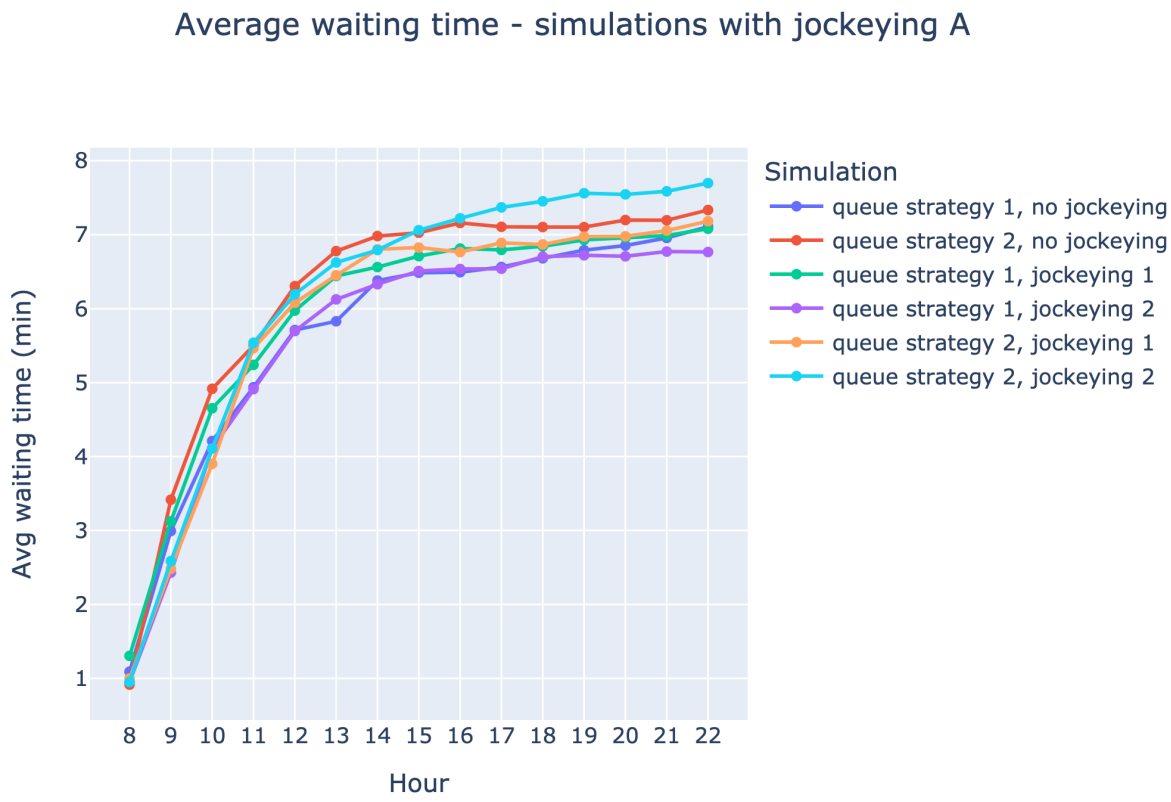
Simulazione con jockey

Aggiungiamo le 2 strategie di jockey. I parametri saranno quindi:

- 20 casse normali con code parallele
- 6 casse self-service
- 4 strategie di scelta della coda
- 2 strategie di jockey

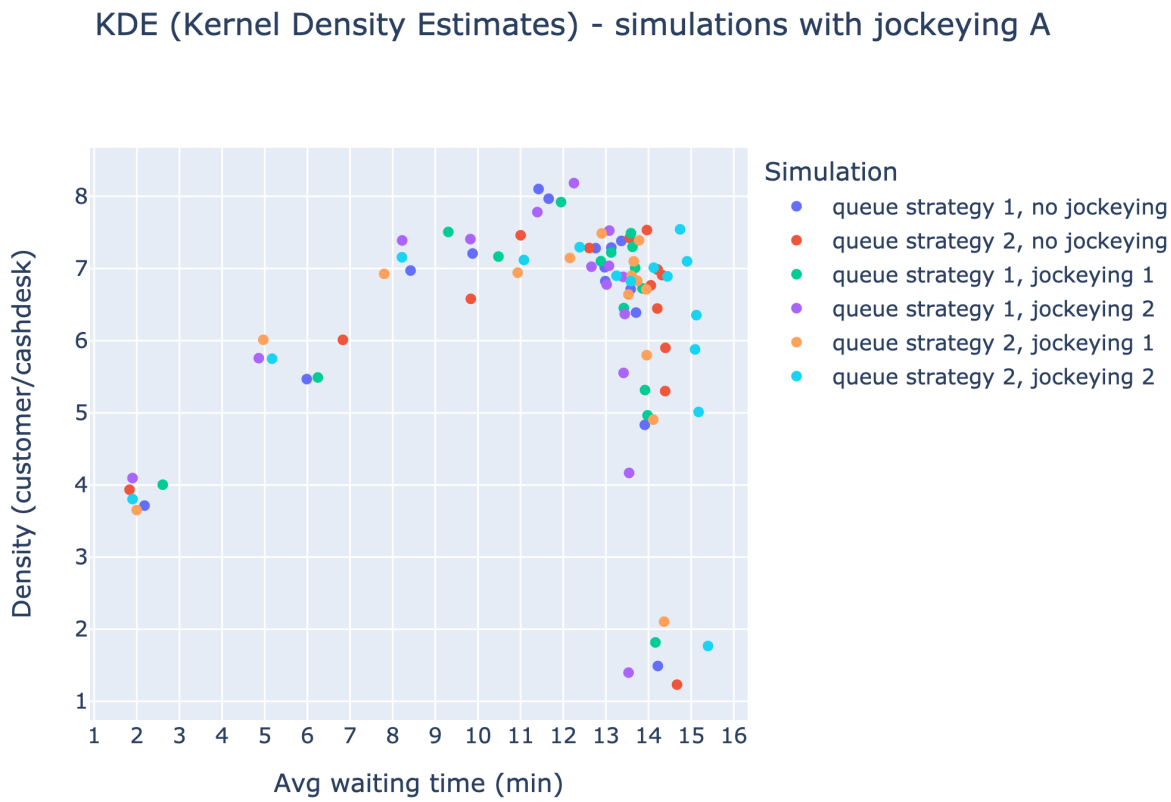
Per un totale di 8 simulazioni.

Simulazione con jockey



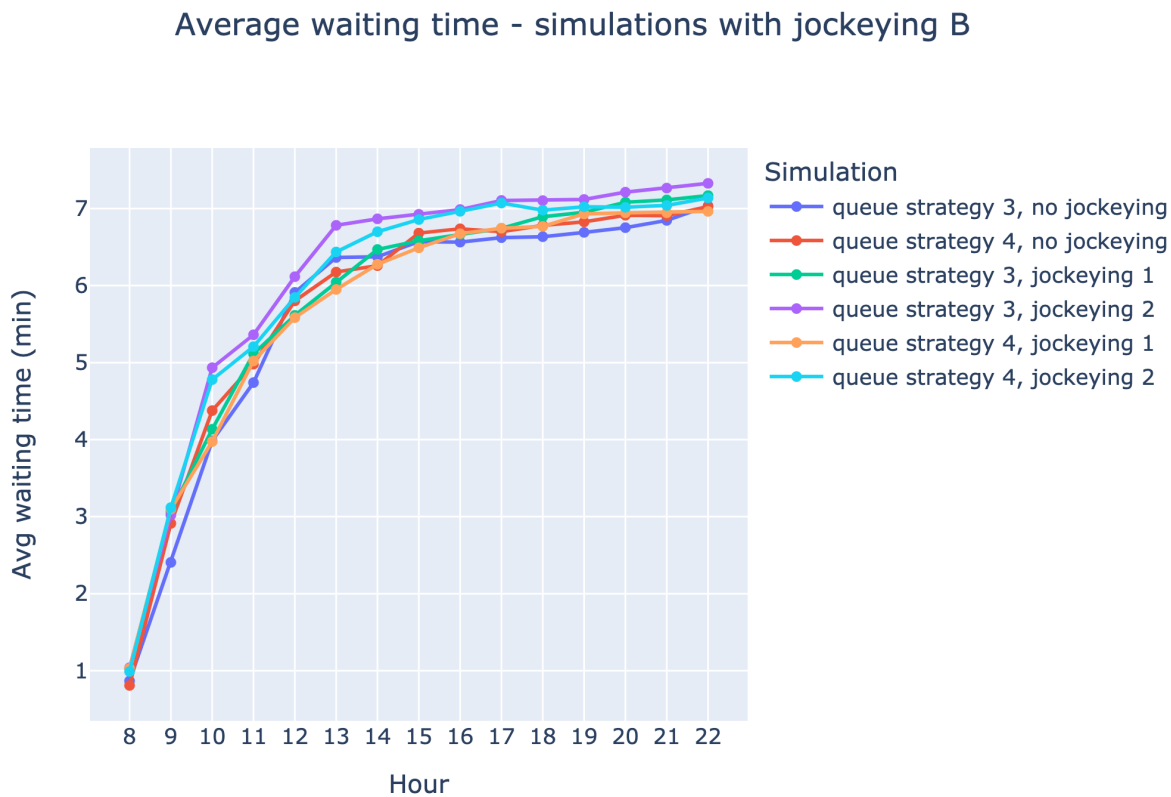
I risultati peggiori si raggiungono con la strategia che sceglie la coda con il minimo numero di persone.

Simulazione con jockey



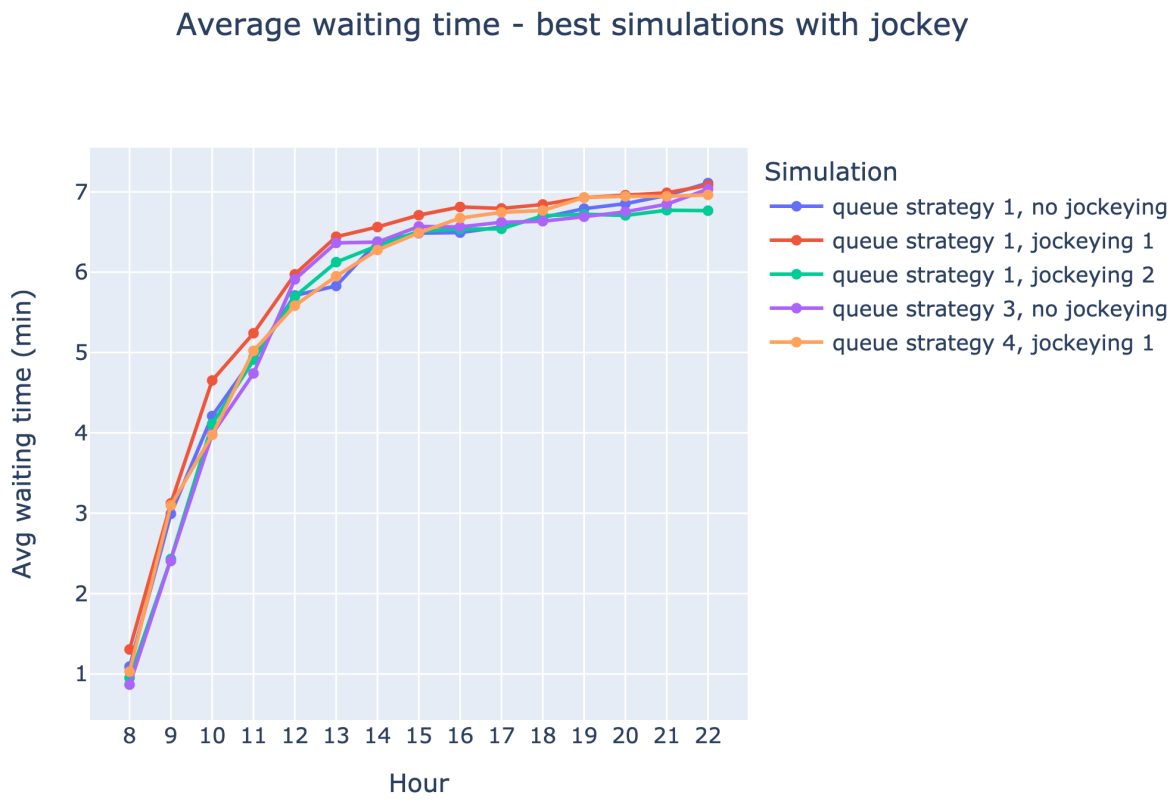
Si raggiunge un punto critico di densità dopo il quale il sistema reagisce e permette alle code di scorrere abbassando il tempo d'attesa.

Simulazione con jockey



La strategia di scelta della coda migliore sembra essere quella in base al tempo medio di servizio delle casse; ancora una volta la strategia 2 peggiora i risultati.

Simulazione con jockey

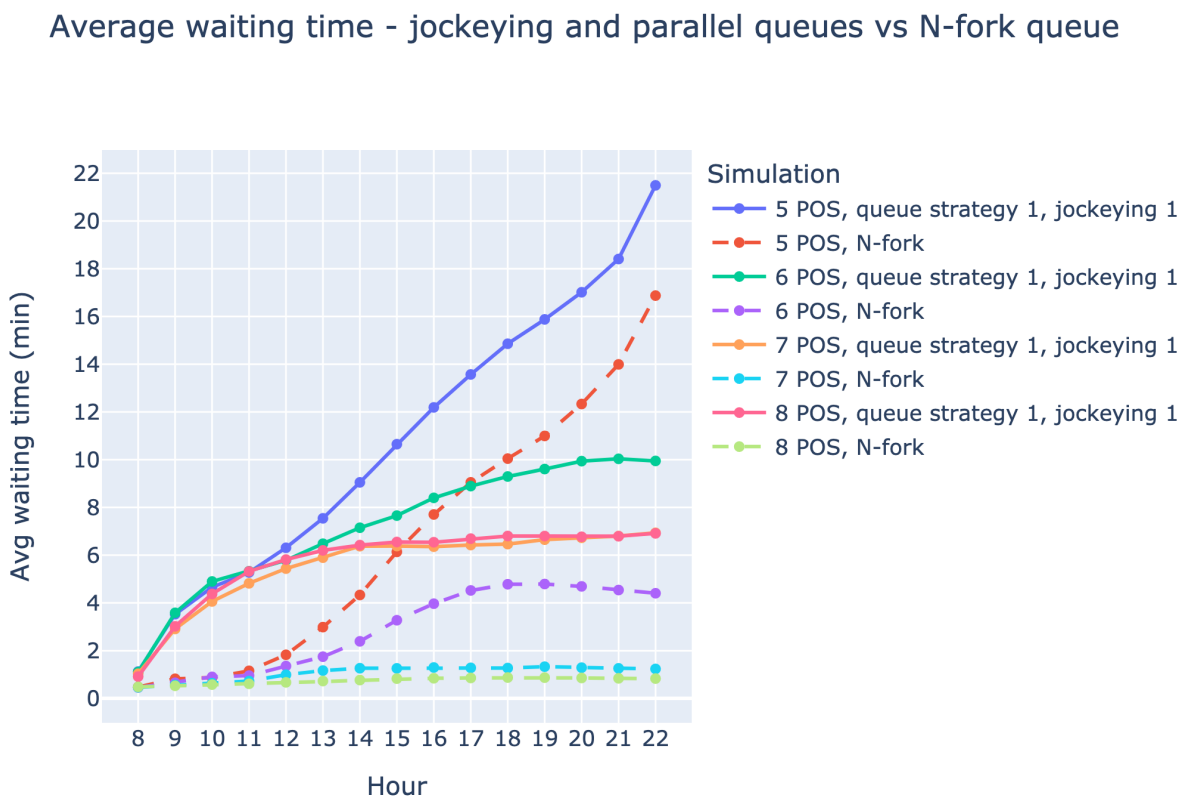


Le migliori 5 strategie di scelta della coda fino ad ora. I tempi medi d'attesa sono paragonabili.

Simulazione con coda condivisa

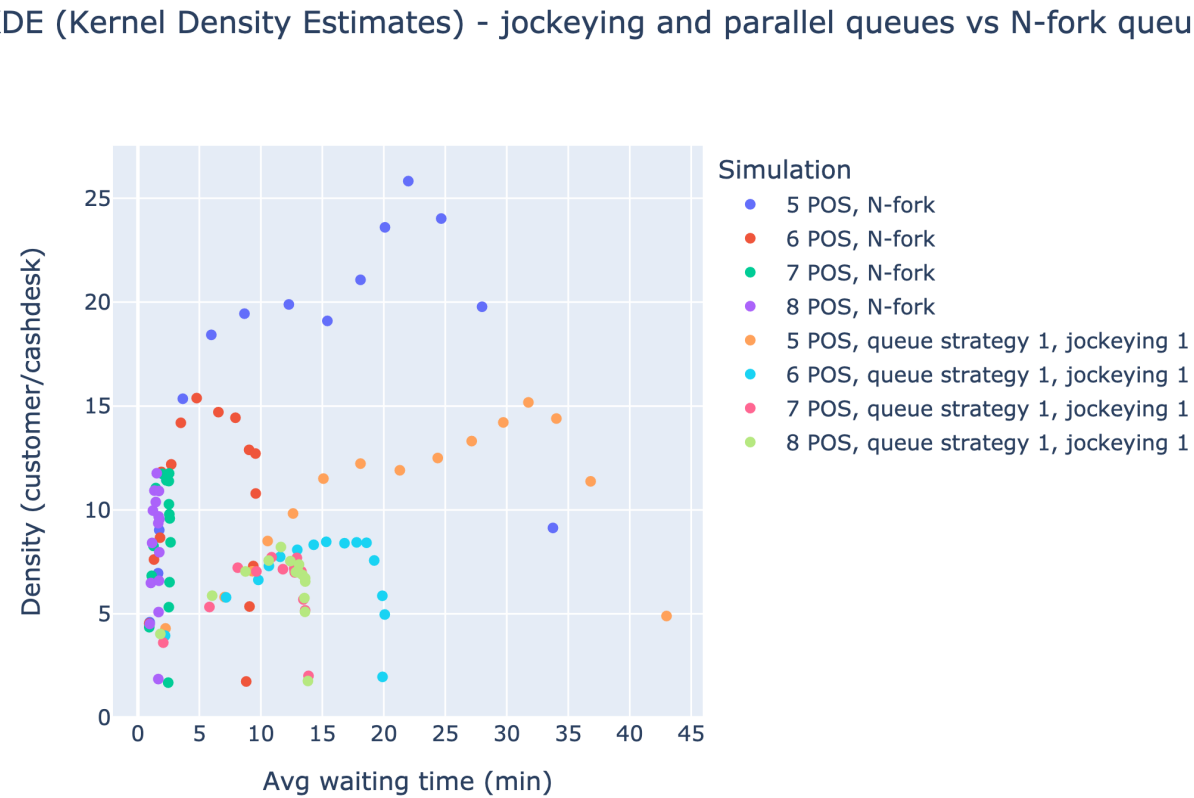
Mettiamo a confronto le code parallele con l'N-fork.
Osservando le simulazioni già fatte ci accorgiamo che il numero massimo di casse aperto in un istante è 8, per questo indaghiamo i casi con 5, 6, 7 e 8 casse.

Simulazione con coda condivisa



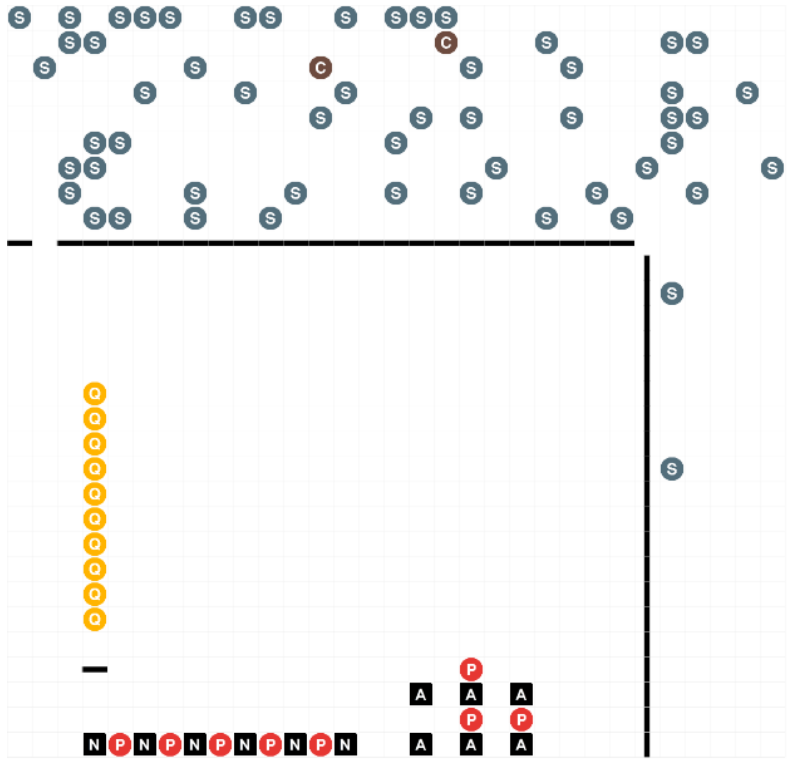
5 casse sono troppo poche sia per le code parallele che per l'N-fork. Si nota la divisione netta tra i tempi d'attesa delle due configurazioni nel caso di 6, 7 e 8 casse.

Simulazione con coda condivisa



Di nuovo 5 casse sono troppo poche. La coda condivisa arriva a densità molto più alte, questo è un limite del modello, infatti quando la fila si riempie i clienti non possono mettersi in coda. In tutti i casi la coda condivisa sopporta più densità e abbassa i tempi medi.

Simulazione con coda condivisa



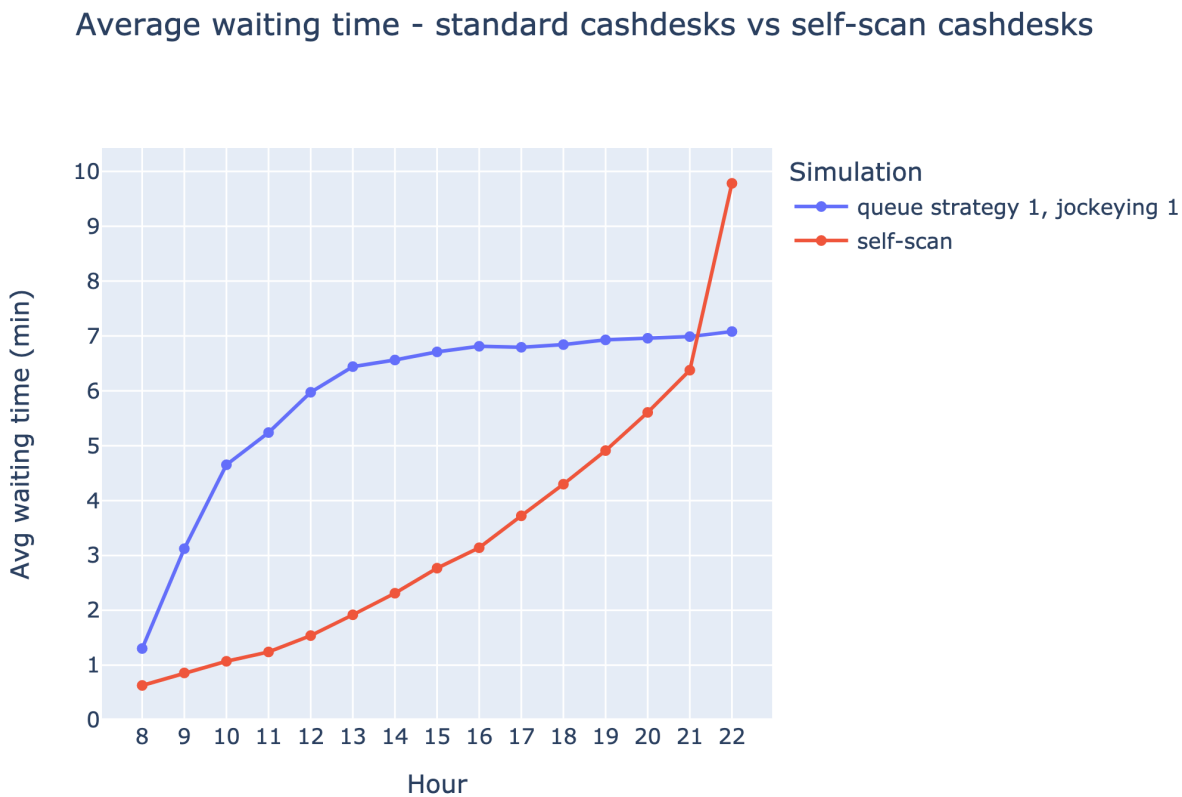
Questo è un esempio di coda piena con clienti in attesa.

Simulazione con casse self-scan

Simulazione con sole casse self-scan, in particolare 7.
Le probabilità di rilettura sono:

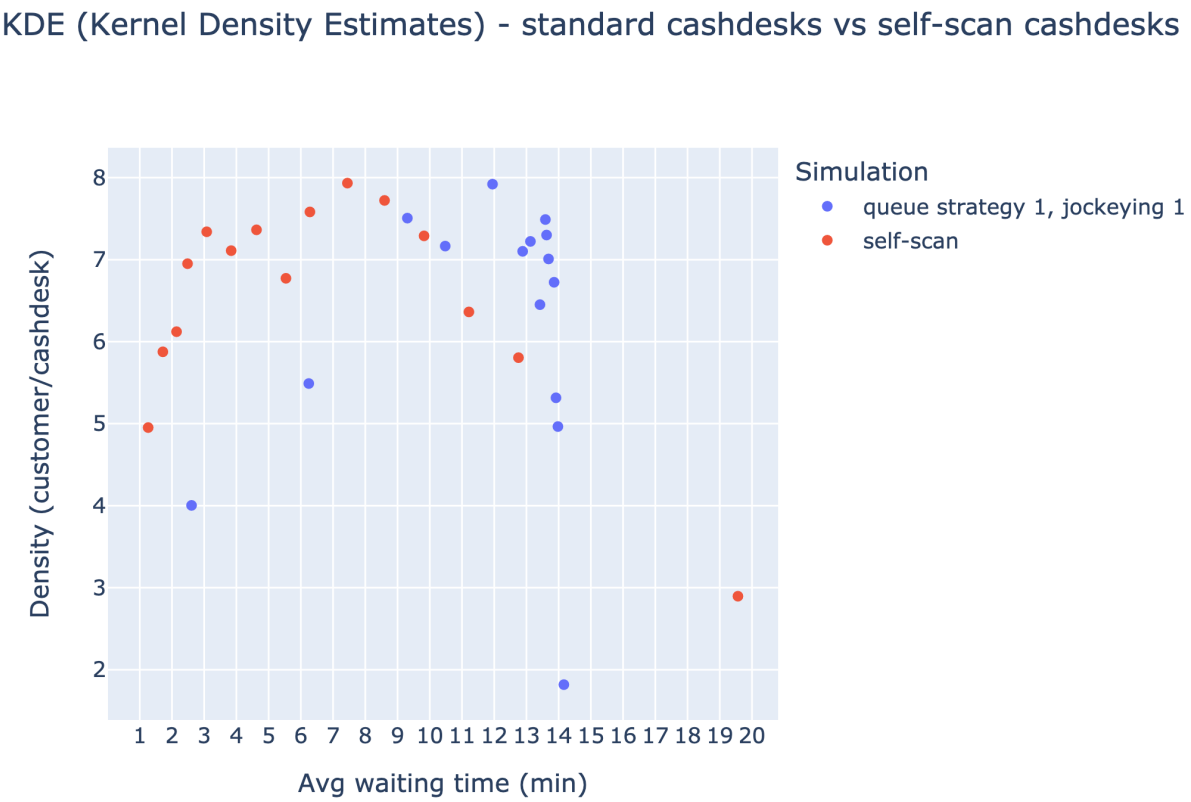
- 97% nessuna rilettura
- 2% rilettura parziale
- 1% rilettura totale

Simulazione con casse self-scan



Il tempo d'attesa medio delle self-scan aumenta in modo esponenziale: la cassa riservata per le riletture è un collo di bottiglia. Bisognerebbe avere dei dati più completi sulla distribuzione di clienti self-scan.

Simulazione con casse self-scan



Le casse standard gestiscono il momento di massima densità abbassando i tempi medi d'attesa, le self-scan no.

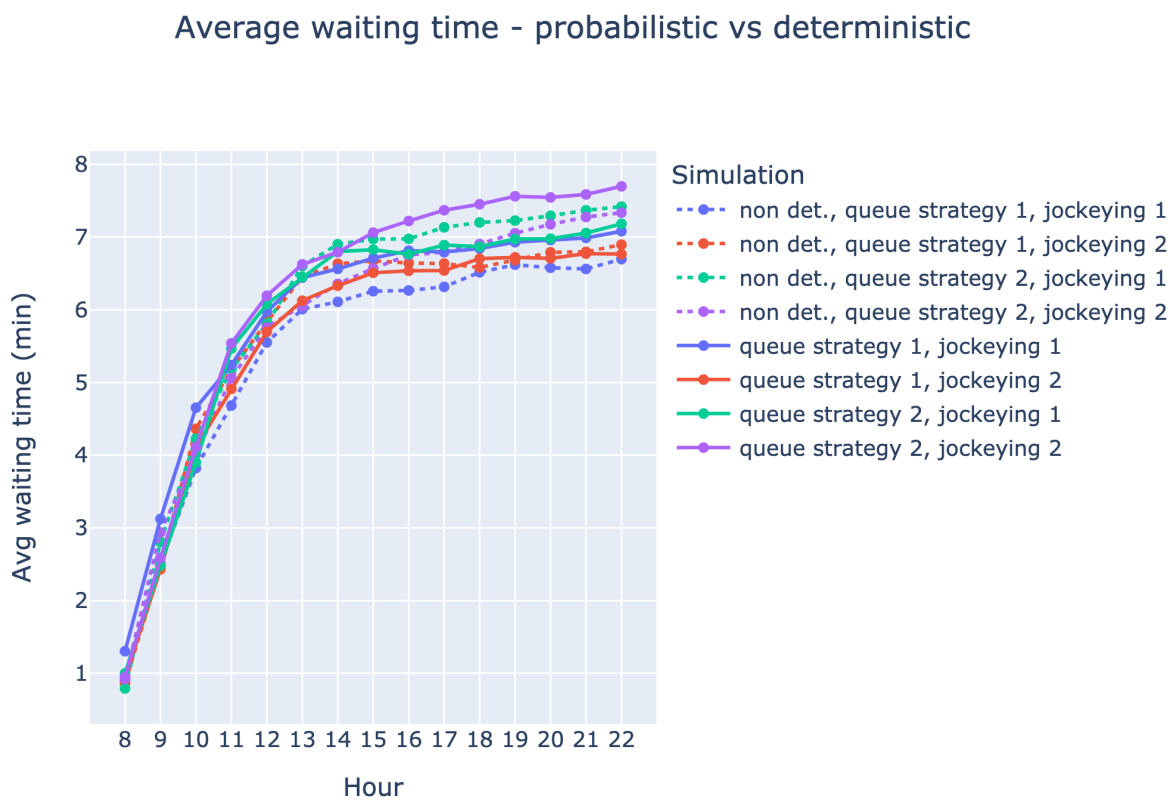
Simulazione non deterministica

Introduciamo i parametri randomici per rendere la simulazione più verosimile, e non per abbassare i tempi d'attesa. I parametri sono:

- 20 casse standard
- 6 casse self-service
- 5 casse self-scan
- Probabilità cliente self-scan: 50%
- Errore di stima della quantità di elementi nei carrelli con 0.1 di deviazione standard
- 4 strategie di scelta della coda
- 2 strategie di jockey

Per un totale di 8 simulazioni.

Simulazione non deterministica



I tempi medi sono paragonabili per tutte le strategie, osserviamo quindi che i parametri randomici introdotti sono pensati con il buon senso e non scombinano il modello. Servono a simulare più scenari possibili.

Conclusioni

- Il modello di supermercato che abbiamo illustrato è basato su agenti ed ha lo scopo di simulare il comportamento dei clienti in fase di scelta della coda.
- Un supermercato è un sistema complesso composto da diversi attori che hanno obiettivi diversi. Simularlo con un modello ad agenti permette di indagare sulle configurazioni di casse e le strategie migliori che portano a una diminuzione del tempo d'attesa medio.
- A causa dell'emergenza di COVID-19 è necessario analizzare i flussi di persone, le distanze interpersonali e i tempi medi passati nei luoghi chiusi la cui frequentazione è necessaria nella vita di tutti i giorni.

Conclusioni - sviluppi futuri

- **Introduzione dell'elemento spaziale**: nel nostro modello i clienti non hanno la concezione di distanza, si muovono in maniera istantanea da una cella all'altra.
  Si può considerare una configurazione di casse a D-fork, in cui si calcola la distanza per trovare anche la coda più vicina.
  Questo aiuterebbe a condurre uno studio sul distanziamento sociale nei supermercati.
- **Introduzione di diverse strategie**: avendo adottato il pattern Strategy è molto semplice definire e utilizzare nuove strategie di scelta della coda e jockey.

Conclusioni - sviluppi futuri

- **Dati sui supermercati italiani**: è possibile utilizzare il modello con dati diversi; ad esempio per le casse self-scan si potrebbe fare uno studio più approfondito con dei dati a disposizione.
- **Criticità**: in caso di densità alta le code si riempiono al massimo, causando un'attesa prolungata dei clienti. É giusto prevedere una capienza massima ma si potrebbe introdurre una nuova zona di attesa soprattutto quando si utilizza una coda condivisa.