

GESTIONE DI UN AUTOLAVAGGIO

Progetto di modellistica, simulazione e valutazione delle prestazioni



Martina De Maio, 0296447

A.A. 2022/2023

1 SOMMARIO

2	INTRODUZIONE.....	3
3	OBIETTIVI	4
4	MODELLO CONCETTUALE	5
4.1	Fasce orarie	6
4.2	Variabili di stato.....	6
4.3	Eventi.....	7
5	Modello di specifiche.....	7
5.1	Dati di input.....	7
5.2	Probabilità di routing.....	8
5.3	Costi e profitto del sistema	8
6	Modello computazionale	9
6.1	Strutture dati (classi)	9
6.1.1	Clock di sistema.....	9

6.1.2	State Variable	10
6.1.3	Classe eventi (Calendar).....	10
6.1.4	Arrivi e completamenti.....	11
6.1.5	Cambio di fascia oraria	12
7	Verifica.....	12
7.1	Centro 0: Lavaggio a mano	13
7.2	Centro 1: Lavaggio con rulli	14
7.3	Centro 2: Lucidatura	15
7.4	Centro 3: Lavaggio interni	16
7.5	Controlli di consistenza	17
7.5.1	Tempi di risposta medi nei centri.....	17
7.5.2	Popolazioni medie nei centri	17
7.5.3	Probabilità di perdita	17
8	Validazione.....	17
9	Esecuzione degli esperimenti e Analisi dei risultati	20
9.1	Simulazione a Orizzonte Infinito	20
9.1.1	Fascia oraria 08:30 – 13:00	22
9.1.2	Fascia oraria 14:30 – 19:00	25
9.1.3	Conclusioni.....	27
9.2	Simulazione a orizzonte finito.....	27
10	Conclusioni	28

2 INTRODUZIONE

L'autolavaggio è diventato un servizio sempre più popolare e richiesto, offrendo ai proprietari di veicoli la comodità di pulire e curare le loro auto in maniera efficiente. Tuttavia, le lunghe code, i tempi di attesa elevati e l'inefficienza operativa possono influire negativamente sull'esperienza dei clienti e sulla redditività complessiva dell'autolavaggio. Al fine di affrontare queste sfide e migliorare l'efficienza operativa, è stato intrapreso uno studio di modellistica, simulazione e valutazione delle prestazioni per ottimizzare un autolavaggio e massimizzare sia la soddisfazione dei clienti che il profitto dell'attività.

Lo studio prende in considerazione un autolavaggio composto da diversi centri di servizio, tra cui il lavaggio a mano, il lavaggio automatico con rulli, la lucidatura dell'auto e il lavaggio degli interni. L'obiettivo principale è quello studiare le diverse configurazioni dei centri, al fine di determinare la configurazione ottimale per ogni centro e identificare il numero adeguato di serventi per garantire tempi di attesa minimi e massimizzare l'efficienza complessiva dell'autolavaggio. Si ritiene infatti che trovare la combinazione ottimale di configurazioni e personale per i centri sia fondamentale per garantire un'esperienza di qualità ai clienti e raggiungere una maggiore redditività per l'attività.

Lo studio si focalizza su un autolavaggio che offre due opzioni iniziali ai clienti:

- **lavaggio a mano:** il veicolo viene pulito manualmente da operatori specializzati. Solitamente, viene utilizzato un mix di prodotti detergenti, spugne, panni e altri strumenti per rimuovere lo sporco e la polvere dalla carrozzeria dell'auto. Durante il lavaggio a mano, gli operatori possono prestare particolare attenzione alle aree più sporche o difficili da raggiungere, come gli angoli o le parti inferiori del veicolo. Questo metodo di lavaggio può essere più accurato e dettagliato rispetto al lavaggio con rulli, in quanto permette una pulizia personalizzata e una maggiore attenzione ai dettagli.
- **lavaggio automatico con rulli** (o lavaggio con tunnel): utilizza una serie di spazzole rotanti o rulli per pulire il veicolo. Durante il processo di lavaggio, il veicolo viene guidato attraverso un tunnel e le spazzole rotanti, spugne o tessuti ad alta pressione si muovono lungo la carrozzeria, rimuovendo lo sporco e applicando il detergente. Questo tipo di lavaggio è completamente automatizzato e richiede meno intervento umano rispetto al lavaggio a mano. È spesso più veloce ed efficiente, consentendo di gestire un numero maggiore di veicoli in un periodo di tempo più breve.

Entrambi i metodi di lavaggio hanno vantaggi e limitazioni. Il lavaggio a mano offre una maggiore precisione e cura nei dettagli, ma richiede più tempo e personale specializzato. D'altra parte, il lavaggio con rulli è rapido ed efficiente, ma potrebbe non essere in grado di raggiungere alcune aree difficili o fornire una pulizia personalizzata.

Queste fasi iniziali rappresentano un momento critico per l'esperienza dei clienti, in quanto è stato osservato che alcuni utenti potrebbero decidere di abbandonare l'autolavaggio se l'attesa iniziale è eccessivamente lunga. Pertanto, una parte dell'obiettivo del nostro studio si è focalizzata sull'ottimizzazione delle prestazioni nei primi due centri, riducendo al minimo i tempi di attesa e garantendo un processo fluido per i clienti.

Gli utenti (ossia le macchine) del sistema sono stati suddivisi in due categorie: macchine nuove, con un anno di immatricolazione inferiore o uguale a 5 anni, e macchine vecchie, con un anno di immatricolazione superiore a 5 anni. Le macchine nuove possono sottoporsi solo al lavaggio a mano, mentre le macchine vecchie hanno la possibilità di scegliere tra lavaggio a mano e lavaggio con rulli.

Dopo aver scelto il tipo di lavaggio, le macchine procedono attraverso il **centro lucidatura**, dove vengono eseguite operazioni di lucidatura della carrozzeria e dei cerchi per garantire un aspetto brillante e una protezione aggiuntiva. Al termine della lucidatura, le macchine hanno la possibilità di uscire dal sistema dell'autolavaggio o di decidere di lavare gli **interni dell'auto**, pagando un piccolo extra. Tuttavia, è importante notare che le macchine possono optare per il lavaggio interno solo se non devono affrontare ulteriori tempi di attesa; in caso contrario, i proprietari preferiscono evitare ulteriori attese e scelgono di uscire dal sistema dell'autolavaggio senza lavare gli interni.

La scelta di un autolavaggio come oggetto di studio deriva dall'esperienza personale e dalla consapevolezza delle potenziali problematiche legate a tempi di attesa elevati e a un utilizzo inefficiente delle risorse. Questo studio si propone di fornire una solida base di ricerca e una metodologia di valutazione delle prestazioni per aiutare gli operatori di autolavaggi ad affrontare queste sfide e a prendere decisioni informate sulla configurazione e gestione dei loro centri.

Nella relazione che segue, verrà descritto il modello utilizzato per la simulazione, i dati raccolti, i risultati ottenuti e le analisi svolte. Inoltre, forniremo analisi approfondite delle configurazioni dei centri, del numero di addetti e dei tempi di attesa per identificare le migliori strategie per migliorare l'efficienza operativa e la soddisfazione dei clienti. Infine, verranno trattate conclusioni significative e verranno fornite raccomandazioni pratiche per migliorare le prestazioni dell'autolavaggio.

Uno schema ad alto livello dell'autolavaggio studiato è mostrato nella Figura 1.

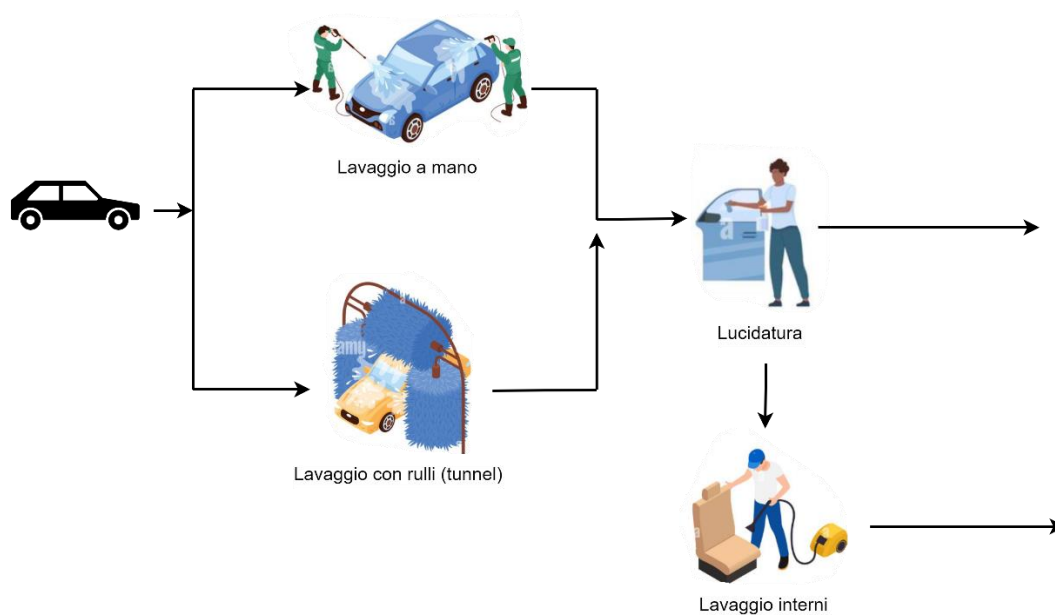


Figura 1: schema ad alto livello del sistema.

3 OBIETTIVI

L'obiettivo principale dello studio è quello di massimizzare i profitti complessivi dell'autolavaggio, tenendo conto di diverse variabili e diversi fattori. Per raggiungere questo obiettivo, si cerca di individuare il numero ottimale di serventi ed operatori per ciascun blocco del sistema, considerando le diverse fasce orarie e le esigenze dei clienti.

Nell'ottimizzazione dei profitti, vengono presi in considerazione i costi di manutenzione delle attrezzature, i costi dei prodotti utilizzati per il lavaggio e i costi relativi all'impiego dei dipendenti.

Parallelamente alla massimizzazione dei profitti, si vogliono garantire tre QoS:

1. **Tempo di attesa per i clienti nei centri di lavaggio a mano e con rulli deve essere inferiore a 5 minuti.** Questo obiettivo mira a soddisfare le aspettative dei clienti in termini di tempi di attesa rapidi e a evitare che i clienti abbandonino l'autolavaggio a causa di tempi di attesa eccessivamente lunghi.
2. **Il tempo di risposta complessivo del sistema per una macchina che decide di effettuare il lavaggio a mano deve essere inferiore ai 45 minuti,** senza considerare i tempi di percorrenza tra i vari centri. Questo obiettivo mira a garantire una rapida ed efficiente erogazione del servizio per le macchine, tenendo conto delle loro esigenze specifiche e delle aspettative dei clienti.
3. **Almeno l'80% delle auto che desiderano effettuare il lavaggio degli interni deve trovare un macchinario libero.** Questo obiettivo si concentra sull'offerta di servizi aggiuntivi e mira a massimizzare il profitto derivante dal lavaggio degli interni delle auto. Assicurare la disponibilità dei macchinari evita che i clienti rinuncino al servizio a causa dell'indisponibilità delle attrezzature.

Al fine di raggiungere tali obiettivi, è necessario condurre uno studio completo sia dello stato stazionario che del transiente del sistema dell'autolavaggio. Questo implica l'analisi e la valutazione di diverse configurazioni di serventi e operatori, al fine di individuare quella che riesce a soddisfare i due vincoli critici (tempi di attesa e tempi di risposta) mantenendo allo stesso tempo il costo totale più basso, e quindi il maggior profitto.

4 MODELLO CONCETTUALE

Il diagramma che rappresenta il sistema in esame è rappresentato nella seguente Figura 2.

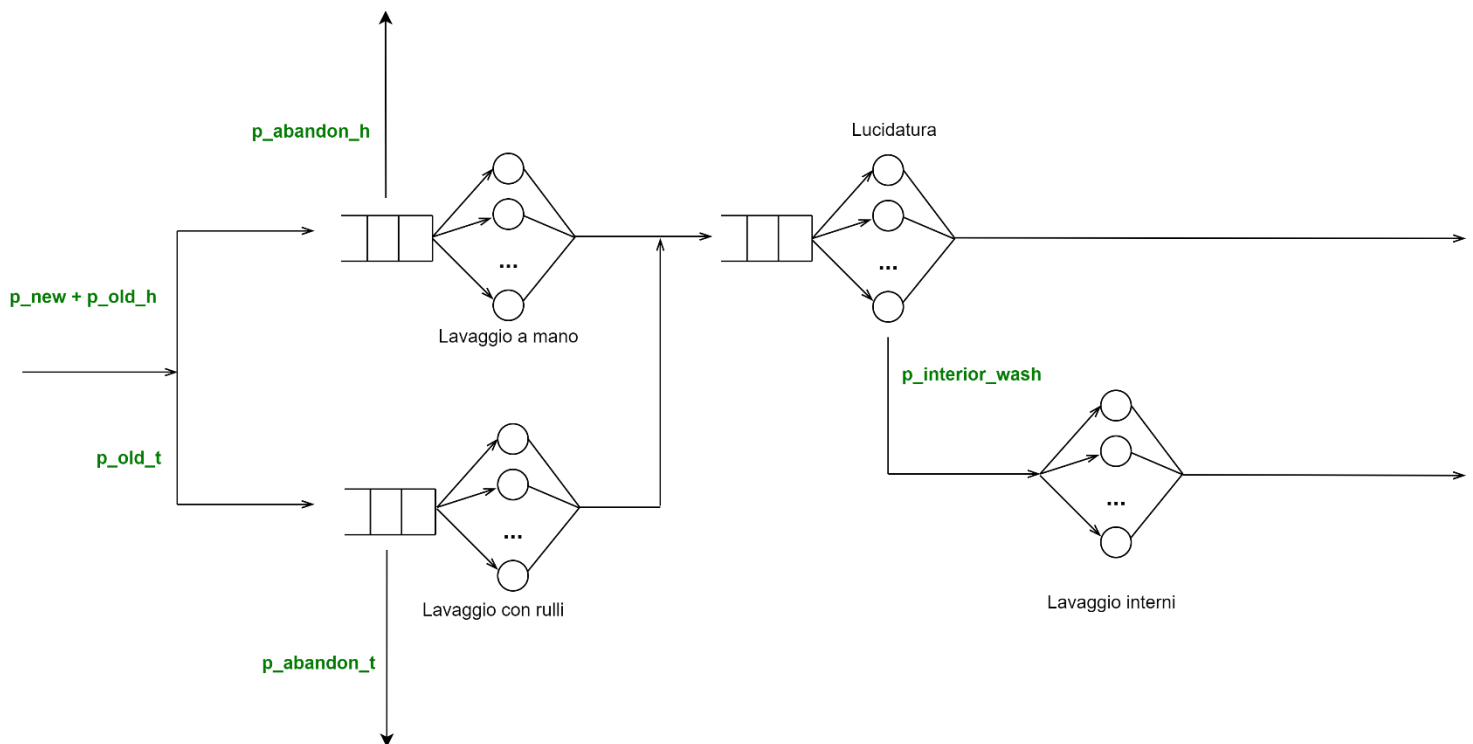


Figura 2: diagramma a basso livello dell'autolavaggio.

Nel diagramma precedente sono evidenziate, in verde:

- p_old_t : macchine vecchie che utilizzano il lavaggio con rulli
- p_old_h : macchine vecchie che utilizzano il lavaggio a mano
- p_new_h : macchine nuove che utilizzano il lavaggio a mano
- $p_abandon_t$: macchine che abbandonano il centro relativo al lavaggio con rulli
- $p_abandon_h$: macchine che abbandonano il centro relativo al lavaggio a mano
- $p_interior_wash$: macchine che entrano nel centro relativo al lavaggio di interni

Il sistema è rappresentato da quattro centri:

- Centro 1: Lavaggio a mano (M/M/k)
- Centro 2: Lavaggio con rulli (M/M/k)
- Centro 3: Lucidatura (M/M/k)
- Centro 4: Lavaggio interni (M/M/k/k)

I primi tre centri sono modellati come sistemi di code M/M/k, in cui le code seguono la politica di gestione FIFO (First-In-First-Out), ossia il primo veicolo che arriva è il primo ad essere servito. Le code sono considerate infinite, consentendo di gestire un numero illimitato di veicoli in attesa. Nel momento in cui un veicolo giunge in uno dei centri, viene effettuato un controllo per verificare se ci sono serventi disponibili. Se sono presenti più sportelli liberi, il veicolo viene indirizzato al primo servente disponibile. Nel caso in cui tutti i serventi siano occupati, il veicolo si inserisce nella coda in attesa di essere servito.

Il quarto centro, ossia Lavaggio interni, è modellato come un sistema M/M/k/k in cui è possibile avere perdite. Questo significa che, se tutti i serventi del centro sono occupati, i veicoli escono direttamente dal sistema senza effettuare il lavaggio degli interni. L'obiettivo principale dello studio è dimensionare la rete in modo tale che il numero di veicoli che non riescono a lavare gli interni sia inferiore al 20%.

4.1 FASCE ORARIE

Durante l'analisi del sistema di autolavaggio, sono state prese in considerazione due fasce orarie specifiche:

- 8:30-13:00
- 14:30-19:00

L'analisi delle due fasce orarie è importante per comprendere come il sistema di autolavaggio gestisca la domanda e l'afflusso di clienti in momenti specifici della giornata, caratterizzati da un tasso di arrivo non costante.

Attraverso lo studio di queste fasce orarie, sarà possibile valutare l'impatto della variazione del numero di arrivi sulle prestazioni complessive del sistema e identificare le opportunità per ottimizzare l'utilizzo delle risorse e garantire un'esperienza soddisfacente per i clienti in entrambe le fasce orarie.

4.2 VARIABILI DI STATO

Le variabili di stato considerate sono:

- Numero di utenti in ogni nodo.
- Numero di nodi attivi, ossia numero di serventi disponibili nei vari blocchi.
- Tipologia di utente (macchina nuova/vecchia).

4.3 EVENTI

Gli eventi che si possono avere sono:

- Arrivo di un utente
- Completamento di un servizio
- Abbandono di un utente presso il centro 1 o il centro 2
- Cambio di fascia oraria

5 MODELLO DI SPECIFICHE

Purtroppo non sono disponibili fonti esterne o statistiche online riguardanti il numero di clienti che accedono all'autolavaggio durante diverse fasce orarie o il tempo medio impiegato per i diversi servizi offerti, per cui i dati di input utilizzati nel presente studio sono stati raccolti direttamente sul campo.

Infatti, tali dati sono stati raccolti direttamente presso il centro dell'autolavaggio oggetto di analisi, sia attraverso l'osservazione diretta delle attività svolte nel centro sia tramite interviste e richieste di informazioni al personale addetto. Durante le visite al centro dell'autolavaggio, si è osservato attentamente il flusso di veicoli, il tempo di servizio nei diversi centri e le preferenze degli utenti riguardo ai servizi offerti.

L'approccio di raccolta dati si è quindi basato sulla partecipazione attiva presso il centro dell'autolavaggio, consentendo di ottenere una comprensione diretta delle dinamiche operative e delle pratiche di gestione adottate. Durante questo processo, sono state effettuate osservazioni dettagliate riguardo il flusso di veicoli, i tempi di attesa, le operazioni di servizio svolte nei diversi centri, le variazioni nelle fasce orarie di maggior afflusso per catturare le fluttuazioni della domanda di servizio. I dati raccolti sono stati trattati in modo rigoroso per garantire l'affidabilità e la rappresentatività delle informazioni utilizzate nel modello di specifiche.

Va sottolineato che i dati numerici relativi a queste informazioni sono basati sull'esperienza personale e sono stati pensati per essere il più realistici possibile. Sebbene non siano dati statistici ufficiali, ci auguriamo che le informazioni raccolte forniscano un quadro affidabile delle dinamiche del sistema di autolavaggio in esame, consentendo di sviluppare un modello concettuale accurato e rappresentativo.

5.1 DATI DI INPUT

I tempi di interarrivo dei veicoli e i tempi di servizio all'interno del sistema di autolavaggio sono modellati utilizzando una distribuzione Esponenziale, appropriata per modellare sistemi caratterizzati da processi di arrivo o di servizio approssimabili come processi di Poisson. La distribuzione Esponenziale è caratterizzata da un tasso medio di arrivo o di servizio, che è stato calibrato in base ai dati e alle osservazioni effettuate presso l'autolavaggio preso in esame.

- Gli arrivi sono stati divisi in due diverse fasce orarie:
 - **08:30 – 13:00** → tasso di arrivo: 15 auto/ora (**1/4 auto/min**)
 - **14:30 – 19:00** → tasso di arrivo: 30 auto/ora (**1/2 auto/min**)
- Tempo per lavaggio a mano: **30 min/auto**
- Tempo per lavaggio con rulli: **10 min/auto**

- Tempo per lucidatura: **2 min/auto**
- Tempo per lavaggio interni: **5 min/auto**
- Per gestire le eventuali perdite dalla coda del centro 1 o 2, è stato introdotto un meccanismo basato su una soglia di job in coda. Quando il numero di job in coda supera la soglia specificata **CAR_TO_WAIT**, viene introdotto un tempo esponenziale per modellare la probabilità di perdita di un job. Tuttavia, quando il numero di job davanti al job considerato in coda diventa al massimo **CAR_TO_WAIT**, la probabilità di perdita si riduce a zero, garantendo che i job successivi non subiscano perdite. Questo meccanismo ci consente di valutare l'impatto delle perdite sulla performance del sistema e di considerare scenari in cui la coda viene gestita in modo ottimale per minimizzare le perdite. Il valore di **CAR_TO_WAIT** cambia se siamo nel centro 0 o nel centro 1:
 - **CAR_TO_WAIT_H** = 3 (centro lavaggio a mano)
 - **CAR_TO_WAIT_T** = 4 (centro lavaggio con rulli)

5.2 PROBABILITÀ DI ROUTING

In base alle osservazioni e alle ricerche effettuate, è emerso che a Roma il **16%** delle auto in circolazione sono considerate **nuove**, mentre l'**84%** delle auto ha **un'età superiore a 5 anni**. All'interno di quest'ultima categoria, il 30% delle auto preferisce effettuare un lavaggio a mano, mentre il restante 70% opta per un lavaggio con rulli. La motivazione alla base di questa scelta risiede nel timore che il lavaggio con rulli possa danneggiare la carrozzeria delle auto nuove. I proprietari di auto nuove tendono quindi a preferire un lavaggio più delicato e controllato, come quello eseguito manualmente. D'altra parte, i proprietari di auto più vecchie si sentono più a loro agio con un lavaggio con rulli, poiché ritengono che sia un'opzione più conveniente ed efficace per rimuovere lo sporco accumulato nel tempo.

Quindi, per calcolare le probabilità dei diversi tipi di lavaggio, possiamo considerare che:

- Il 16% delle auto è nuovo e si sottopone solo al lavaggio a mano.
- Per le auto più vecchie (84% del totale), il 30% opta per il lavaggio a mano e il restante 70% sceglie il lavaggio con rulli. Per cui:
 - la probabilità di fare un **lavaggio con rulli** è calcolata come **$0.70 * 0.84 = 0.588$**
 - la probabilità che una macchina vecchia faccia il lavaggio a mano è $0.30 * 0.84 = 0.252$

La probabilità di fare un **lavaggio a mano** è quindi ottenuta sommando il 16% di auto nuove (lavaggio solo a mano) al 30% di auto più vecchie (lavaggio a mano), ovvero **$0.16 + 0.252 = 0.412$** .

5.3 COSTI E PROFITTO DEL SISTEMA

Per calcolare il profitto mensile, è necessario considerare sia i costi che i guadagni associati a ciascun centro dell'autolavaggio. Di seguito sono riportati i costi e i prezzi di vendita mensili per ciascun tipo di lavaggio:

- Costo del lavagista (**CAR_WASHER_COST**) = **1080 € al mese**
- Costo del tunnel per il lavaggio con rulli (**TUNNEL_COST**) = **1000 € al mese**
- Costo del macchinario per il lavaggio interno (**INTERIOR_MACHINE_COST**) = **300 € al mese**
- Costo dei detersivi per il lavaggio (**CLEANSER_COST**) = **200 € al mese**
- Costo della cera per la lucidatura dell'auto e dei cerchioni (**CAR_WAX_COST**) = **100 € al mese**

Guadagni per singolo centro:

- Prezzo lavaggio a mano (HAND_WASH_PRICE) = **25 € a lavaggio**
- Prezzo lavaggio con rulli (TOUCHLESS_WASH_PRICE) = **10 € a lavaggio**
- Prezzo lavaggio interni (INTERIOR_WASH_PRICE) = **2 € a lavaggio**

Per calcolare il profitto mensile, è necessario considerare il numero di auto che utilizzano ciascun centro e moltiplicarlo per il corrispondente prezzo di vendita. Successivamente, si sottraggono i costi mensili per ottenere il profitto netto.

Ad esempio, se il numero di auto che usufruiscono del lavaggio a mano è $N1$, il numero di auto che utilizzano il lavaggio con rulli è $N2$ e il numero di auto che effettuano il lavaggio interno è $N3$, il profitto mensile può essere calcolato come segue:

Profitto mensile

$$\begin{aligned} &= (N1 * HAND_WASH_PRICE) * T + (N2 * TOUCHLESS_WASH_PRICE) * T + (N3 \\ &* INTERIOR_WASH_PRICE) * T - (CAR_WASHER_COST + TUNNEL_COST \\ &+ INTERIOR_MACHINE_COST + CLEANSER_COST + CAR_WAX_COST) \end{aligned}$$

Considerando sempre un tempo di riferimento in mesi. È importante tenere conto del numero di auto che utilizzano ciascun centro durante il periodo di osservazione mensile per calcolare correttamente il profitto.

6 MODELLO COMPUTAZIONALE

Per la simulazione della rete dell'autolavaggio, è stato adottato l'approccio del **Next-Event Simulation**, che consiste nel far avanzare il tempo processando gli eventi successivi in ordine cronologico. In altre parole, si individua l'evento più imminente e si esegue l'azione associata ad esso, determinando così il cambiamento di stato del sistema e l'aggiornamento dei tempi.

La simulazione è stata implementata utilizzando il linguaggio di programmazione **Python**, sfruttando la libreria <https://github.com/pdsteele/DES-Python>.

6.1 STRUTTURE DATI (CLASSI)

6.1.1 Clock di sistema

```
class time:
    def __init__(self):
        self.current = 0.0          # current time          */
        self.next = 0.0            # next (most imminent) event time */
        self.last = [0.0] * NUM_BLOCKS # last arrival time      */

    def __str__(self):
        return f"Time: current={self.current}, next={self.next}, last={self.last}"
```

La classe utilizzata per rappresentare il clock di sistema è definita come *time* ed è composta da diversi attributi:

- *current* rappresenta il tempo corrente del sistema e indica l'istante in cui si sta processando un evento (ad esempio, un arrivo o un completamento)

- *next* mantiene il clock del prossimo evento da processare
- *last* tiene traccia dell'istante dell'ultimo arrivo

6.1.2 State Variable

```
class StateVariables: # rappresenta il singolo blocco / centro
    def __init__(self, number_in_center, server_state):
        self.number_in_center = number_in_center # popolazione totale nel centro
        self.server_state = server_state # stato di ogni server: idle (0) o busy (1), è un array di server

    def __str__(self):
        return f"StateVariables: number_in_center={self.number_in_center}, server_state={self.server_state}"
```

La classe *StateVariables* rappresenta un singolo blocco o centro nel sistema di simulazione. Ha due attributi:

- ***number_in_center***: rappresenta la popolazione totale presente nel centro. Indica il numero di utenti (auto) presenti nel centro in un dato istante.
- ***server_state***: rappresenta lo stato di ogni server nel centro. È un array di valori che indicano se un server è libero (idle) o occupato (busy). Ogni posizione nell'array corrisponde a uno specifico server nel centro. Se il valore associato a una posizione è 0, significa che il server è libero e può gestire un nuovo cliente. Se il valore è 1, significa che il server è occupato e sta già servendo un cliente.

In sintesi, la classe *StateVariables* contiene le variabili di stato associate a un singolo blocco o centro della simulazione, inclusi il numero di entità presenti nel centro e lo stato di occupazione dei server.

6.1.3 Classe eventi (Calendar)

```
class Calendar:
    def __init__(self):
        # lavaggio a mano
        self.newCar_arrivalTime_handWash = 0.0 # tempo arrivo car_new al blocco 1
        self.oldCar_arrivalTime_handWash = 0.0 # tempo arrivo car_old al blocco 1
        self.completions_handWash = None # array formato dal numero di server del blocco 1, ognuno avrà il num completam
        self.head_handWash = None # tipo dato Job
        self.tail_handWash = None # tipo dato Job
        # lavaggio con rulli
        self.oldCar_arrivalTime_touchless = 0.0 # tempo arrivo car_old al blocco 2 (al blocco 2 arriva solo old_car)
        self.completions_touchless = None
        self.head_touchless = None
        self.tail_touchless = None
        # lucidatura
        self.newCar_arrivalTime_polishing = 0.0
        self.oldCar_arrivalTime_polishing = 0.0
        self.completions_polishing = None
        # lavaggio interni
        self.newCar_arrivalTime_interiorWash = 0.0
        self.oldCar_arrivalTime_interiorWash = 0.0
        self.completions_interiorWash = None
        self.changeInterval = 0.0
        self.sampling = 0.0
```

Tale classe contiene gli eventi del sistema, come gli arrivi, i completamenti e gli abbandoni nei vari centri.

6.1.4 Arrivi e completamenti

Sia gli arrivi dall'esterno che i completamenti sono generati tramite la funzione **Exponential()** presente dalla libreria *rvgs.py*:

```
def Exponential(m):  
    # =====  
    # Returns an exponentially distributed positive real number.  
    # NOTE: use m > 0.0  
    # =====  
    #  
    return (-m * log(1.0 - random()))
```

Si genera il primo tempo di arrivo tramite **GetArrival()** che utilizza la funzione *Exponential()* di *rvgs.py*, distinguendo l'arrivo di una macchina nuova e di una vecchia. A seconda del tipo di arrivo (macchina nuova sul lavaggio a mano, macchina vecchia sul lavaggio a mano, macchina vecchia sul lavaggio con rulli), tale arrivo verrà gestito o dal centro 0 o dal centro 1.

Successivamente si verifica se nel blocco corrispondente c'è un servente libero, e, in caso affermativo, si genera un servizio esponenziale per il completamento tramite **GetService()**.

```
def getNewCarArrivalHandWash(arrival, interTime):  
    # global interTime  
    selectStream(0) # rvgs.py  
    arrival += Exponential(interTime / P_NEW)  
    #print("Exponential(interTime / P_NEW) == ", Exponential(interTime / P_NEW))  
    return arrival  
  
def getOldCarArrivalHandWash(arrival, interTime):  
    selectStream(1) # rvgs.py  
    arrival += Exponential(interTime / P_OLD_H)  
    #print("Exponential(interTime / P_OLD_H) == ", Exponential(interTime / P_OLD_H))  
    return arrival  
  
def getOldCarArrivalTouchless(arrival, interTime):  
    selectStream(2) # rvgs.py  
    arrival += Exponential(interTime / P_OLD_T)  
    #print("Exponential(interTime / P_OLD_T) == ", Exponential(interTime / P_OLD_T))  
    return arrival
```

```
def GetServiceHandWash(start):  
    selectStream(3)  
    return start + Exponential(SERVICE_TIME_HANDWASH)  
  
def GetServiceTouchless(start):  
    selectStream(4)  
    return start + Exponential(SERVICE_TIME_TOUCHLESS)  
  
def GetServicePolishing(start):  
    selectStream(5)  
    return start + Exponential(SERVICE_TIME_POLISHING)  
  
def GetServiceInteriorWash(start):  
    selectStream(6)  
    return start + Exponential(SERVICE_TIME_INTERIORWASH)
```

6.1.5 Cambio di fascia oraria

Nell'implementazione del cambio di fasce orarie, sono state introdotte delle considerazioni specifiche per gestire lo stato dei serventi in modo accurato. Durante la transizione da una fascia oraria all'altra, è necessario tenere conto dello stato attuale dei serventi che potrebbero essere disabilitati.

In particolare, se un servente sta servendo un'automobile e nella nuova fascia oraria non sarà più attivo, il servente deve terminare il servizio dell'automobile corrente prima di disattivarsi. Per poter distinguere tra un'automobile nuova da una vecchia, a livello implementativo questo è stato modellato assegnando al valore corrispondente nell'array `server_state` il valore, rispettivamente, di -2 e -1 .

Se invece un servente è inattivo durante il cambio di fascia oraria, non è necessario terminare alcun servizio.

Durante il cambio di fascia oraria, la funzione `ServerConfigurationBetweenTimeSlot()` viene utilizzata per confrontare la configurazione attuale con quella della nuova fascia. Per ogni blocco o centro, vengono attivati o disattivati il numero appropriato di serventi. Se un servente è attualmente in servizio quando viene scelto per la disattivazione, verrà aspettato che completi il servizio corrente prima di essere effettivamente disattivato in un secondo momento, poiché non è conveniente né realistico spegnere immediatamente uno sportello attivo. Ciò evita di interrompere in modo improvviso un servente già impegnato e consente di utilizzare in modo efficiente il lavoro già svolto.

Questa implementazione permette di gestire efficacemente il cambio di fascia oraria nel sistema di simulazione, garantendo che i serventi siano attivati o disattivati in modo appropriato, tenendo conto dello stato attuale dei servizi in corso e massimizzando l'efficienza complessiva del sistema.

7 VERIFICA

Durante la fase di verifica, l'obiettivo è controllare la coerenza dei risultati ottenuti dalla simulazione e confrontarli con i valori teorici previsti dal modello di specifica. In altre parole, si desidera verificare che il modello computazionale è effettivamente conforme al modello di specifica, quindi che l'implementazione del modello computazionale sia effettivamente corretta.

Il modello analitico, che non tiene conto delle perdite, assume che tutti i clienti che arrivano ai centri vengano serviti senza problemi. Tuttavia, nella realtà, quando il numero di clienti supera la capacità dei serventi disponibili, possono verificarsi delle perdite, ovvero alcuni clienti potrebbero non essere in grado di essere serviti e lasciare il centro senza aver effettuato il lavaggio.

Per questo motivo nel processo di verifica è stata studiata la configurazione dei serventi {10, 7, 1, 2} durante la prima fascia oraria, la quale garantisce l'assenza di perdite nei primi due centri, mantenendo così la conformità tra il modello analitico e la simulazione.

7.1 CENTRO 0: LAVAGGIO A MANO

Gli intervalli di confidenza prodotti dalle simulazioni sono riportati nella seguente tabella:

Intervalli di confidenza per il centro LAVAGGIO A MANO (M/M/10) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.3088594436 +/- 0.0031972962
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0005967830 +/- 0.0001667200
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	3.0891912190 +/- 0.0319752696
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.3476406315 +/- 0.0984065870
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	1799.3476406315 +/- 13.2669145942
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

I risultati ottenuti utilizzando i modelli analitici sono riportati nella seguente tabella:

Risultati ottenuti per il centro LAVAGGIO A MANO (M/M/10) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.309
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0006439069
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	3.0906439069
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.3750914087 s
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	1800.3750914087
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

7.2 CENTRO 1: LAVAGGIO CON RULLI

Gli intervalli di confidenza prodotti dalle simulazioni sono riportati nella seguente tabella:

Intervalli di confidenza per il centro LAVAGGIO CON RULLI (M/M/7) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.2121690002 +/- 0.0024706982
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0002144408 +/- 0.0001351686
Popolazione media nel centro $E(N_s)$	1.4853974422 +/- 0.0173063190
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0870268558 +/- 0.0552922851
Tempo medio di risposta $E(T_s)$	600.5642693734 +/- 4.2916096390
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

I risultati ottenuti utilizzando i modelli analitici sono riportati nella seguente tabella:

Risultati ottenuti per il centro LAVAGGIO CON RULLI (M/M/7) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.21
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0002276822
Popolazione media nel centro $E(N_s)$	1.4702276822
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0929315414
Tempo medio di risposta $E(T_s)$	600.0929315414
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

7.3 CENTRO 2: LUCIDATURA

Gli intervalli di confidenza prodotti dalle simulazioni sono riportati nella seguente tabella:

Intervalli di confidenza per il centro LUCIDATURA (M/M/1) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.5001079809 +/- 0.0045177620
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.4971878351 +/- 0.0215052281
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	0.9972958161 +/- 0.0247857741
Tempo medio di servizio $E(S)$	119.4649516934 +/- 0.8278520384
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	118.5879550387 +/- 4.8086073860
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	238.0529067322 +/- 5.2866250331
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

I risultati ottenuti utilizzando i modelli analitici sono riportati nella seguente tabella:

Risultati ottenuti per il centro LUCIDATURA (M/M/1) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.5
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.5
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	1
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	120 s
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	240 s
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

7.4 CENTRO 3: LAVAGGIO INTERNI

Gli intervalli di confidenza prodotti dalle simulazioni sono riportati nella seguente tabella:

Intervalli di confidenza per il centro LAVAGGIO INTERNI (M/M/2) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.49462228370 +/- 0.0031056871
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0 +/- 0.0
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	0.9892445674 +/- 0.0062113743
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0 +/- 0.0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	300.2996128893 +/- 2.1785475785
Numero arrivi	1024.0 +/- 0.0
Numero abbandoni	77.79564307456 +/- 3.3270016483
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.07597230769 +/- 0.0032490250

I risultati ottenuti utilizzando i modelli analitici sono riportati nella seguente tabella:

Risultati ottenuti per il centro LUCIDATURA (M/M/1) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.5
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	1
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0 s
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	300 s
Numero arrivi	1024
Numero abbandoni	78.7692307456
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0769230769

7.5 CONTROLLI DI CONSISTENZA

Per ogni centro, sono state controllate le seguenti metriche.

7.5.1 Tempi di risposta medi nei centri

Uno dei controlli di consistenza è stato eseguito sui tempi di risposta nei centri. È stato verificato che il tempo medio di risposta del centro sia consistente con la somma del tempo medio di attesa nella coda $E(T_Q)$ e il tempo medio di servizio $E(S)$:

$$E(T_S) = E(T_Q) + E(S)$$

La condizione è verificata per ogni blocco, come si evince dalle tabelle precedenti.

7.5.2 Popolazioni medie nei centri

Un altro controllo di consistenza è stato effettuato sul numero medio di job presenti nel centro. È stato verificato che il numero medio di job nel centro $E(N_S)$ sia consistente con la somma del numero medio di job nella coda $E(N_Q)$ e $m * \rho$:

$$E(N_S) = E(N_Q) + m\rho$$

7.5.3 Probabilità di perdita

$$\text{probabilità di perdita del centro lavaggio interni} = \frac{\text{numero abbandoni}}{\text{numero arrivi}}$$

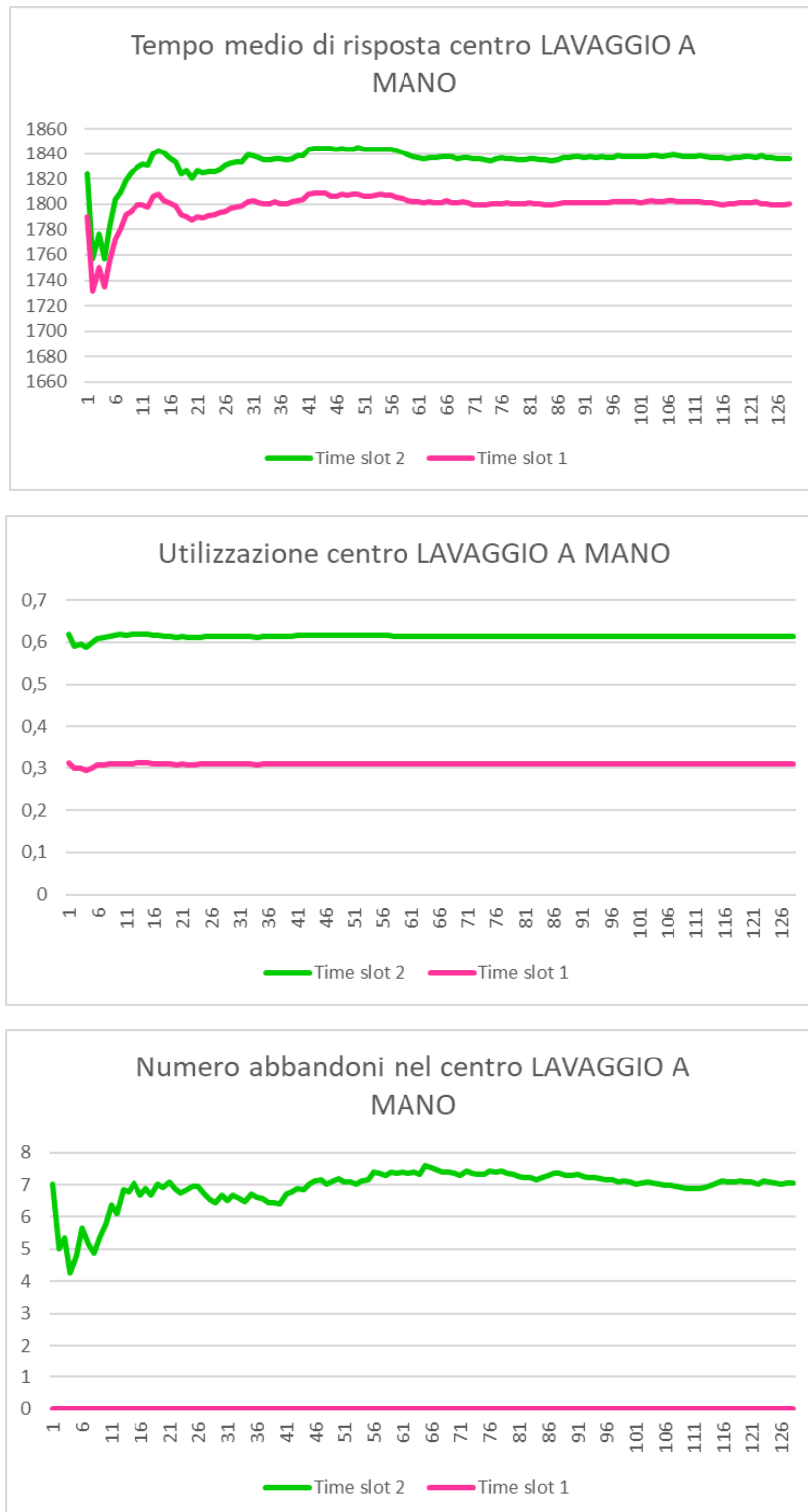
8 VALIDAZIONE

Poiché il sistema in analisi è ipotetico e non ha un modello reale di riferimento specifico, la validazione è stata condotta mediante l'analisi del comportamento del modello in diverse fasce orarie. Data l'assenza di dati reali con cui confrontare i risultati del modello computazionale, è stato adottato un approccio basato sulla variazione dei tassi di arrivo.

Sono state eseguite simulazioni utilizzando la stessa configurazione di serventi **{10, 7, 1, 2}** e sono state analizzate le prestazioni del sistema durante la seconda oraria. Si è ipotizzato che in fasce orarie più affollate, le prestazioni del sistema peggiorino, mentre in fasce orarie meno affollate migliorino.

Durante le simulazioni, sono state monitorate diverse metriche di prestazione, tra cui i tempi di risposta nei centri, l'utilizzazione e il numero medio di abbandoni per centro.

I grafici di queste 3 metriche di prestazione, relative al centro LAVAGGIO A MANO, nelle due fasce orarie, sono mostrate di seguito. Da tali grafici si può osservare che nella seconda fascia oraria le prestazioni degradano notevolmente, in quanto tale fascia è caratterizzata da un tasso di arrivi maggiore rispetto alla fascia precedente.



Successivamente si analizzano le prestazioni globali del sistema al variare delle due fasce orarie, e , anche in questo caso, si osserva come le prestazioni nella seconda fascia oraria peggiorino notevolmente.

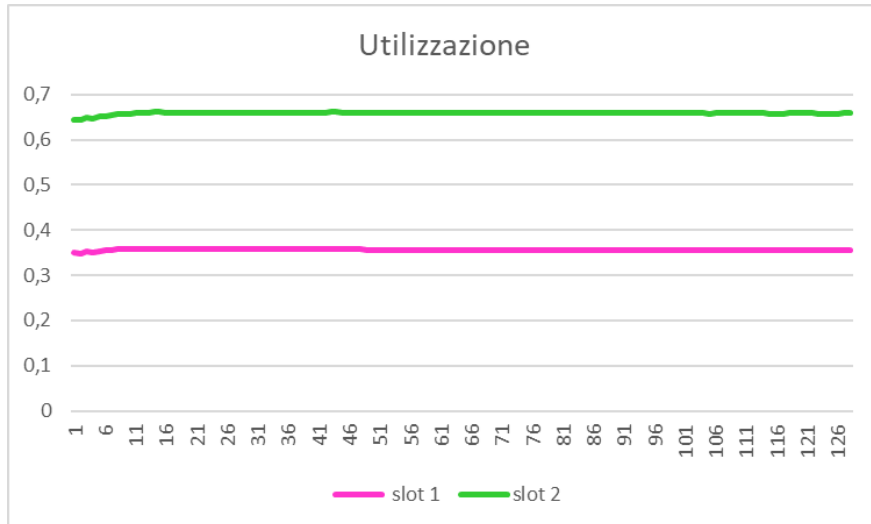


Figura 3: Utilizzazione globale del sistema al variare delle fasce orarie per la configurazione {10, 7, 1, 2}.

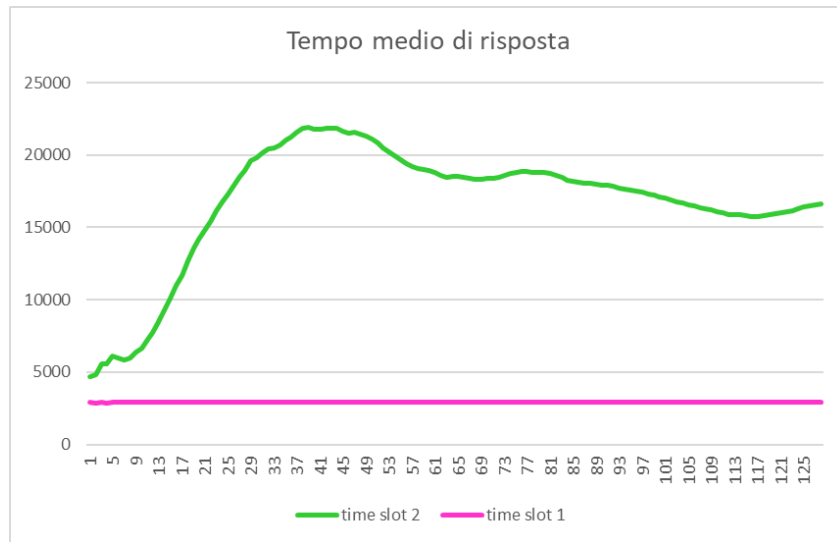


Figura 4: Tempo medio di risposta del sistema al variare delle fasce orarie, per la configurazione {10, 7, 1, 2}

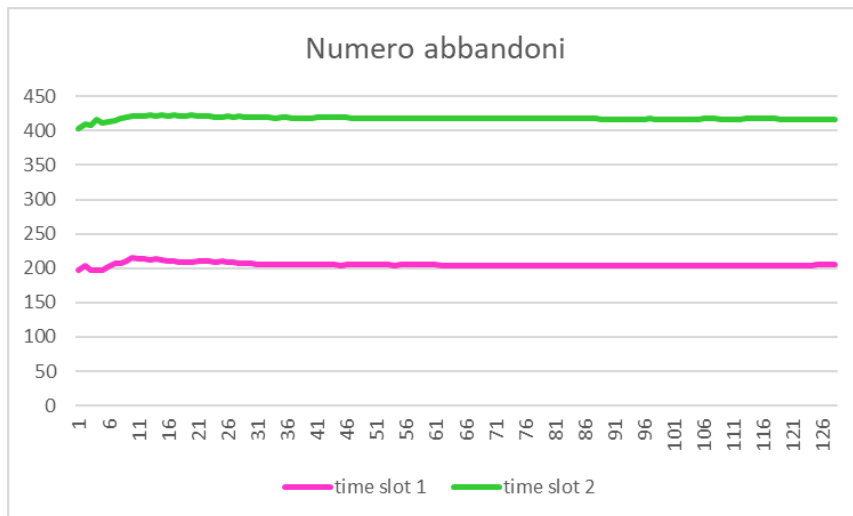


Figura 5: Numero totale di abbandoni nel sistema al variare delle fasce orarie, per la configurazione {10, 7, 1, 2}

I risultati delle simulazioni hanno confermato le aspettative: durante le fasce orarie più affollate, si è osservato un aumento dei tempi di risposta nei centri e un incremento del numero abbandoni. Al contrario, durante le fasce orarie meno affollate, si sono registrati tempi di risposta più ridotti e una minor utilizzazione.

9 ESECUZIONE DEGLI ESPERIMENTI E ANALISI DEI RISULTATI

Nella simulazione del sistema sono state testate diverse configurazioni di server per le diverse fasce orarie, al fine di valutare come queste configurazioni influenzino le prestazioni complessive del sistema. Sono state definite diverse configurazioni che combinano un numero variabile di server per ogni fase oraria, in modo da testare, ad esempio, configurazioni con un maggior numero di server durante le fasce orarie più affollate e un minor numero durante le fasce orarie meno affollate.

Le simulazioni sono state eseguite sia ad **orizzonte finito** che **infinito** per analizzare il comportamento del sistema in diverse condizioni. L'orizzonte finito rappresenta un periodo di tempo specifico, come ad esempio un'intera giornata di attività dell'autolavaggio. L'orizzonte infinito, invece, rappresenta un periodo di tempo illimitato, consentendo di osservare il comportamento stabile del sistema. Le simulazioni ad orizzonte finito ci hanno fornito una visione delle prestazioni del sistema in un contesto temporale limitato, mentre le simulazioni ad orizzonte infinito ci hanno permesso di valutare le prestazioni nel lungo termine.

Attraverso il confronto dei risultati delle simulazioni, siamo stati in grado di identificare le configurazioni di server che ottimizzano le prestazioni del sistema. In particolare, abbiamo individuato le combinazioni di server che massimizzano il profitto e riducono i tempi di attesa durante le fasce orarie più affollate. Queste informazioni sono state utili per sviluppare una strategia ottimale per la gestione delle risorse nel sistema.

9.1 SIMULAZIONE A ORIZZONTE INFINITO

La simulazione ad orizzonte infinito è una tecnica utilizzata per ottenere statistiche a stato stazionario del sistema. In questa simulazione, il sistema viene eseguito per un tempo di simulazione teoricamente "infinito", molto più lungo rispetto al tempo reale, che ha consentito di osservare il comportamento del sistema in uno stato stazionario, in cui le prestazioni si stabilizzano nel tempo.

Durante la simulazione ad orizzonte infinito, il tasso di arrivo è stato mantenuto costante per ogni fase del sistema, assumendo che il flusso di arrivi sia stabile nel lungo termine.

Per calcolare la media campionaria del tempo di risposta è stato utilizzato il metodo delle **Batch Means**. La run di simulazione è stata divisa in k batch di dimensione b specifica, e da ciascun batch sono state estratte le statistiche per il calcolo della media campionaria. È stata prestata attenzione alla scelta delle dimensioni dei batch per garantire una buona rappresentatività del campione e ridurre l'autocorrelazione tra le osservazioni. Le dimensioni b e k , infatti, influenzano la qualità del campione.

Seguendo le linee guida proposte da Banks, Carson, Nelson e Nicol, i valori di k e b scelti sono stati:

- **$k = 128$**
- **$b = 1024$**

Da ogni batch, tramite il metodo **BatchMean()**, si ricavano le statistiche di interesse, e si scrivono all'interno di un file .csv (uno per ogni centro).

Nella simulazione ad orizzonte infinito sono stati progettati una serie di esperimenti per identificare la configurazione ottimale per ogni fascia oraria e per ogni centro, al fine di garantire il rispetto dei requisiti di qualità di servizio (QoS) definiti all'inizio dello studio. Questa configurazione ottimale rappresenta un punto di partenza significativo per le simulazioni ad orizzonte finito, che mirano a valutare le prestazioni complessive del sistema durante l'intera giornata di attività. Nelle simulazioni a orizzonte finito, verranno considerati i flussi di arrivo e i tempi di servizio realistici per l'intera giornata, consentendo una valutazione più accurata delle prestazioni e della redditività del sistema nel lungo termine.

L'utilizzo dei risultati della simulazione a orizzonte infinito come base per le simulazioni a orizzonte finito ci permette di ottimizzare il sistema e di prendere decisioni informate per migliorare l'efficienza, ridurre i tempi di attesa e massimizzare i profitti complessivi dell'autolavaggio.

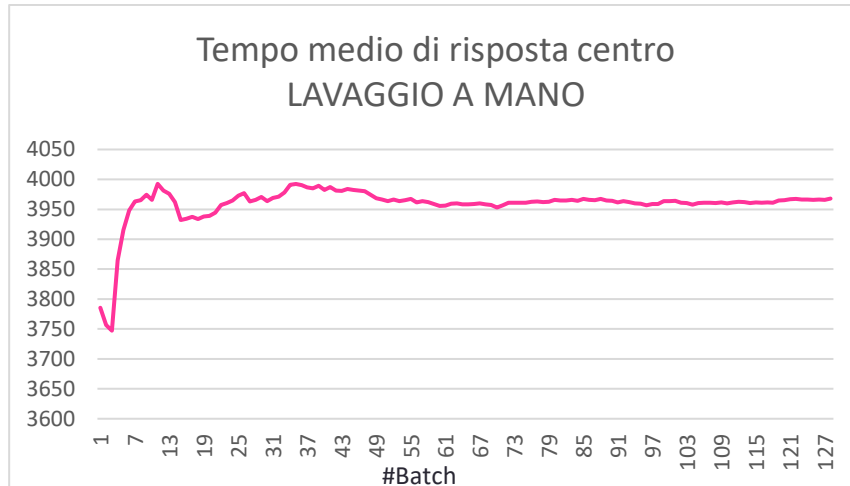
Nel contesto della simulazione ad orizzonte infinito, il nostro studio si è focalizzato su tre obiettivi principali:

1. Analisi dei tempi di risposta a stato stazionario.
2. Analisi della probabilità di abbandono nel centro di lavaggio interni: uno degli aspetti critici del sistema è l'eventuale abbandono da parte degli utenti che desiderano effettuare il lavaggio interni dell'auto. È stata quindi studiata la probabilità di abbandono, ovvero la probabilità che un utente lasci il centro senza lavare gli interni a causa di tempi di attesa eccessivi. Questo ha aiutato a valutare l'affidabilità del servizio e a identificare eventuali aree di miglioramento.
3. Ricerca della configurazione ottima per rispettare i QoS e massimizzare i profitti: si è cercato di determinare la configurazione ottimale del sistema per ogni fascia oraria, in modo da garantire che i tempi di attesa, i tempi di risposta e la disponibilità del servizio rispettino gli obiettivi di qualità del servizio (QoS) prefissati. Allo stesso tempo, sono stati considerati anche gli aspetti legati ai costi, come il numero di serventi e i costi di manutenzione delle attrezzature, al fine di massimizzare i profitti complessivi del sistema.

9.1.1 Fascia oraria 08:30 – 13:00

Configurazione {2,2,1,3}.

La prima configurazione di server che è stata analizzata è {2,2,1,3}.



Dal grafico in alto si può osservare come già il tempo di servizio all'interno di questo centro è nettamente superiore al massimo desiderato. Il tempo medio di risposta infatti è **3967.698920218321 +/- 40.41866833399358**, nettamente superiore ai 45 minuti (2700 secondi) desiderati. Nonostante ciò, possiamo osservare che il tempo di risposta, all'aumentare dei batch, tende a stabilizzarsi intorno al valore medio.

Per quanto riguarda i tempi di attesa:

Tempo medio di attesa-centro-1 ----- **2164.0628083791657** +/- 28.47833364669799
Tempo medio di attesa-centro-2 ----- **397.0457445441957** +/- 8.631169255803176
Tempo medio di attesa-centro-3 ----- 78.97828019338142 +/- 1.9542686516701662
Tempo medio di attesa-centro-4 ----- 0.0 +/- 0.0

Osserviamo che il centro 1 presenta un tempo di attesa nettamente inferiore rispetto al centro 0, ma comunque non abbastanza piccolo da garantire il requisito di qualità desiderato.

Le utilizzazioni dei vari centri sono:

Utilizzazione centro-1 ----- **0.9545884820972793** +/- 0.00200679795944081
Utilizzazione centro-2 ----- 0.7048297458166377 +/- 0.0040208232210322435
Utilizzazione centro-3 ----- 0.4086474089640151 +/- 0.002785406737517688
Utilizzazione centro-4 ----- 0.2623415194435658 +/- 0.0016325627037961131

Si può osservare come l'utilizzazione del centro 1, ossia quello relativo al lavaggio a mano, tende quasi ad 1, con un tempo di risposta nettamente superiore alla soglia desiderata. Si evince che bisogna aumentare il numero di serventi nel centro 2 e nel centro 1, stando però attenti a non eccedere troppo con i costi.

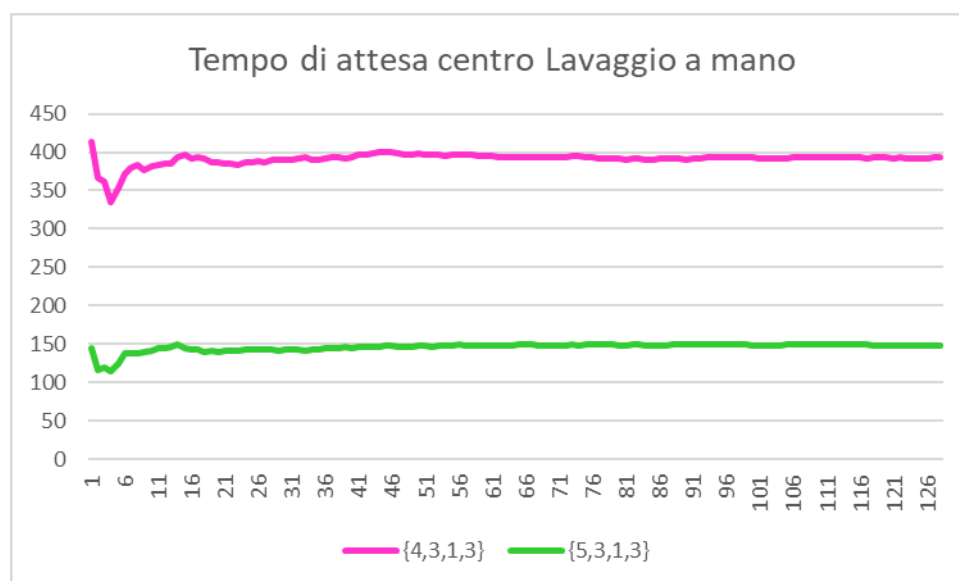
Configurazione {4,3,1,3} vs {4,2,1,3}

Statistiche	{4,3,1,3}	{5,3,1,3}
Utilizzazione centro lavaggio a mano	0.7248185309 +/- 0.0058350564	0.6059388842 +/- 0.0053953831
Tempo medio di risposta auto che ha effettuato lavaggio a mano	2724.3538304065 +/- 24.5637063904 (*)	2478.476892812 +/- 18.5468970784
Tempo medio di attesa centro lavaggio a mano	392.9192711288 +/- 11.9721721986 (*)	148.4863416859 +/- 6.8099948452
Tempo medio di attesa centro lavaggio con rulli	79.6129657690 +/- 4.050768052	
Probabilità di abbandono del centro lavaggio interni	0.0594863891 +/- 0.0022093052	
Costo	52200 €	54560 €

Nell'analisi della configurazione {4,3,1,3}, si osserva che sia il requisito di qualità del servizio relativo al tempo di attesa medio, sia quello relativo al tempo di risposta non sono soddisfatti (*). In particolare, sebbene il centro 2 (Lavaggio con rulli) rispetti il requisito sul tempo di attesa, tale requisito non è stato soddisfatto dal centro 1 (Lavaggio a mano). Di conseguenza, abbiamo preso la decisione di aumentare il numero di serventi in tale centro per migliorare le prestazioni.

Si osserva che tale aumento ha comportato un aumento dei costi di gestione, seppur non significativo.

Con la nuova configurazione {5,3,1,3}, abbiamo osservato che, nonostante il leggero aumento dei costi, siamo riusciti a garantire il soddisfacimento di tutti e tre i requisiti di qualità del servizio (QoS).



Procediamo ora con una riduzione del numero di serventi nel centro Lavaggio interni, al fine di valutare se è possibile ottenere una riduzione dei costi mantenendo comunque il soddisfacimento dei requisiti di qualità del servizio (QoS).

Attraverso questa analisi, verificheremo se è possibile ottimizzare l'allocazione delle risorse, riducendo il personale impiegato nel centro Lavaggio interni senza compromettere la qualità del servizio offerto agli utenti. L'obiettivo è trovare un equilibrio tra i costi operativi e l'efficienza del sistema, mantenendo comunque un tempo di attesa accettabile per i clienti e garantendo che almeno l'80% delle auto che desiderano effettuare il lavaggio interni trovi il macchinario libero.

Configurazione {5,3,1,3} vs {5,3,1,2}

Statistiche	{5,3,1,3}	{5,3,1,2}
Utilizzazione centro lavaggio a mano	0.6059388842 +/- 0.0053953831	
Tempo medio di risposta auto che ha effettuato lavaggio a mano	2478.476892812 +/- 18.5468970784	2480.476892812 +/- 18.5468970784
Tempo medio di attesa centro lavaggio a mano	148.4863416859 +/- 6.8099948452	
Tempo medio di attesa centro lavaggio con rulli	79.6129657690 +/- 4.050768052	
Probabilità di abbandono del centro lavaggio interni	0.0594863891 +/- 0.0022093052	0.19718170166015625 +/- 0.0033302873490697387
Costo	54560 €	54260 €

Dopo un'ulteriore analisi, si è notato che è possibile ottenere una configurazione ancora più ottimale per la fascia oraria considerata. Rimuovendo un servente nel centro 4 (Lavaggio interni), abbiamo constatato che tutti i requisiti di qualità del servizio (QoS) vengono soddisfatti e si ottiene anche una riduzione dei costi. Di conseguenza, questa configurazione sembra essere la migliore per garantire prestazioni ottimali e massimizzare l'efficienza economica durante tale fascia oraria.

Successivamente, sono stati eseguiti ulteriori esperimenti cercando di ridurre ulteriormente il numero di serventi nel centro 4 (Lavaggio interni). Tuttavia, i risultati hanno mostrato che questa riduzione ha comportato un aumento significativo della probabilità di abbandono nel centro, che è risultata essere 0.4972305297 +/- 0.002768023. Questo valore ha superato la soglia desiderata per il QoS, violando quindi i requisiti di qualità del servizio previsti. Pertanto, questa configurazione non è adatta per garantire la qualità del servizio richiesta.

Si conclude quindi che **{5, 3, 1, 2}** è la configurazione ottima per la prima fascia oraria.

9.1.2 Fascia oraria 14:30 – 19:00

Configurazione {5,3,1,2}

Per la seconda fascia oraria, che presenta un tasso di arrivi maggiore rispetto alla prima fascia oraria, si è osservato che la configurazione ottimale per i centri 2 (Lavaggio con rulli) e 4 (Lavaggio interni), ossia {5,3,1,2}, deve mantenere lo stesso numero di serventi definito nella prima fascia oraria. Questo perché il numero di serventi nei centri 2 e 4 è determinato dalle attrezzature e macchinari disponibili, i quali non possono essere facilmente modificati o adattati in base alla fascia oraria.

Le metriche prestazionali con tale configurazione sono:

Utilizzazione-centro-1 -----	0.9338646328741513 +/- 0.0034775860093079233
Utilizzazione-centro-2 -----	0.8709603541390329 +/- 0.005444230497974044
Utilizzazione-centro-3 -----	0.8295487014820176 +/- 0.008371819470753362
Utilizzazione-centro-4 -----	0.5500583591086807 +/- 0.003291221009949933

Tempo medio di attesa-centro-1 -----	767.0480342606911 +/- 18.508712815008344
Tempo medio di attesa-centro-2 -----	452.2304269569191 +/- 12.683512863686424

Tempo medio di risposta-centro-1 -----	2570.4998770711177 +/- 32.754041450613684
Tempo medio di risposta-centro-2 -----	1053.0515601861334 +/- 16.887741433668673
Tempo medio di risposta-centro-3 -----	639.1033336972995 +/- 41.7315592706073

Probabilità abbandono-centro-4 -----	0.33938598632812517 +/- 0.0039299582223420015
--------------------------------------	---

Si osserva che, con tale configurazione, nessuno dei tre QoS viene rispettato, per cui è necessario modificare il numero di serventi nei vari centri.

Configurazione {6,4,1,3} vs {7,4,1,3}

Statistiche	{6,4,1,3}	{7,4,1,2}
Utilizzazione centro lavaggio a mano	0.8811512784 +/- 0.0046257247	0.813361619963908 +/- 0.005826848147101758
Tempo medio di risposta auto che ha effettuato lavaggio a mano	3972.9405691685 +/- 24.7522549303 (*)	3889.735065988055 +/- 296.44911756371624 (*)
Tempo medio di attesa centro lavaggio a mano	470.617521469 +/- 12.8209038416 (*)	272.50374954048715 +/- 9.466937900255294

Tempo medio di attesa centro lavaggio con rulli	163.5127295506 +/- 6.8325508852	
Probabilità di abbandono del centro lavaggio interni	0.1869812011 +/- 0.003640937	0.196197509765625 +/- 0.00332225556584611
Costo		

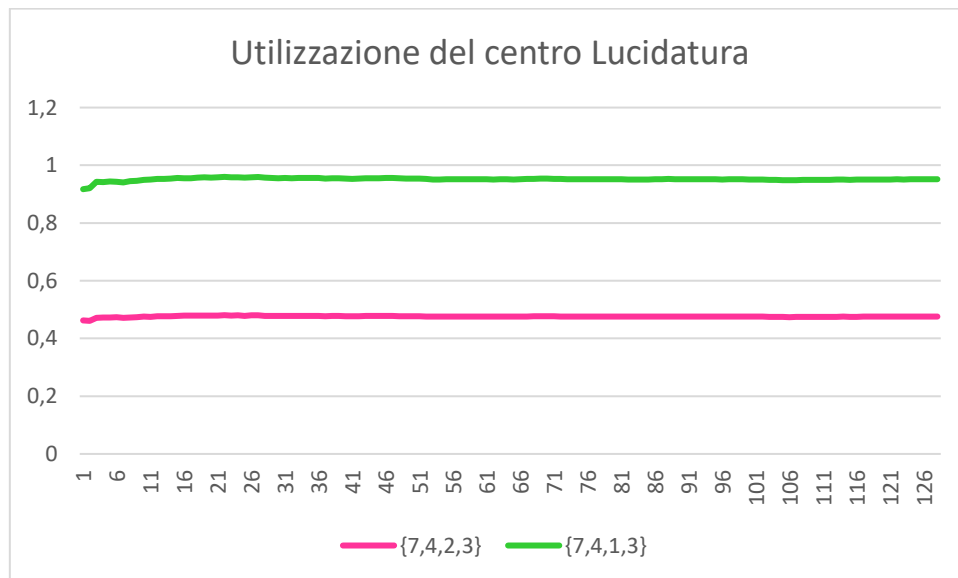
Figura 6: Confronto tra le configurazioni {6,4,1,3} e {7,4,1,3}. In grassetto i QoS rispettati, mentre con (*) i QoS violati.

Osserviamo che, con la configurazione {6,4,1,3}, vengono soddisfatti solo i QoS relativi al tempo di attesa del centro 2 e alla probabilità di abbandono del centro 4, mentre il centro 1 continua a non soddisfare nessuno dei due requisiti che lo coinvolgono.

Osserviamo che non viene rispettato il requisito sul tempo di risposta per un'auto che è entrata nel sistema dal lavaggio a mano. Osservando le prestazioni per i vari centri nella configurazione {7,4,1,3}, si osserva che il centro 3 ha un'utilizzazione di 0.95 e un tempo medio di risposta di 2072.735065988 +/- 296.449117563. Si cerca quindi di migliorare le prestazioni di tale centro, provando ad aumentare il numero di server.

Configurazione {7,4,2,3}

Grazie alla configurazione **{7,4,2,3}**, si riesce ad ottenere un tempo di servizio globale per gli utenti che fanno il lavaggio a mano di 2525.5982376446 +/- 2.2356998047880428, e un'utilizzazione del centro 3 pari a 0.4759534137056103 +/- 0.004531912670958768, mentre prima era 0.951725300727813 +/- 0.008138343518118063. In questo modo, si soddisfano tutti e 3 i QoS. Con tale configurazione, il costo è di **4740€**.



Successivamente, è stato eseguito un ulteriore tentativo di riduzione del numero di server negli altri centri, mantenendo comunque un numero di server per i centri 2 (Lavaggio con rulli) e 4 (Lavaggio interni) pari o superiore rispetto alla configurazione migliore identificata nella fascia oraria precedente, con l'obiettivo di ottenere una riduzione dei costi senza compromettere i QoS desiderati. Tuttavia, durante questa fase di esperimenti, si è osservato che tale riduzione dei server ha portato alla violazione dei QoS definiti. Ciò indica che la configurazione ottimalmente precedentemente identificata rappresenta un punto di equilibrio tra il numero di server necessari per garantire i QoS e i costi di gestione del sistema.

La configurazione migliore per la seconda fascia oraria è quindi **{7,4,2,3}**.

9.1.3 Conclusioni

Alla luce dei risultati ottenuti attraverso la simulazione a orizzonte infinito e considerando esclusivamente i requisiti QoS prefissati, nonché tenendo conto del fatto che il numero di macchinari è costante per l'intera giornata, sono state identificate le seguenti configurazioni minime per le diverse fasce orarie...

- 08:30 – 13:00 → {5,4,1,3}
- 14:30 – 19:00 → {7,4,2,3}

9.2 SIMULAZIONE A ORIZZONTE FINITO

La simulazione ad orizzonte finito è stata condotta per una durata di 9 ore, corrispondenti alle ore lavorative. Durante questa simulazione, abbiamo tenuto conto delle variazioni nel flusso di arrivi nelle diverse fasce orarie e della riorganizzazione del numero di serventi attivi per ogni centro. Questo approccio ci ha permesso di massimizzare il profitto dell'autolavaggio, considerando come punto di partenza le configurazioni ottenute dalle simulazioni a orizzonte infinito. L'obiettivo di tale simulazione è infatti analizzare i costi reali sull'arco di un'intera giornata.

Al fine di condurre un'analisi statistica dei risultati ottenuti nella simulazione a orizzonte finito, il processo di misurazione è stato replicato 128 volte (metodo delle **Replicazioni**), generando così un insieme di dati composto da 128 punti. Ogni replica è stata utilizzata per misurare le stesse statistiche, fornendo un punto nel nostro campione.

Per calcolare la media campionaria e l'intervallo di confidenza al 95%, è stato utilizzato il programma *rvms.py*, che fa uso della distribuzione **Student**.

La simulazione termina quando viene raggiunto l'orario di chiusura (19:00), corrispondente a 32400 secondi (= 9 ore).

Dopo aver ottenuto le configurazioni ottimali dalle simulazioni a orizzonte infinito, sono state eseguite le simulazioni a orizzonte finito per valutare i risultati in termini di QoS e profitto mensile. I risultati ottenuti dimostrano che le configurazioni identificate rispettano i requisiti di QoS e consentono di massimizzare il profitto mensile, che è pari a **639.260€**.

Successivamente, sono stati effettuati ulteriori esperimenti per ottimizzare il sistema, cercando di ridurre le perdite mantenendo comunque soddisfatti i QoS richiesti. In particolare, ci si è focalizzati sulla fascia oraria con maggior traffico, ossia la seconda, aumentando il numero di serventi nei centri più affollati. Si è seguita una strategia graduale, aumentando prima il numero di serventi nel centro più critico e successivamente nel centro successivo, con l'obiettivo di massimizzare il profitto senza compromettere i QoS.

Successivamente, poiché i primi due centri sono quelli che comportano le perdite, si è provato a aumentare il numero di serventi in questi due centri per diminuire le perdite pur mantenendo soddisfatti i QoS richiesti. Si è iniziato dal time slot 2, in quanto è quello che ha un tasso di arrivo maggiore.

Cambiando le varie configurazioni, una volta osservato che il guadagno ha iniziato a ridursi e non riuscendo più a farlo aumentare, si è passato al primo time slot.

Poiché non c'è una grande differenza del numero di utenti che arrivano a uno dei due blocchi, si è preferito iniziare ad aumentare i serventi nel blocco 1, in quanto è quello che comporta meno costi di manutenzione e stipendi per gli addetti, mentre il costo di un singolo servente del blocco 2 è nettamente superiore rispetto al costo di un singolo addetto nel blocco 1.

Si è osservato che non conviene aumentare ulteriormente i server del blocco 2, in quanto il costo mensile di tali macchinari provoca una netta diminuzione del profitto mensile. Aumentando però il numero di serventi nel blocco 1 siamo riusciti a diminuire il numero di perdite di tale blocco, e, poiché il profitto di un singolo lavaggio a mano (blocco 1) è nettamente superiore rispetto al profitto di un singolo lavaggio con rulli (blocco 2), si è riuscito a bilanciare il costo dei singoli rulli con il guadagno dei singoli lavaggi a mano.

10 CONCLUSIONI

Le configurazioni che consentono di massimizzare il profitto, infine, sono:

- **Fascia 1:**{5,6,1,10}
- **Fascia 2:** {7,6,4,10}

Le quali consentono un guadagno mensile di **641.250,14€**.

Queste configurazioni consentono di avere il profitto maggiore, minori perdite e consentono di soddisfare tutti i QoS prefissati.

Con le configurazioni sopra descritte, vengono riportate le misure di prestazione calcolate con la simulazione a orizzonte finito per il centro 1, ossia il lavaggio a mano, in quanto è quello che ha dato più problemi nelle varie simulazioni.

Possiamo vedere, ad esempio, nel grafico di seguito che la probabilità di perdita nel blocco LAVAGGIO INTERNI è inferiore allo 0.2 che ci eravamo prefissati, anche se tende ad aumentare nel secondo time slot, caratterizzato da un tasso di arrivo maggiore.

