Progetto di Sistemi Complesi: Modelli e Simulazione

Supermarket Simulation

Tonelli Lidia Lucrezia - 813114

Marco Grassi - 829664

Gianluca Giudice - 830694

Contents

Chapter 1

Introduzione

In questo progetto è stato costruito un modello basato su agenti con lo scopo di simulare il comportamento dei clienti all'interno di un supermercato durante la fase di scelta della coda relativa a diversi tipi di casse.

Un grande supermercato è composto da molte casse, ognuna di queste ha un comportamento diverso. Come vederemo in dettaglio nel capitolo 3, esistono diversi tipi di casse: la cassa standard, in cui si trova una cassiera che passa i prodotti provenienti dal nastro, la cassa self-service, in cui è il cliente stesso a scannerizzare i prodotti e la cassa self-scan, comparsa negli ultimi anni, in cui il cliente deve soltanto pagare, in quanto ha già effettuato la scannerizzazione dei prodotti man mano che li ha raccolti nel carrello. La configurazione delle casse nel supermercato può prevedere che ogni cassa abbia la sua coda dedicata, oppure che tante casse condividano la stessa coda.

Dal momento che in un grande supermercato sono presenti più clienti che casse, è fondamentale l'utilizzo di code per gestire la grande quantità di clienti. Un supermercato può essere considerato a tutti gli effetti un sistema complesso in quanto si verificano diversi aspetti che considerati contemporaneamente fanno emergere un comportamento complessivo difficilmente prevedibile, tra questi:

- Flusso di clienti in ingresso variabile (che influisce sulle persone in coda)
- Numero di prodotti che un cliente acquista durante la spesa (che influisce sul tempo passato in cassa, scatenando eventualmente il cambio della coda da parte di altri clienti)
- Numero di casse aperte contemporaneamente nel supermercato
- Strategia di scelta della coda dei clienti (un cliente può avere diversi criteri per la scelta della coda)
- Strategia di cambio della coda dei clienti

Lo scopo di questo lavoro è costruire un modello basato su agenti per simulare il comportamento del supermercato. Dopo una prima fase di validazione, sfruttando i pochi dati a disposizione, vengono considerati diversi casi "what-if" con lo scopo di sperimentare diverse configurazioni di casse e strategie di scelta della coda per una gestione ottimale del flusso dei clienti.

Chapter 2

Stato dell'arte

Questo progetto prende spunto principalmente dal lavoro di Tomasz Antczak, Rafal Weron e Jacek Zabawa [1], in cui viene costruito un modello ad agenti realistico per simulare la scelta della coda dei clienti di un supermercato; lo scopo principale è il supporto alle decisioni nelle operazioni di vendita. Essi mostrano che quando i clienti scelgono la coda in modo da minimizzare il tempo d'attesa previsto, questo porta in generale a tempi d'attesa minori nelle code per tutti i clienti e porta anche benefici per la gestione del supermercato, in quanto permette di ridurre i turni di lavoro dei cassieri.

in ogni capitolo aggiungere qualche riga iniziale in cui si spiega cosa verrà detto e qualche riga finale in cui si riassume quanto detto

L'articolo sopracitato prende in considerazione 4 strategie diverse di scelta della coda:

1. La coda è scelta in modo random
2. É scelta la coda con il numero minore di clienti
3. É scelta la coda con il numero minore di prodotti in tutti i carrelli
4. É scelta la coda con il minor tempo d'attesa previsto calcolato come il prodotto del numero di clienti in coda e il tempo di servizio medio per tutte le casse
5. É scelta la coda con il minor tempo d'attesa previsto calcolato come il prodotto del numero di clienti in coda e la somma dei tempi di transazione e di pausa attesi

Nel nostro progetto in particolare, non abbiamo considerato la prima strategia di scelta random, ma soltanto le strategie 2-5.

Il loro modello è stato implementato nella piattaforma di simulazione NetLogo, invece noi abbiamo optato per una riscrittura nel framework Python Mesa.

da giustificare il perchè?

Dal repository del loro progetto, abbiamo estratto i dati su cui si basa il loro modello, in particolare la distribuzione di arrivo dei clienti nel supermercato e la distribuzione della grandezza dei loro carrelli (più avanti chiamata *basket-size*).

L'articolo [1] non modella il *jockeying*, ovvero il fatto che un cliente possa cambiare coda prima di essere servito, se calcola che in un'altra cassa ci sia un tempo d'attesa minore; abbiamo deciso di estendere il loro lavoro includendo la possibilità per i clienti di fare *jockeying*, per valutare se questo portasse a una riduzione ulteriore dei tempi d'attesa. Per implementare questa estensione, abbiamo preso spunto dall'articolo [2]. In questo articolo l'autore considera la strategia di *jockeying* nelle code, perchè in molte situazioni si utilizza per ridurre il tempo totale speso in coda. L'autore prende in considerazione tre situazioni di coda diverse, in particolare nella terza (*Tellers' Windows with Jockeying*) definisce una strategia di jockey probabilistico con un *threshold* k, che rappresenta la verosimiglianza di un cliente di lasciare la propria coda per un'altra. Nel nostro modello è stata implementata

questa strategia, includendo anche una randomicità, che esprime il fatto che non tutte le persone fanno jockeying.

Uno studio che abbiamo voluto includere nel nostro progetto è la differenza dei tempi di attesa al variare della disposizione delle code rispetto alle casse: nell'articolo [3] i ricercatori prendono in considerazione due tipi di disposizioni delle code: **parallela**, che si trova quando ogni cassa ha una coda dedicata, e **N-Fork**, che si trova quando c'è un'unica coda condivisa tra più casse. Essi hanno l'obiettivo di estendere la *queuing theory* considerando la distanza da percorrere per arrivare a una coda, allo scopo di rendere più efficiente il sistema di code. Nel nostro progetto, noi non abbiamo incluso nelle strategie di scelta della coda la distanza da essa, e di fatti questa potrebbe essere un'estensione, abbiamo però considerato le due disposizioni di casse studiate.

Un'ulteriore estensione che abbiamo apportato a questi modelli è stata l'introduzione delle casse *self-scan*: nell'articolo [1] vengono considerate le casse standard, con il cassiere, e le casse self-service, in cui il cliente passa in autonomia i prodotti allo scanner; nell'articolo [3], invece, viene considerata solamente la cassa standard. Negli ultimi anni molti supermercati hanno adottato le casse self-scan, che permettono al cliente di scannerizzare i prodotti durante la spesa e, arrivati alla cassa, semplicemente pagare, senza passare i prodotti su un nastro; questo tipo di cassa sembra essere molto efficiente, in quanto richiede soltanto il pagamento, che diventa ancora più veloce se fatto in forma telematica. Per evitare furti, i supermercati decidono di effettuare in maniera randomica delle riletture della spesa, e questo dovrebbe diminuire la velocità media di attesa per le casse self-scan; per questi motivi abbiamo trovato utile simulare anche la presenza di queste casse.

Infine, per rendere la simulazione non deterministica e più realistica, abbiamo voluto inserire delle variabili probabilistiche: l'entrata dei clienti e la loro *basket-size* sono basate su distribuzioni di probabilità estratte dai dati di [1]; l'estrazione dei clienti delle casse self-scan per la rilettura della spesa è randomica; il *jockeying* da parte di un cliente è random, in quanto non tutte le persone in fila guardano le altre code allo scopo di minimizzare il tempo di attesa; la stima del *basket-size* degli altri clienti da parte di un cliente, nel momento in cui utilizza la sua strategia per calcolare qual è la coda da scegliere, segue una distribuzione normale, rispecchiando così l'errore di stima che compie un umano quando deve quantificare una misura. Tutte queste distribuzioni di probabilità sono governate da parametri che, a parte per i dati estratti dal primo articolo, non sono giustificati da alcuno studio, per questo lo studio di essi rappresenta un'ulteriore estensione del nostro modello.

manca qualcosa nelle variabili probabilistiche?

Chapter 3

Descrizione del modello

3.1 Framework adottato

Mesa [4] è un framework in Python usato per la modellazione basata su agenti (ABM). Permette di creare il modello con componenti *built-in* come griglie spaziali e scheduler di agenti, e di visualizzare i componenti del modello con un'interfaccia browser. Sfruttando Mesa è possibile definire sia l'ambiente che gli agenti estendendo le relative classi messe a disposizione dal framework. Mesa infine comprende strumenti per l'analisi del modello creato.

Nel nostro modello di supermercato, il modello vero e proprio di Mesa è la classe **Supermarket** e gli agenti sono i clienti, classe **Customer**, e le casse, classe **CashDesk**.

3.2 Sistema

Giustificare la scelta di fare un modello ad agenti per un supermercato.

Supermercato non predicibile, presente una componente stocastica.

Il sistema è eterogeneo, due tipi di agenti. Sistema multiagente.

Come comunicano

Come avviene l'interazione

Descrizione dell'ambiente

3.3 Agente di tipo Cliente

I clienti sono gli agenti principali che compongono il modello e interagiscono con l'ambiente per raggiungere l'obiettivo di fare la spesa; per portare a termine questo compito l'agente esegue alcuni macro-step in cui è necessaria anche una fase di pianificazione e valutazione della bontà (*utility function*) della scelta.

Dal punto di vista dell'agente di tipo cliente, la fase più complicata è quella in cui ha raggiunto il target basekt size e deve quindi mettersi in una coda per attendere il suo turno in cassa. A questo punto il **goal dell'agente** è: essere servito da una cassa nel minor tempo possibile, pur dovendo necessariamente passare per una coda. Questa fase richiede una pianificazione da parte dell'agente in quanto la coda viene scelta in modo ottimale cercando di minimizzare il tempo passato in coda, ciò avviene basandosi su diverse strategie.

Ragionamenti analoghi vengono fatti nel momento in cui l'agente già in coda decide di fare jockeying, ovvero cambiare la coda attuale perchè questa azione porta al raggiungimento del goal.

Da queste considerazione è possibile classificare l'agente di tipo Cliente come "utility-based", secondo la tassonomia proposta Russel-Norvig [5]; viene qui sotto riportata l'architettura di un agente "utility-based":

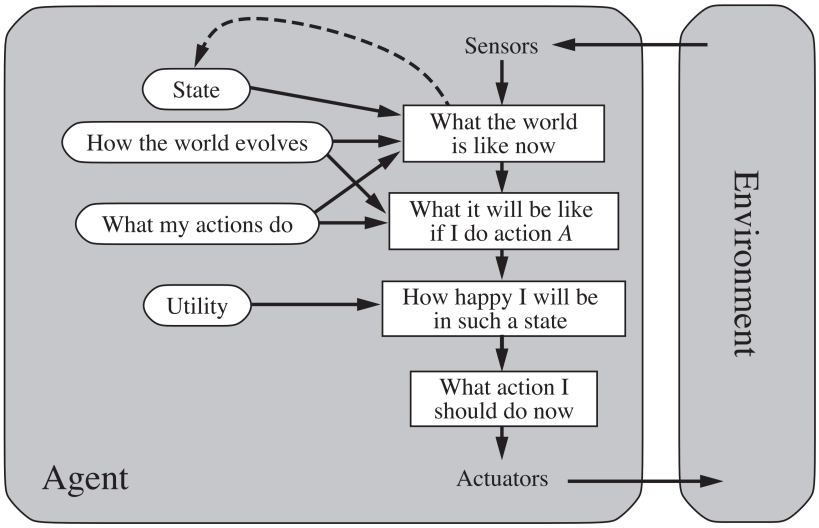


Figure 3.1: Agente di tipo utility-based.

Da questa immagine possiamo notare come ci sia una corrispondenza tra l'architettura proposta e quella dell'agente di tipo cliente. Infatti l'agente pianifica le sue azione e valuta la bontà dell'azione di scegliere una coda per mezzo di un'utlity function.

3.3.1 Workflow

I macro-step che l'agente deve seguire per il raggiungimento del goal, che coincidono con gli stati associati all'agente durante la simulazione, sono:

1. **Attesa all'entrata del supermercato**: in questo stato il cliente si mette in attesa finchè non è possibile entrare nel supermercato.

Esperimenti sul covid

2. **Fase di shopping**: il cliente è entrato e può iniziare a "fare la spesa", con questo si intende raggiungere il numero di prodotti desiderato, infatti nella simulazione viene considerato il *basket size*, un'astrazione del carrello modellato attraverso un numero interno. Il basket size è il target da raggiungere nella fase di shopping, a ogni step il numero di prodotti aumenta di una certa quantità (la velocità di shopping è un parametro del modello descritto nella sezione 3.7).

   La basket size viene generata stocasticamente secondo una distribuzione esponenziale governata dal parametro $\lambda = 0.07361$. La scelta di questo parametro viene giustificata nella sezione 3.7.

3. **Scelta della coda**: in questo stato il cliente ha finito di fare la spesa e vuole mettersi in coda ad una cassa. Dal momento che sono disponibili più code e ognuna di queste avrà molto probabilmente altri clienti già in coda, il cliente deve scegliere in quale coda andare in base alla coda che lui considera migliore.

Formalmente viene definita una strategia di scelta della coda in base a una funzione: la *utility function*. Il cliente sceglie quindi la coda che minimizza questa funzione:

$$q^* = \underset{q \in Q}{\operatorname{argmin}} f(q) \tag{3.1}$$

dove Q è l'insieme delle code dedicate e f varia a seconda del tipo di strategia che il cliente può utilizzare, ognuna delle quali modella una diversa strategia per la scelta della coda.

4. **Attesa in coda e jockeying**: una volta che il cliente ha scelto la coda deve aspettare il proprio turno per essere servito. Nel lavoro di Tomasz Antczak e altri [1] viene suggerito come sviluppo futuro lo studio del fenomeno di *jockeying*: con questa espressione si intende cambiare la coda che è stata scelta inizialmente in quanto un'altra risulta essere più conveniente, ad esempio perchè più scorrevole.

   Ad ogni timestamp l'agente considera le due code adiacenti (parametro spiegato nella sezione 3.7 e scelto a priori per il modello) alla propria e per ognuna di queste ricalcola la coda migliore secondo la 3.1. A questo punto l'agente valuta se per lui è conveniente cambiare la coda o rimanere in quella dove è già presente. Si noti come per effettuare questo confronto è necessario utilizzare l'approccio della 3.1 sulla coda in cui l'agente è in quel momento, andando ad escludere i clienti che si sono inseriti in coda dopo di lui. Una volta fatta questa valutazione, nel caso in cui sia per lui conveniente cambiare coda, il cliente la cambia in modo stocastico secondo una certa distribuzione di probabilità spiegata nella sezione 4, che è maggiore più il cambio di coda risulta conveniente.

   La scelta modellistica di effettuare jockeying stocasticamente e in funzione dell'effettivo guadagno di tempo è stata fatta per cercare di avere una rappresentazione il più fedele possibile al mondo reale. Infatti nella realtà un cliente al supermercato potrebbe scegliere di non cambiare la coda nel momento in cui ha un guadagno minimo in quanto questo richiede uno sforzo fisico che non tutti vogliono spendere nella realtà. Inoltre questa operazione richiede che gli agenti controllino continuamente le casse vicine, anche questo non è necessariamente vero in quanto dispendioso di energia. Infatti nel lavoro di Tomasz Antczak e altri [1] viene fatto notare come questo comportamento non sia molto frequente, tuttavia seppur essendo poco frequente noi lo consideriamo un fattore importante da modellare, adottando le dovute precauzioni e sfruttando la stocasticità dell'azione.

5. **Attesa alla cassa**: in questa fase il cliente è arrivato alla cassa, essendo arrivato con lo stato precedente in prima posizione della coda. Da questo punto in poi verrà servito dall'agente di tipo cassa che avrà la responsabilità di processare il basket size del cliente. Dal momento che ci sono diversi tipi di casse, questa fase dipende dall'agente di tipo cassa e non dal cliente. Il cliente deve attendere la fine dell'elaborazione della spesa e quindi uscire dal negozio.

Il workflow dell'agente di tipo cliente viene astratto e riassunto da questa immagine:

3.4 Agente di tipo Cassa

Qua parlare dell'architettura delle casse (tipo di agente, immagine ecc..)

3.4.1 Tipi di cassa

Gli agenti di tipo cassa hanno l'unica funzione di servire i clienti che si mettono in coda per pagare la spesa; sono di 4 tipi e differiscono per modalità di elaborazione della spesa del cliente e per velocità.

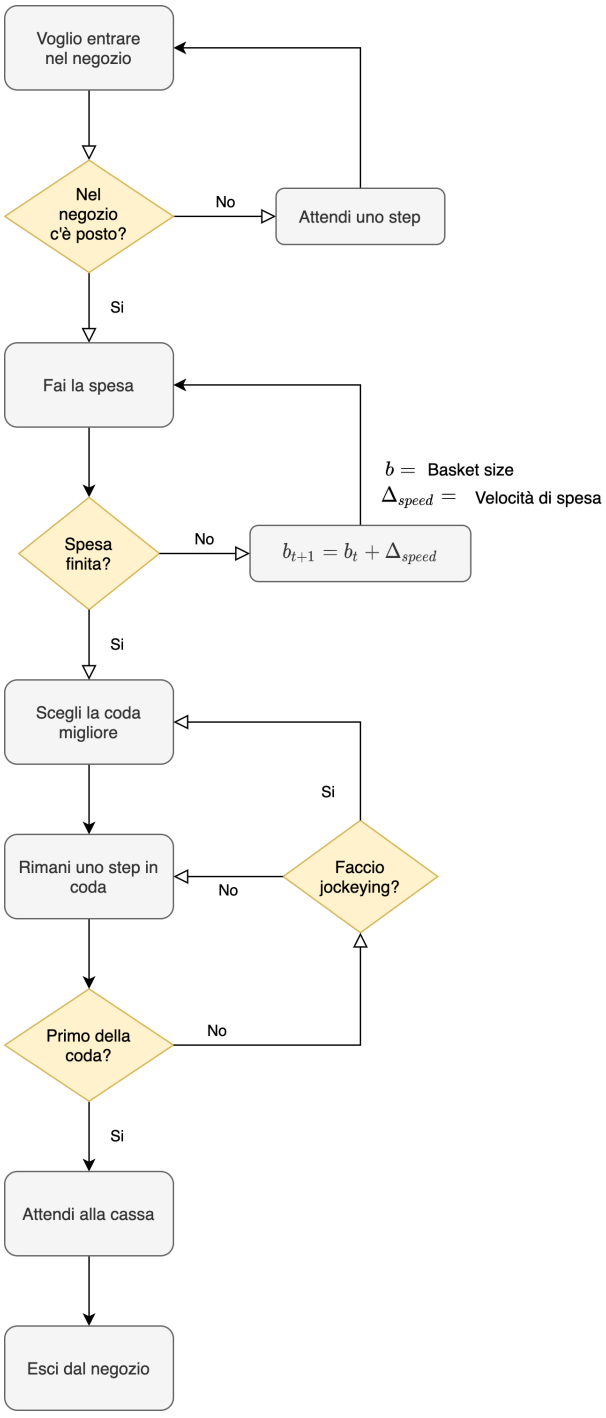


Figure 3.2: Workflow dell'agente di tipo customer.

1. **Cassa standard**: questa cassa rappresenta la normale cassa che si trova solitamente in tutti i supermercati, all'interno della quale lavora un cassiere che si occupa di passare i prodotti del carrello del cliente sul nastro.

   Il tempo di servizio di un cliente per questo tipo di cassa è formato da due tempi diversi: il **transaction-time**, che è il tempo vero e proprio durante il quale avviene la transazione, e il **break-time**, che è il tempo che passa tra il servizio di un cliente e di un altro ed include anche la fase in cui il cliente insacchetta i prodotti acquistati. Il transaction-time è stato stimato con una regressione di potenza e il break-time con una distribuzione Gamma. In particolare, per un cliente $c_i \in q$, i due tempi sono calcolati in questo modo:

   $$\text{transaction-time}_i = e^{alog(\text{basket-size}(c_i))+b} \tag{3.2}$$

   $$\text{break-time}_i = \frac{\beta^{\alpha}\text{basket-size}(c_i)^{\alpha-1}e^{-\beta\text{estimate-basket-size}(c_i)}}{\Gamma(\alpha)} \tag{3.3}$$

   Dove Γ è la funzione **gamma** e corrisponde a:

   $$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1}e^{-x}dx \;\; \forall z \in \mathbb{C} \tag{3.4}$$

   Queste stime sono state prese dall'articolo [1] e in particolare i parametri $a, b, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$ sono:

   $$a = 0.6984, \;\; b = 2.1219, \;\; \alpha = 3.074209, \;\; \beta = \frac{1}{4.830613} \tag{3.5}$$

2. **Cassa self-service**: alla cassa self-service il cliente provvede da solo al passaggio dei prodotti del carrello allo scanner, per cui non è presente un cassiere. Si suppone che il cliente non sia veloce quanto un cassiere esperto a passare i prodotti sullo scanner, per questo la velocità di processing per questa cassa è stata divisa per un fattore 1.5, uno dei parametri descritti nella sezione 3.7. A causa della velocità ridotta, di solito nei supermercati è posto un limite di *basket-size* per accedere alla cassa self-service; nel nostro modello questo limite è posto a 15, per cui se un cliente ha più di 15 elementi nel carrello e non va nel self-scan, deve per forza andare alla cassa standard.

   Anche in questo caso il tempo di servizio è diviso in transaction-time e break-time, solo che, a differenza della cassa normale, il break-time risulta più lungo in quanto il cliente inizia ad insacchettare solamente dopo aver passato i prodotti allo scanner, invece nella cassa standard può iniziare già mentre il cassiere passa i prodotti. In questo caso, dunque, il transaction-time e il break-time sono stati stimati entrambi con una regressione di potenza:

   $$\text{transaction-time}_i = e^{alog(\text{basket-size}(c_i))+b} \tag{3.6}$$

   $$\text{break-time}_i = e^{clog(\text{basket-size}(c_i))+d} \tag{3.7}$$

   I parametri in questo caso sono:

   $$a = 0.6725, \;\; b = 3.1223, \;\; c = 0.2251, \;\; d = 3.5167 \tag{3.8}$$

3. **Cassa self-scan**: la cassa self-scan si differenzia totalmente dalle prime due descritte, il cliente che voglia utilizzarla infatti, deve deciderlo già al momento dell'entrata nel supermercato, in quanto deve scannerizzare i prodotti man mano che fa la spesa; una volta arrivato alla cassa self-scan, egli deve semplicemente effettuare il pagamento, saltando quindi le fasi di scanner e insacchettamento che caratterizzano le casse standard e self-service. La velocità di elaborazione della spesa in questo caso è praticamente nulla, in particolare un cliente che inizia il pagamento a una cassa self-scanner, lo termina allo step successivo; il tempo di pausa per questa cassa è ugualmente nullo, dato che un cliente paga ed entra immediatamente nella fase di uscita dal negozio.

   Chiaramente per evitare che vengano rubati prodotti, i supermercati decidono di effettuare dei controlli random sui clienti che scelgono di usare le casse self-scan. A questo scopo è stata implementata la cassa di tipo riservato.

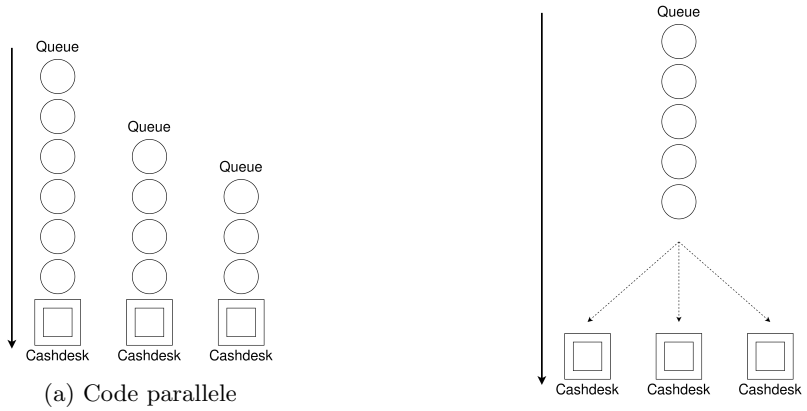
4. **Cassa riservata**: questa cassa è identica nel funzionamento a una cassa standard, ciò che cambia è che è riservata alla rilettura della spesa dei clienti self-scan, che avviene in maniera random. Nel momento in cui un cliente si approccia ad una cassa self-scan, viene estratto un numero che determina la **rilettura parziale** o la **rilettura totale** della sua spesa; la rilettura parziale consiste nell'estrazione di 10 prodotti dal carrello e nella verifica che essi appartengano alla lista contenuta nello scanner del cliente, invece la rilettura totale consiste appunto nella rilettura completa della spesa di esso. Le probabilità di rilettura sono parametri del modello ed attualmente corrispondono allo 7.5% per la rilettura parziale e allo 2.5% per la rilettura totale.

   Il funzionamento e i tempi di servizio sono esattamente gli stessi della cassa standard, considerando un basket-size completo per la rilettura totale e un basket-size di soli 10 elementi per la rilettura parziale.

Tutti i tipi di cassa attraversano 3 fasi: fase di attesa di un nuovo cliente, fase di elaborazione della spesa del cliente, fase di completamento della transazione.

Code Nel modello vengono considerati i casi di:

- **Code parallele**: per questa disposizione ad ogni cassa è associata una coda. Nel momento in cui la cassa è libera il cliente in cima alla coda viene spostato alla cassa per procedere con la fase di elaborazione della spesa.
- **Coda condivisa**: nota anche come *N-fork* [3], più casse condividono la stessa coda, nel momento che una qualsiasi delle casse risulta libera il cliente in posizione utile procede alla cassa. Utilizzando questa disposizione non viene ammesso jockeying.



(a) Code parallele

(b) Coda condivisa

Figure 3.3: Tipi di code

3.4.2 Workflow

Cassa standard All'inizio della simulazione, e in generale quando la cassa ha terminato la transazione di un cliente o quando non ci sono clienti in coda, la cassa si trova nella **fase di attesa di un nuovo cliente**. L'agente cassa chiede alla coda a cui è associata il primo cliente in fila, se ce n'è, quindi compie 4 passi:

- Cambia lo stato al cliente che sta servendo, impostandolo in fase di attesa alla cassa
- Muove il cliente di fianco alla propria postazione, spostandolo quindi dalla coda
- Cambia il proprio stato impostandolo in fase di elaborazione
- Fa avanzare tutti i clienti che erano in coda dopo il cliente che viene servito

Nella **fase di elaborazione della spesa del cliente**, la cassa simula il passaggio dei prodotti sullo scanner, diminuendo il *basket-size* del cliente ad ogni passo di una quantità che dipende dalla velocità di processing, parametro del modello. Quando la transazione è completata, ovvero quando il *basket-size* del cliente è nullo, fa uscire il cliente dal negozio e cambia il proprio stato, entrando nella **fase di completamento della transazione**.

In questa ultima fase la cassa ha terminato il servizio di un cliente, quindi si rimette nel primo stato, in fase di attesa di un nuovo cliente.

Il workflow della cassa standard viene riassunto nell'immagine 3.4.

Cassa self-service Il workflow della cassa self-service è uguale in tutto a quello della cassa standard, le uniche differenze sono che esiste una coda condivisa ogni 8 casse self-service (che però funziona allo stesso modo della coda della cassa standard) e che la velocità di elaborazione della spesa è più piccola di 1.5, un parametro del modello.

Cassa self-scan Nella **fase di attesa di un nuovo cliente**, se ci sono clienti nella coda condivisa, la cassa self-scan prende il primo cliente della coda; estrae quindi un numero e, con lo 7.5% di probabilità lo manda alla cassa riservata per una **rilettura parziale**, con lo 2.5% di probabilità lo manda alla cassa riservata per una **rilettura totale** e invece con il 90% di probabilità gli fa fare il pagamento normale. Nel caso di rilettura parziale o totale, la cassa sposta il cliente alla cassa riservata, fa avanzare i clienti in coda e rimane nella fase di attesa di un nuovo cliente, pronta per prendere il nuovo cliente della coda.

Nel caso non debba avvenire una rilettura la cassa compie queste 4 azioni:

- Cambia lo stato al cliente che sta servendo, impostandolo in fase di attesa alla cassa
- Muove il cliente di fianco alla propria postazione, spostandolo quindi dalla coda
- Cambia il proprio stato impostandolo in fase di elaborazione
- Fa avanzare tutti i clienti che erano in coda dopo il cliente che viene servito

Nella **fase di elaborazione della spesa del cliente**, la cassa effettua la vera e propria transazione, la differenza con la cassa standard è la velocità di elaborazione della spesa, che in questo caso è uguale alla *basket-size* del cliente; il cliente infatti deve soltanto pagare, in quanto ha già scannerizzato i prodotti durante la sua spesa.

Nell'ultima fase la cassa ha terminato il servizio di un cliente, quindi si rimette nel primo stato, in fase di attesa di un nuovo cliente.

Il workflow della cassa self-scan viene riassunto nell'immagine 3.5.

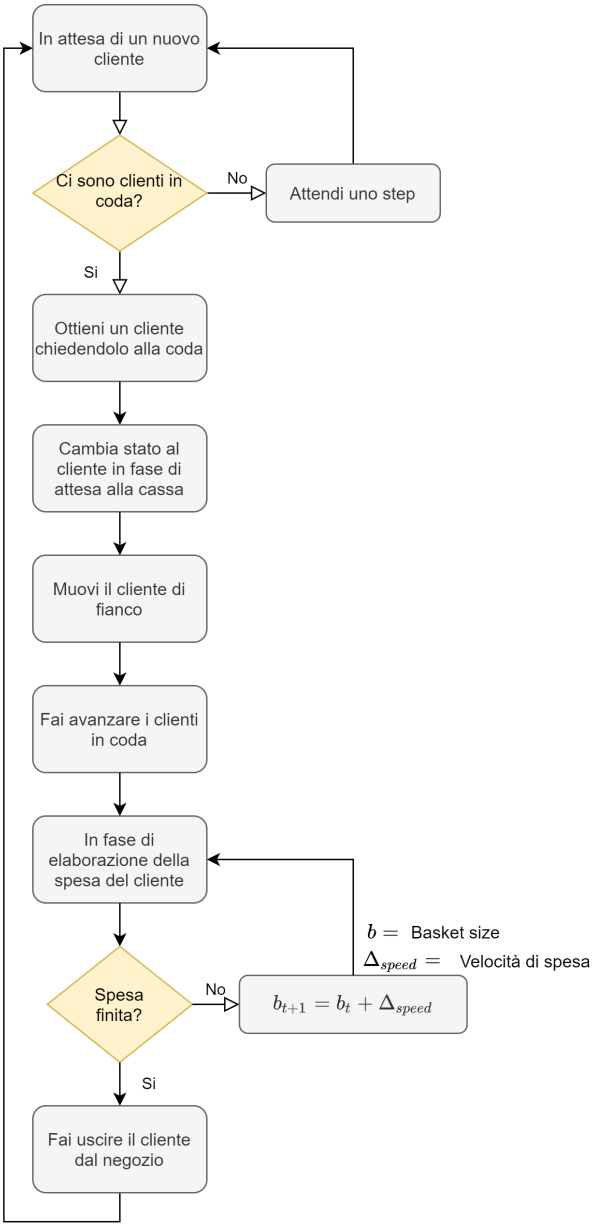


Figure 3.4: Workflow dell'agente di tipo cassa standard.

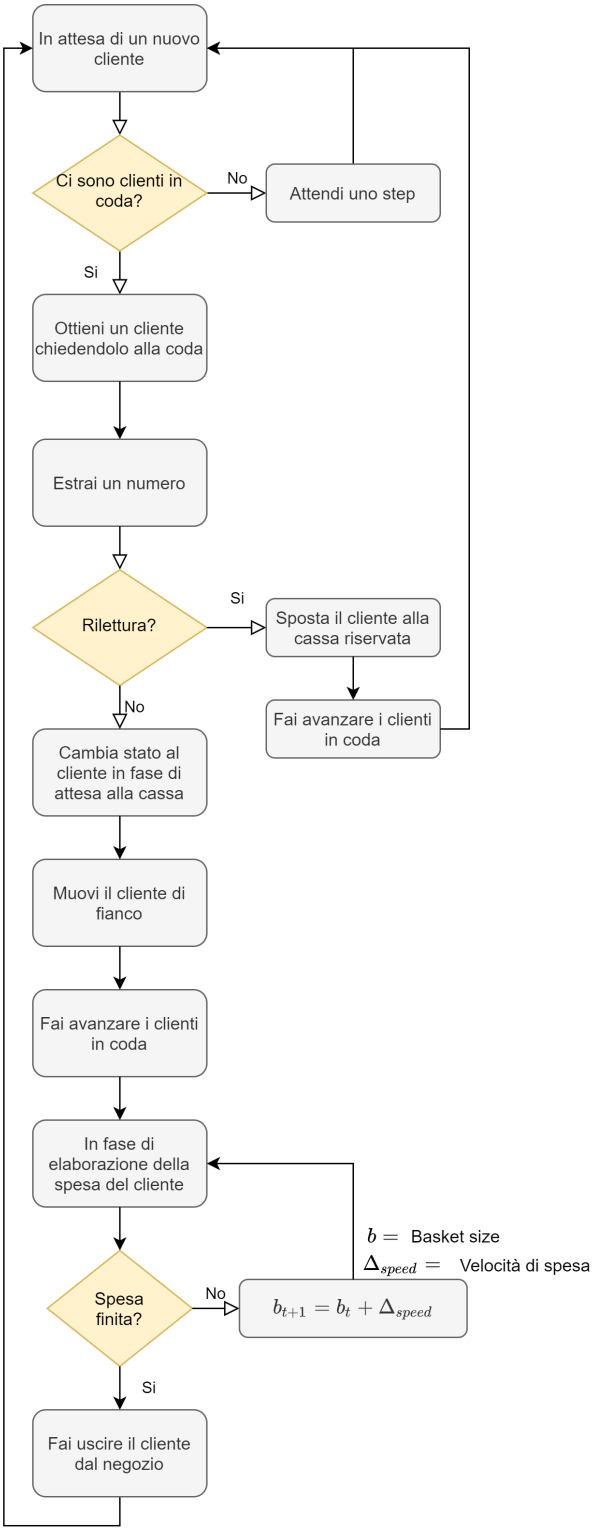


Figure 3.5: Workflow dell'agente di tipo cassa self-scan.

Cassa riservata Nella **fase di attesa di un nuovo cliente** la cassa riservata è pronta a servire i clienti in coda, però prima controlla che ci siano in coda clienti a cui è stata assegnata una rilettura parziale della spesa, dandogli la precedenza in quanto la rilettura parziale è più veloce di quella totale.

Scelto quindi il cliente, questa cassa passa per le stesse fasi della cassa standard.

Il workflow della cassa riservata viene riassunto nell'immagine 3.6.

3.5 Ambiente

L'ambiente del sistema in cui gli agenti vivono è il supermercato, implementato dalla classe **Supermarket** che si occupa di inizializzare la griglia che verrà poi mostrata in fase di simulazione sull'interfaccia, inizializzare le casse, i clienti e mediare le interazioni con gli agenti.

Per inizializzare la griglia, l'ambiente viene diviso in zone: zona d'entrata, zona di shopping, zona casse normali, zona casse self-service, zona casse self-scan. Questa divisione permette una gestione più semplice dello spazio e dei movimenti degli agenti. Ogni zona ha come parametri la dimensione o il numero di casse che deve contenere, questi parametri vengono inizializzati a priori e gestiti dall'entry point del programma, il file **main**, come si vedrà nella prossima sezione.

Ogni zona è responsabile della propria costruzione, ovvero del proprio collocamento nella griglia dell'interfaccia in base alle proprie dimensioni ed eventualmente del posizionamento delle casse che contiene. Inoltre ogni zona è responsabile dei movimenti dei clienti: se un cliente vuole muoversi da una zona all'altra oppure mettersi in coda nelle casse di una zona, è la zona di destinazione che fornisce il metodo per posizionarsi correttamente in essa.

Parlare di quanto dura uno step e quanto dura una simulazione

Ad ogni step della simulazione, il modello crea dei clienti secondo la distribuzione data (si veda la sezione 3.7) e li posiziona nella **Entering Zone** del supermercato in coordinate random, dunque si occupa della attivazione e disattivazione delle casse standard in base al numero di clienti presenti nel negozio in quello step, secondo dei parametri che si vedranno nella prossima sezione. Quindi il modello chiama gli scheduler degli agenti, clienti e casse, e fa eseguire i loro step.

3.5.1 Caratteristiche dell'ambiente

- Accessibile vs. Inaccessibile - Deterministico vs. Non-deterministico - Episodicità vs. Non-episodicità - Statico vs. Dinamico - Discreto vs. Continuo

3.5.2 Interazione tra agenti

3.6 Considerazioni sul modello

Il modello é stato sviluppato in modo da essere flessibile per permettere con semplicità future espansioni e cambiamenti. Gli aspetti più dinamici del modello, quindi il comportamento degli agenti e le varie modalità di scelta di una coda e la capacità di un agente Cliente di effettuare *jockeying* sono stati realizzati lasciando all'utilizzatore piena possibilità di modifica, ampliamento o di non utilizzo. A livello di architettura del software questo si traduce nell'implementazione dei pattern:

- **Strategy**: usato per definire diverse modalità di scelta della coda e diversi comportamenti di *jockeying*. Nuovi comportamenti possono essere aggiunti rispettando un'interfaccia standard. Permette inoltre se necessario cambiamenti di comportamento a run time.

TODO forse aggiungere link a pattern GOF, non so come citare correttamente

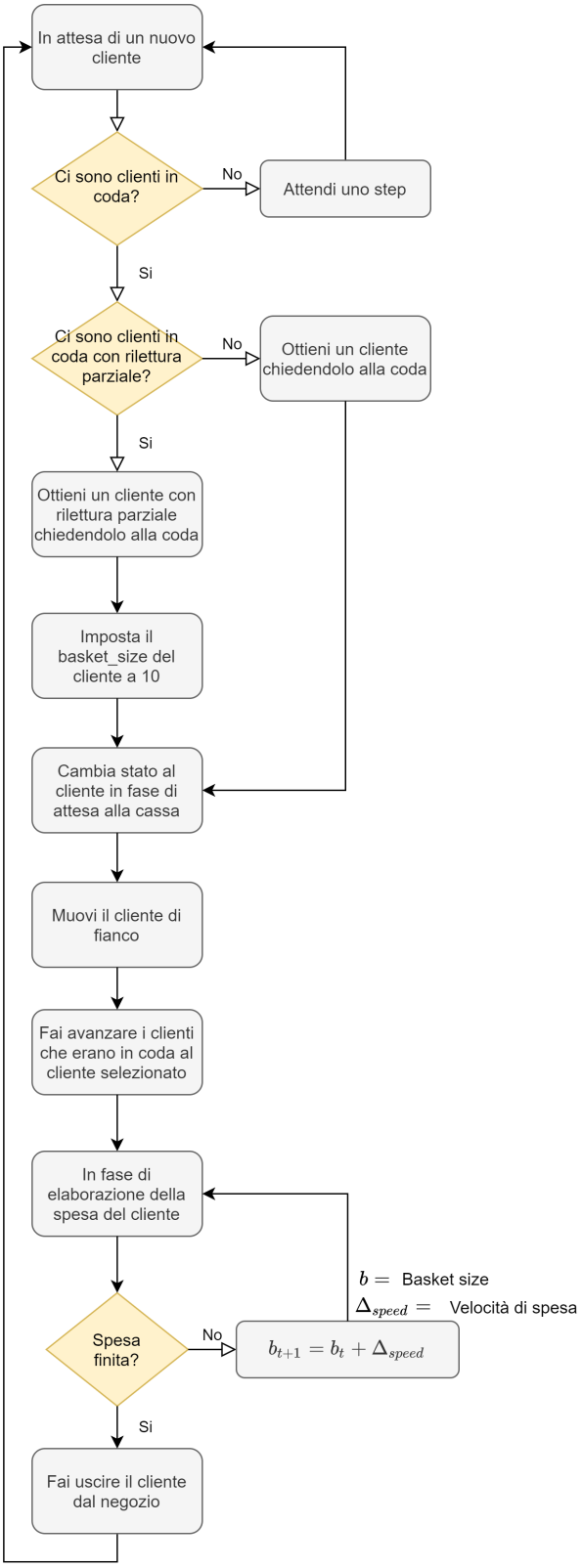


Figure 3.6: Workflow dell'agente di tipo cassa riservata.

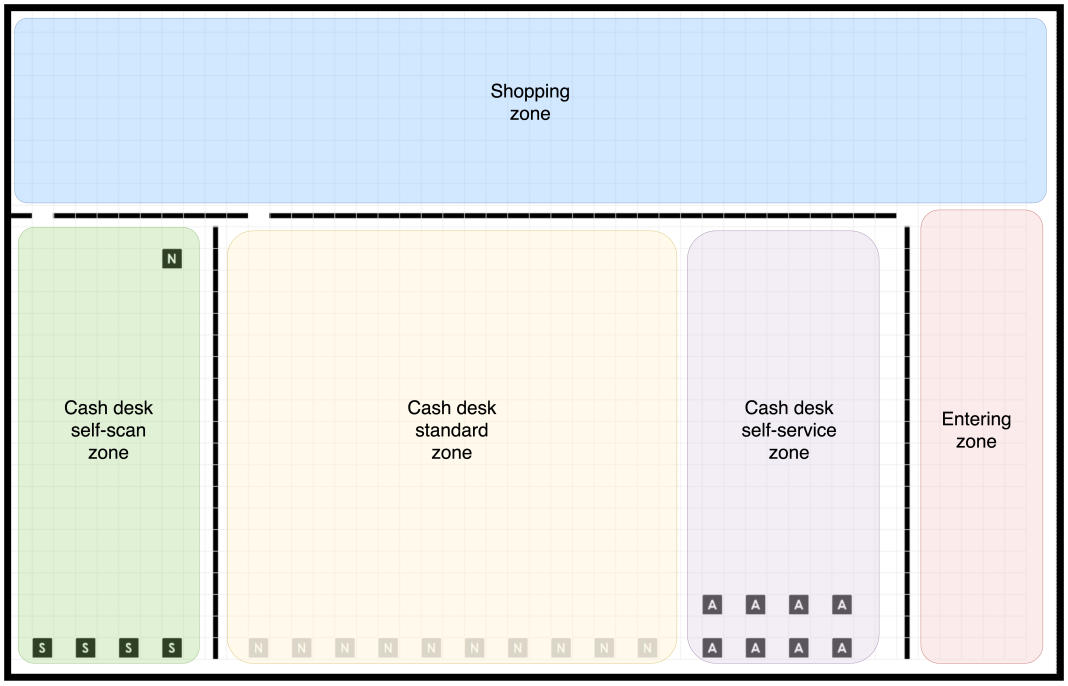


Figure 3.7: Stuttura del supermercato diviso in zone.

- **State**: usato per definire tramite una macchina a stati finiti i comportamenti degli agenti Cliente e Cassa. Nuovi stati possono essere aggiunti con facilità e collegati ad altri stati tramite transizioni. La divisione in stati rende semplice ragionare sul comportamento di un agente.

3.7 Parametri del modello

Per rendere il modello più generale possibile e in modo da adattarlo a diverse configurazioni con lo scopo di simulare scenari what-if, vengono introdotti diversi parametri per l'inizializzazione e il comportamento della simulazione.

Controllare questo paragrafo pls

3.7.1 Configurazione casse e struttura del supermercato

Tra i parametri più importanti e con maggiore impatto per il modello troviamo sicuramento la **configurazione del supermercato**. Un primo fattore che caratterizza la struttura del supermercato è la dimensione della diverse zone: *shopping zone*, *cash-desk zone* e *entering zone*.

Ancora più influente e determinante per il comportamento del modello è il numero e tipo di casse che compongono il supermercato. Infatti una volta scelta la struttura e le dimensioni delle diverse zone, è necessario indicare nella *cash-desk zone* il numero di casse per ogni tipo, quindi specificare la quantità di:

- Casse self-scan (+ 1 riservata obbligatoria)
- Casse standard
- Casse self-service

Inoltre per quanto riguarda le code, seppure per le casse self-service è obbligatorio avere una singola coda condivisa per tutte le casse, per quanto riguarda le casse standard un ulteriore

parametro è consiste nel definere se le casse di tipo standard hanno una coda dedicata per ogni cassa o un'unica coda condivisa.

3.7.2 Parametri di jockeying

Il comportamento di jockeying è influenzato da alcuni parametri, questi sono:

- **Numero di code adiacenti considerate**: la coda in cui il customer è presente in quel momento svolge il ruolo di coda pivot, questo parametro indica il numero di code adiacenti alla coda pivot che vengono prese in considerazione per valutare l'eventualità di fare jockeying.
- **Threshold di jockeying**: questo parametro ha lo scopo di modellare il fatto che un cliente efettua jockeying solo nel caso in cui per lui risulta essere conveniente non meno di un certo livello. Questo threshold indica di quale deve essere il minimo guadagno per effettuare jockeying. Questo approccio basato su una soglia di minimo guadagno è stato presentato nel lavoro di Koenigsberg [2].
- **Probabilità di jockeying**: Nel lavoro di Tomasz Antczak e altri [1], viene spiegato come il fenomeno di jockeying sia piuttosto raro. Il modello proposto tiene conto di questo aspetto introducendo una variabile aleatorio distributita secondo una bernulliana che ha lo scopo di, nel caso in cui il jockeying risulti essere conveniente basandosi sul threshold, consentire o negare il jockeying. Con questo approccio si vuole rendere meno frequente il jockeying.

3.7.3 Parametri di

Casse adiacenti considerate

Inizializzazione della griglia e parametri per creare casse (numero casse, coda condivisa o no, velocità di processing e parametro per rallentare la velocità della self-service), customer, basket size (analisi dei dati di Gianluca).

3.7.4 Basket size

Citare paper con i dati (distribuzione, parametro lambda scelto).

Chapter 4

Implementazione dei comportamenti e delle strategie

In questo capitolo verranno analizzate le strategie di scelta della coda da parte del cliente. In particolare queste strategie determinano la coda che il cliente deciderà di seguire durante la *fase di scelta della coda* e durante la *fase di attesa in coda e jockeying*.

Come introdotto all'inizio della relazione, obiettivo di questo progetto è analizzare le varie configurazioni di casse all'interno del supermercato, al variare del tipo di casse, della quantità di clienti presenti nel negozio e alla strategia di scelta della coda dei clienti, pertanto è necessario disporre di strategie che sfruttano calcoli basati su variabili diverse: le variabili in gioco saranno il numero di elementi nel carrello, il numero di persone e il tempo medio di attesa.

Se un cliente entra nel supermercato con l'intenzione di usare le casse self-scan, chiaramente non sarà dotato di strategie di scelta della coda e di jockeying, dal momento che le casse self-scan hanno sempre un'unica coda condivisa. Anche nel caso in cui le casse standard abbiano un'unica coda condivisa, come capita in molti negozi, il cliente non avrà una strategia di scelta della coda o di jockeying. Al contrario invece, dopo la fase di shopping il cliente dovrà scegliere la coda tra le code disponibili delle casse standard e delle casse self-service; una volta che esso si accoda in una cassa standard, può decidere di cambiare coda e quindi effettuare il jockeying, se ritiene, con la propria strategia, che nelle casse a lui più vicine ci sia un tempo minore di attesa.

Lo scopo del progetto è indagare sulla configurazione di casse migliori, quindi ad ogni simulazione tutti i clienti avranno la stessa strategia di scelta della coda e di jockeying per creare una netta distinzione tra simulazioni diverse.

4.1 Fase di scelta della coda

Alla fine della *fase di shopping*, il cliente che non vuole andare alla cassa self-scan, deve scegliere quale coda seguire tra quelle disponibili, ovvero tra le code associate a casse aperte.

Una strategia è una scelta della coda q che minimizza una certa funzione $f(q)$, come riportato nel capitolo precedente alla 3.1.

Al fine di definire le strategie, è importante notare che la funzione basket-size(c_i) non deve essere deterministica, come già introdotto nel capitolo precedente: il cliente fa una stima del numero di elementi nel carrello degli altri elementi, non ne è però certo, per questo questa funzione ha una probabilità di errore che rende la stima più veritiera, e si può ridefinire:

$$\text{estimate-basket-size}(c_i) = \text{basket-size}(c_i) + e_i \tag{4.1}$$

dove e_i è l'errore commesso nella stima e può essere sia positivo che negativo. L'errore dipende dalla grandezza del carrello, in particolare più elementi ci sono nel carrello più l'errore aumenta; intuitivamente in questo modello si è deciso di far variare l'errore in modo logaritmico rispetto alla grandezza del carrello, in base alla formula:

$$e_i = \frac{\text{basket-size}(c_i)}{d} \tag{4.2}$$

dove $d \in \mathbb{R}$, $d \geq 1$ e se $d = 1$ non viene commesso alcun errore sulla stima. La quantità estimate-basket-size diventa dunque una variabile aleatoria normale con media la basket-size reale e deviazione standard l'errore commesso sulla stima.

Le 4 strategie di scelta della coda prese in considerazione per il modello sono:

1. **Minimo numero di elementi**: viene scelta la coda con il minimo numero di elementi nei carrelli di tutte le persone in attesa. La funzione da minimizzare è quindi per una coda $q \in Q$ dove Q è l'insieme di tutte le code disponibili:

$$f(q) = \sum_{i=1}^{N} \text{estimate-basket-size-size}(c_i) \tag{4.3}$$

   dove $c_i \in q$ è un cliente in coda, estimate-basket-size-size(c_i) è il numero di elementi che ha nel suo carrello e $N = |q|$ è il numero di clienti in coda in q.

2. **Minimo numero di persone**: viene scelta la coda con il minimo numero di persone accodate. La funzione da minimizzare per $q \in Q$ è:

$$f(q) = |q| \tag{4.4}$$

3. **Minimo tempo d'attesa in base al tempo di servizio medio**: viene scelta la coda con il tempo d'attesa minimo, calcolato in base al tempo di servizio medio. Il *tempo di servizio totale di una coda* è calcolato come somma del tempo di servizio per ogni cliente della coda. Il tempo di servizio per un cliente comprende il **tempo di transazione** e il **tempo di pausa** tra un cliente e un altro, e variano a seconda del tipo di cassa, come illustrato nella sezione 3.4. Le formule per il calcolo dei tempi per la cassa standard 3.2 e 3.3, comprendendo la stima della grandezza del carrello, diventano dunque:

$$\text{transaction-time}_i = e^{alog(\text{estimate-basket-size}(c_i))+b} \tag{4.5}$$

$$\text{break-time}_i = \frac{\beta^{\alpha}\text{estimate-basket-size}(c_i)^{\alpha-1}e^{-\beta\text{estimate-basket-size}(c_i)}}{\Gamma(\alpha)} \tag{4.6}$$

   e per la cassa self-service, le 3.6 e 3.7 diventano:

$$\text{transaction-time}_i = e^{alog(\text{estimate-basket-size}(c_i))+b} \tag{4.7}$$

$$\text{break-time}_i = e^{clog(\text{estimate-basket-size}(c_i))+d} \tag{4.8}$$

I tempi di servizio per ogni cliente di una coda sono quindi sommati per calcolare il tempo servizio totale per quella coda. Il tempo di servizio totale di una coda q_j, $j = 1, \ldots, M$, dove M è il numero totale di code del supermercato, è pertanto:

$$\text{total-service-time}(q_j) = \sum_{i=1}^{N} (\text{transaction-time}_i + \text{break-time}_i) \tag{4.9}$$

Il tempo di servizio medio per le code è la somma dei tempi totali di servizio divisa per il numero di code. Viene scelta la coda con il tempo totale minimo, mettendo insieme le 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 si ottiene la funzione da minimizzare:

$$f(q) = |q| * \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} (\text{total-service-time}(q_j)) \tag{4.10}$$

4. **Minimo tempo d'attesa in base alla *power regression***: viene scelta la coda con il tempo d'attesa minimo, calcolato in base al tempo di transazione e il tempo di pausa medi per quella coda. Il tempo di servizio totale per una coda è calcolato anche qui in base alla 4.9. La funzione da minimizzare è:

$$f(q) = |q| * \text{total-service-time}(q) \tag{4.11}$$

4.2 Fase di attesa in coda e jockeying

Quando il cliente è nella *fase di attesa in coda* ha la possibilità di cambiare la propria scelta se nota che nelle code adiacenti il tempo di attesa è minore che nella propria; le code adiacenti implicate nel calcolo sono quelle che hanno distanza minore o uguale del **parametro di adiacenza**, descritto nel capitolo precedente, rispetto a dove il cliente è già accodato. Una coda è distante 1 da un'altra coda se fisicamente nella griglia della simulazione esse compaiono una di fianco all'altra. Nella pratica la coda in cui il cliente è presente in un determinato momento svolge la funzione di coda pivot e le altre code prese in considerazione per fare jockeying sono quelle adiacenti alla coda pivot.

Le strategie seguite nel jockeying sono due, e coincidono con le prime due strategie di scelta della coda, descritte nella sezione precedente. Anche in questo caso il cliente stima le grandezze dei carrelli degli altri clienti in base alle 4.1 e 4.2. Entrambe le strategie necessitano di un **threshold**, che è un parametro del modello; dopo aver trovato la coda adiacente con tempo di attesa minore, viene calcolato un "guadagno" di fare jockeying, e se questo guadagno è più alto del threshold, allora il cliente cambia coda, altrimenti no; questo parametro serve a simulare il fatto che le persone in coda tendono sempre a preferire la propria posizione corrente, e a cambiare coda solo quando conviene tanto. Inoltre abbiamo pensato che non tutte le persone al supermercato vogliono fare jockeying, ci sono alcuni che neanche lo considerano e non guardano le casse adiacenti per valutarne il tempo medio d'attesa, pertanto abbiamo impostato un parametro che rappresenta la probabilità di fare jockeying, in modo che prima di scegliere si estragga un numero casuale e si decida.

1. **Minimo numero di elementi**: viene scelta la coda con il minimo numero di elementi nei carrelli di tutte le persone in attesa. Il "guadagno" nel cambiare coda è calcolato come:

$$g = \#\text{elementi nei carrelli} - \min_{q \in Q_{\text{adj}}} \#\text{elementi nei carrelli} \tag{4.12}$$

dove Q_{adj} è l'insieme delle code adiacenti alla coda corrente. Se questo valore è più alto del threshold, significa che il guadagno è abbastanza alto e il cliente cambia coda.

2. **Minimo numero di persone**: viene scelta la coda con il minimo numero di persone accodate. Il "guadagno" nel cambiare coda è calcolato come:

$$g = i - \min_{q \in Q_{\text{adj}}} |q| \tag{4.13}$$

dove $0 < i \leq |q_{\text{current}}|$ è la posizione del cliente nella coda corrente.

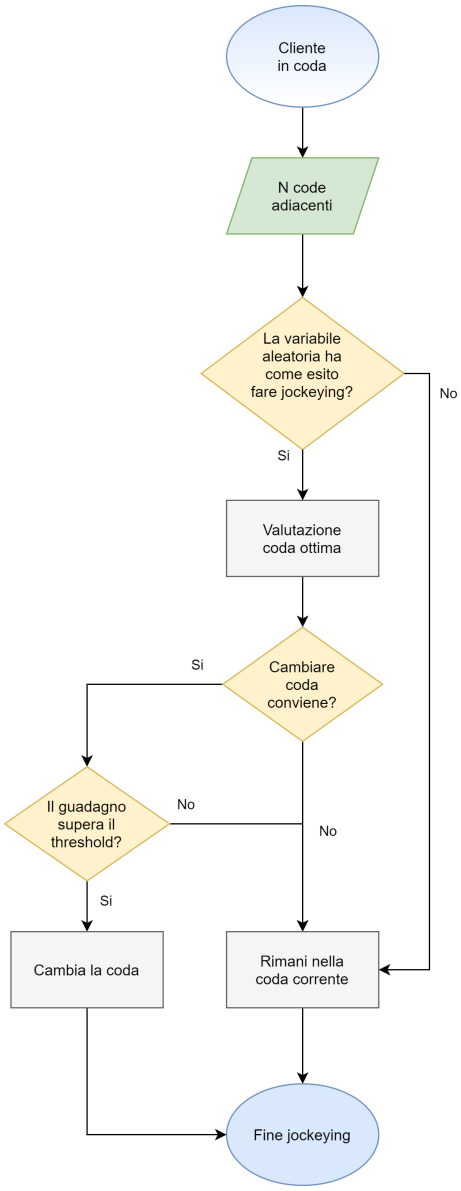


Figure 4.1: Workflow jockeying.

Chapter 5

Simulazione e analisi dei risultati

Al fine di analizzare i risultati sono state introdotte le definizioni di densità e flusso di clienti per ogni step di simulazione; queste misure ci permettono di misurare l'affluenza dei clienti nel supermercato e come questa viene gestita dalle casse che hanno il potere di attivarsi o disattivarsi in base alla quantità di clienti presenti. Densità e flusso permetteranno di disegnare i grafici fondamentali che mostrano per ogni simulazione come le casse smaltiscono l'afflusso di clienti in entrata, soprattutto nei periodi critici (in cui il supermercato raggiunge una quantità di clienti che "mettono alla prova" le casse).

La **densità** di clienti per step corrisponde al numero di clienti medio per ogni cassa; la densità allo step i è:

$$\text{density}_i = \frac{\#\text{ customers in the supermarket}}{\#\text{ cashdesks}} \tag{5.1}$$

Si terrà conto della densità totale, della densità per le casse standard o self-service e della densità per le casse self-scan.

Il **flusso in entrata** di clienti per step corrisponde al numero di clienti che entrano ad ogni step per ogni cassa in media; il flusso allo step i è:

$$\text{flow}_i = \frac{\#\text{ customers entering in the supermarket}}{\#\text{ cashdesks}} \tag{5.2}$$

Si terrà conto del flusso totale, del flusso per le casse standard o self-service e del flusso per le casse self-scan.

per ognuna di queste simulazioni fare i grafici: grafico fondamentale (flusso asse y, densità asse x), tempo totale di simulazione, tempo medio d'attesa dei clienti (fare grafico con media e deviazione standard, i dati sono nel datacollector), grafico KDE (Kernel density estimates - ovvero densità sull'asse y e waiting time sull'asse x), grafico con tempo sull'asse x e sull'asse y probabilità di stare meno di 5 minuti in coda per ogni strategia (vedi

5.1 Simulazione allo scopo di validazione

Stato dell'arte Al fine di validare il modello, come primo esperimento è stata condotta una simulazione con gli stessi parametri usati nell'articolo [1]. In quella simulazione il supermercato contiene 20 casse standard e 6 casse self-service; si noti che nel lavoro citato, le casse si attivano o disattivano in base ai dati raccolti dai ricercatori nei supermercati, nel nostro modello invece le casse si attivano in base al numero di clienti presenti nel supermercato, in base a un parametro che è possibile cambiare nel momento in cui si raccolgono i dati. Vengono messe a confronto le strategie diverse di scelta della coda da parte dei clienti, arrivando alla conclusione che la strategia che porta al minor tempo d'attesa è quella chiamata "minimo tempo d'attesa in base alla *power regression*" nel capitolo 4; tuttavia i

risultati portano a dire che questo scenario non è quello ottimale per tutti i supermercati negli orari di punta.

Nelle prossime simulazioni verrà testato il jockeying, in particolare si metteranno a confronto le diverse strategie di scelta della coda e di jockeying per stabilire se questo porti a un miglioramento dell'esperienza del cliente nel supermercato. Questi esperimenti verranno poi messi a confronto con una simulazione in cui c'è soltanto la coda condivisa per le casse standard, pertanto i clienti non avranno bisogno di scegliere la coda nè di fare jockeying: in base a quanto detto nell'articolo [3], questo tipo di coda dovrebbe portare a tempi di attesa minori. Verranno quindi introdotte nella simulazione le casse self-scan con rilettura randomica, si prevede che queste portino a una diminuzione considerevole dei tempi d'attesa in coda, in quanto viene a mancare la fase di scanner da parte dei cassieri. Infine verrà effettuata una simulazione con gli elementi probabilistici già descritti nel corso dei capitoli 3 e 4, che rendono l'esperimento non deterministico e a nostro riguardo più realistico.

Simulazione con gli stessi parametri - Simulazione nostra uguale ai polacchi (validazione - con le 4 strategie): 6 casse self-service, 20 casse standard

5.2 Simulazione con strategie *jockey*

- Simulazione nostra con parametri dei polacchi, ma aggiungendo il jockeying (con le 4 strategie) -¿ viene più veloce

5.3 Simulazione con coda condivisa

- Simulazione nostra con parametri dei polacchi, ma con coda condivisa -¿ viene più veloce come nell'articolo delle fork

5.4 Simulazione con casse self-scan

- Simulazione con self-scan (con le 4 strategie) -¿ il tempo medio d'attesa nelle self-scan è più basso

5.5 Simulazione non deterministica

- Simulazione con roba probabilistica (con le 4 strategie + coda condivisa) -¿ più realistica

Chapter 6

Conclusioni

Ciao

Bibliography

[1] T. Antczak, R. Weron, and J. Zabawa, "Data-driven simulation modeling of the checkout process in supermarkets: Insights for decision support in retail operations," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 12 2020.

[2] E. Koenigsberg, "On jockeying in queues," *Management Science*, vol. 12, no. 5, pp. 412–436, 1966.

[3] D. Yanagisawa, Y. Suma, Y. Tanaka, A. Tomoeda, K. Ohtsuka, and K. Nishinari, "Methods for improving efficiency of queuing systems," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 297–306, Springer, 2011.

[4] J. Kazil, D. Masad, and A. Crooks, "Utilizing python for agent-based modeling: The mesa framework," in *Social, Cultural, and Behavioral Modeling* (R. Thomson, H. Bisgin, C. Dancy, A. Hyder, and M. Hussain, eds.), (Cham), pp. 308–317, Springer International Publishing, 2020.

[5] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. USA: Prentice Hall Press, 3rd ed., 2009.