

GESTIONE DI UN AUTOLAVAGGIO

Progetto di modellistica, simulazione e valutazione delle prestazioni



Martina De Maio, 0296447

A.A. 2022/2023

SOMMARIO

1	Introduzione	3
2	Obiettivi	5
3	Modello concettuale.....	6
3.1	Variabili di stato.....	8
3.2	Fasce orarie	8
3.3	Eventi.....	8
4	Modello di specifiche.....	9
4.1	Dati di input	9
4.2	Probabilità di routing.....	10
4.3	Costi e profitto del sistema	12
5	Modello computazionale.....	12
5.1	Strutture dati (classi Python).....	13
5.1.1	Clock di sistema	13
5.1.2	Stato del sistema	13

5.1.3	Classe eventi (Calendar)	14
5.1.4	Arrivi e completamenti	16
5.1.5	Cambio di fascia oraria	19
6	Verifica	19
6.1	Centro 1: Lavaggio a mano	20
6.2	Centro 2: Lavaggio con rulli	21
6.3	Centro 3: Lucidatura	22
6.4	Centro 4: Lavaggio interni	23
6.5	Controlli di consistenza	24
6.5.1	Tempi di risposta medi nei centri	24
6.5.2	Popolazioni medie nei centri	24
6.5.3	Probabilità di perdita	24
7	Validazione	24
8	Esecuzione degli esperimenti e analisi dei risultati	26
8.1	Analisi del flusso forzato	26
8.2	Simulazione a Orizzonte Infinito	28
8.2.1	Fascia oraria 08:30 – 13:00	30
8.2.2	Fascia oraria 14:30 – 19:00	33
8.2.3	Conclusioni	36
8.3	Simulazione a orizzonte finito	37
8.3.1	Configurazione {2, 2, 1, 2}, {10,9,6,9} – UNDER PROVISIONING	37
8.3.2	Configurazione {7, 7, 6, 9}, {10,9,6,9} – OVER PROVISIONING	38
8.3.3	Configurazione {5, 6, 1, 5}, {7,6,4,5} – OTTIMO	40
9	Conclusioni	42
10	Bibliografia	42

1 INTRODUZIONE

Dal 2000 al 2022 il numero di autovetture in rapporto alla popolazione residente è andato progressivamente aumentando. **In Europa, il numero medio di autovetture per abitante è aumentato da 0,53 a 0,57 nel 2021.** In Italia i numeri sono ancora più impressionanti: ci sono circa **sette auto ogni dieci abitanti**. Il nostro Paese si piazza al terzo posto per tasso di motorizzazione, subito dopo Polonia e Lussemburgo: in Italia ci sono quasi **40 milioni di auto in circolazione** sulle strade^{[1][2]}.

Dall'analisi di questi dati emerge un trend di crescita nella produzione e vendita di automobili, il che suggerisce un incremento nel numero di individui che possiedono un veicolo. Questo aumento nel possesso di automobili si traduce in un maggior bisogno di servizi di manutenzione, e ciò si rivela una buona notizia per l'industria degli **autolavaggi**. Con l'incremento della quantità di veicoli in circolazione, sorge la necessità pressante per i proprietari di automobili di prendersi cura dei propri mezzi, sia esternamente che internamente. Questo coinvolge un ampio spettro di operazioni, dall'aspetto superficiale di mantenere le parti esterne prive di sporcizia e detriti, fino a interventi più complessi all'interno del veicolo stesso, come la manutenzione delle componenti elettroniche e degli interni. Tra queste attività, il **lavaggio dell'auto** emerge come un elemento cruciale, rappresentando un requisito essenziale oltre che una pratica indispensabile per il mantenimento globale del veicolo. La pulizia costante e adeguata dell'automobile non solo preserva la sua estetica, ma gioca un ruolo rilevante nel prolungare la durata delle parti meccaniche e dell'aspetto interno, contribuendo alla sicurezza e all'affidabilità complessiva del veicolo.

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. Nel settore dei servizi, infatti, il fenomeno delle lunghe attese in coda rappresenta un autentico ostacolo. Questa realtà si fa ancor più pressante se si considera che i clienti insoddisfatti tendono a cercare alternative, potenzialmente indirizzando la loro scelta verso i concorrenti e minacciando la stessa sostenibilità economica dell'attività in questione. Infatti, la **congestione** in un autolavaggio durante le ore di punta può essere **fonte di frustrazione per i clienti** e di **mancati guadagni**.

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.

Tale 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 di minimizzare i costi per la gestione dell'autolavaggio oggetto di studio, individuando il numero ottimale di serventi e operatori per ogni sottosistema dell'autolavaggio nelle diverse fasce orarie. 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. Tale studio si basa, infatti, sulla consapevolezza che soddisfare le aspettative dei clienti non riguarda solo il servizio in sé, ma anche il contesto in cui viene fornito. L'esperienza del cliente è profondamente influenzata dal tempo che trascorre in coda e dall'efficienza complessiva del processo. Una gestione accurata delle code non solo preserva la fidelizzazione della clientela, ma può anche fungere da trampolino di lancio per la crescita e il successo dell'autolavaggio.

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.

Lo studio si focalizza su un autolavaggio che offre due opzioni iniziali ai clienti, definite dall'*International Car Wash Association*^[3] come i due tipi principali di autolavaggi:

- **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 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.

Dopo aver scelto il tipo di lavaggio, le macchine procedono attraverso il **centro lucidatura**, dove vengono eseguite operazioni di lucidatura della carrozzeria e dei cerchioni 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.

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.

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.

Uno schema ad alto livello dell'autolavaggio studiato è mostrato nella seguente [Figura 1](#).

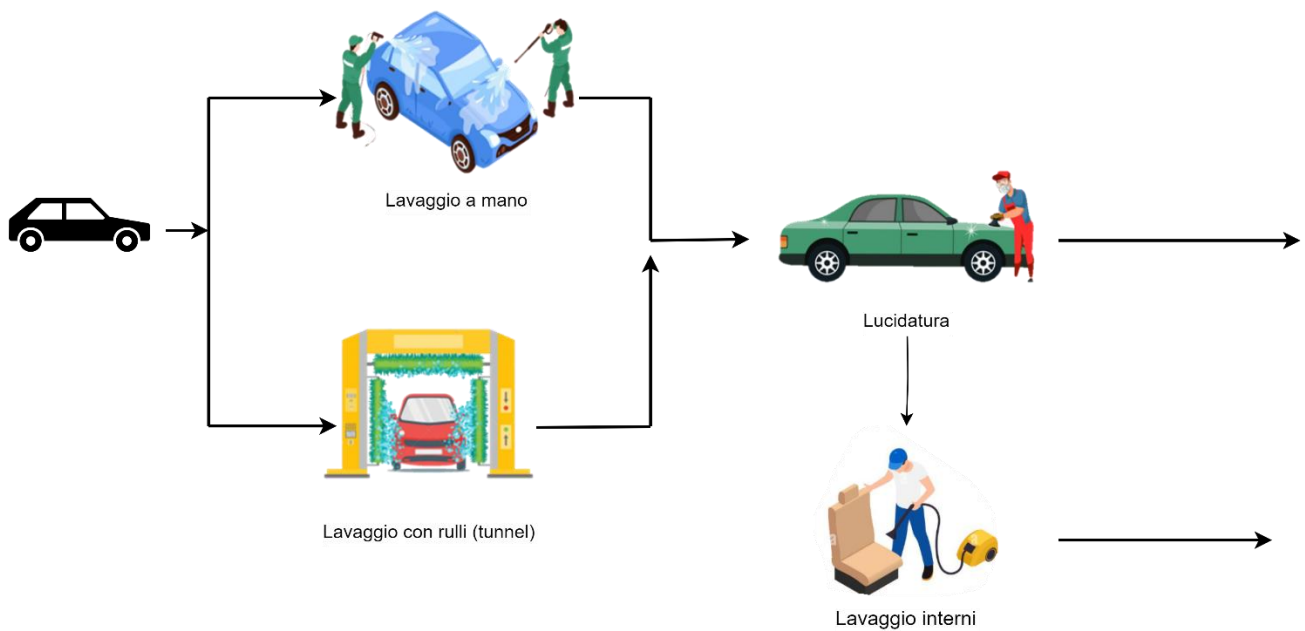


Figura 1: schema ad alto livello del sistema.

2 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 quei costi che influenzano le prestazioni del sistema. In particolare, si considerano sia le entrate, derivanti dal guadagno di ogni singolo lavaggio auto, sia una serie di costi fondamentali che includono i costi di manutenzione delle attrezzature, i costi dei prodotti utilizzati per il lavaggio e i costi relativi all'impiego dei dipendenti. Questo approccio olistico garantisce che le decisioni prese tengano in debito conto sia l'aspetto dei ricavi che quello dei costi, con l'obiettivo di massimizzare il margine di profitto netto complessivo.

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.

3 MODELLO CONCETTUALE

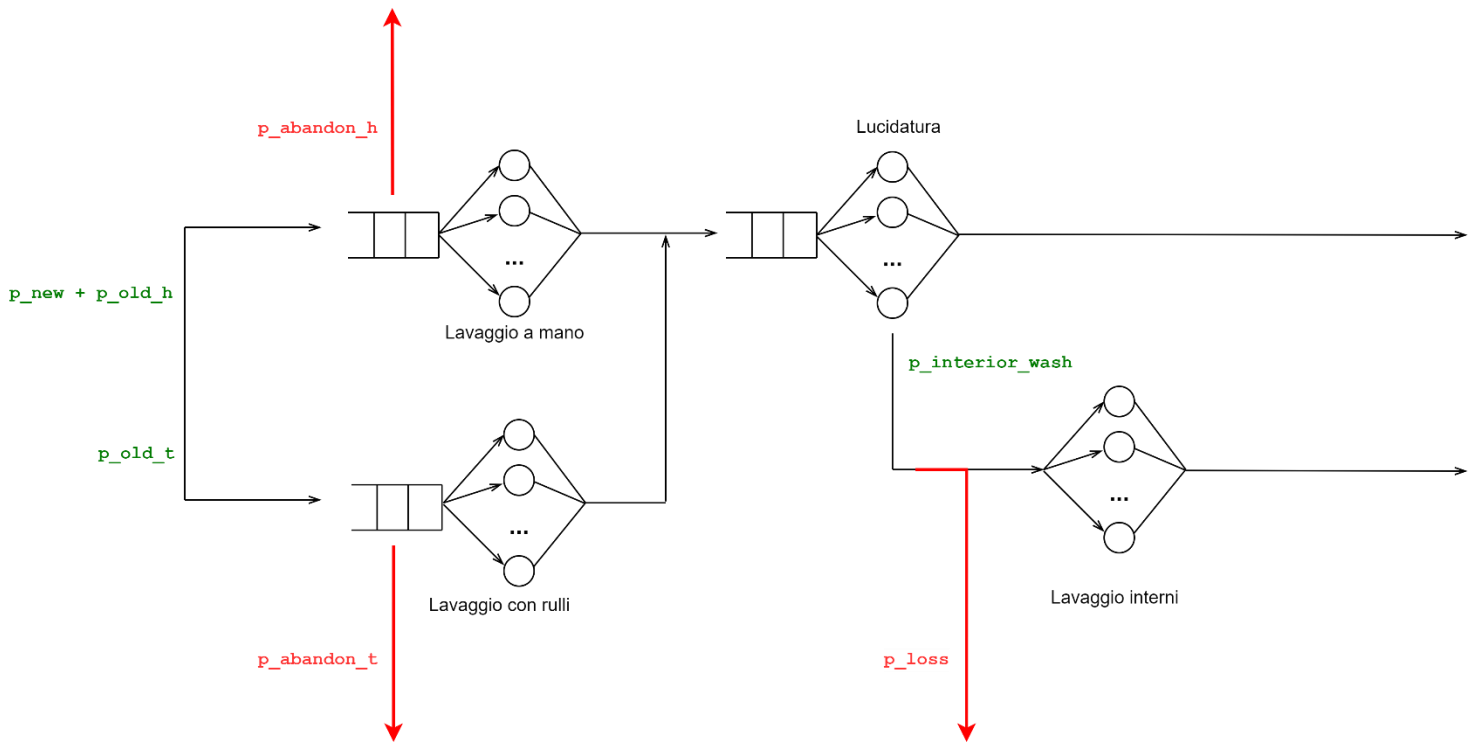


Figura 2: diagramma a basso livello dell'autolavaggio.

Il sistema di gestione dell'autolavaggio può essere rappresentato come una rete di code (Figura 2), composta da quattro centri di servizio distinti:

- 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 sono 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%. Quindi, **ogni arrivo quando il centro è pieno verrà perso**.

Nel diagramma precedente in [Figura 2](#) 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_interior_wash*: macchine che entrano nel centro relativo al lavaggio di interni

in rosso:

- *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_loss*: macchine che abbandonano il centro relativo al lavaggio interni

Una volta entrato nell'autolavaggio, il cliente, in base al tipo di autoveicolo che possiede (nuovo/vecchio), potrà decidere se effettuare un lavaggio a mano o un lavaggio automatico. Nei primi due centri si utilizzano due code multi-server senza priorità con scheduling FIFO, una per ogni centro.

Relativamente al **centro 1** (*lavaggio a mano*):

- La coda ospita tutte le macchine, vecchie e nuove, che vogliono effettuare il lavaggio in quel centro.
- I serventi sono gli operatori addetti al lavaggio manuale dell'automobile. Quando un operatore è libero (*idle*), la prima macchina in coda potrà essere lavata. Ogni servente può lavare al massimo una macchina alla volta.

Relativamente al **centro 2** (*lavaggio automatico con rulli*):

- La coda ospita tutte le macchine vecchie che vogliono effettuare il lavaggio in quel centro.
- I serventi sono i singoli macchinari che effettuano il lavaggio. Ogni macchinario può lavare al massimo una macchina alla volta.

Un cliente in attesa di un servente libero può scegliere di abbandonare la coda, e quindi il sistema, se il numero di macchine in coda supera una soglia prestabilita. Questa caratteristica riflette la dinamica del flusso di clienti e influisce sulle prestazioni del sistema.

Dopo aver completato il lavaggio in uno dei primi due centri, ogni veicolo procede attraverso il centro di *lucidatura* (**centro 3**), rappresentato da un'altra coda multi-server con politica FIFO:

- La coda di questo centro è composta da tutti i veicoli, nuovi o vecchi, che escono dai centri di lavaggio a mano e di lavaggio automatico. Ogni veicolo attende il proprio turno per entrare nel processo di lucidatura.
- I serventi in questo centro sono costituiti dagli addetti alla lucidatura dei veicoli. Ogni servente è incaricato di eseguire la lucidatura su un veicolo alla volta.

Una volta che un veicolo raggiunge la testa della coda del centro di lucidatura e un servente è libero, il veicolo viene preso in carico per la lucidatura. Gli addetti alla lucidatura svolgono il loro compito sui veicoli uno alla volta, seguendo l'ordine di arrivo.

Successivamente, con una determinata probabilità ([paragrafo 4.2](#)), i veicoli uscenti dal centro lucidatura vengono instradati nel **centro 4**, ossia *lavaggio interni*, modellato come un centro multi-server con capacità finita, come affermato precedentemente. Quindi:

- In tale centro non c'è coda.
- I serventi sono gli operatori addetti al lavaggio degli interni dell'automobile. Ogni servente è incaricato di eseguire il lavaggio su un veicolo alla volta.

3.1 VARIABILI DI STATO

Le seguenti variabili di stato rappresentano, ad alto livello, lo stato del sistema:

- Numero di utenti in ogni nodo.
- Numero di nodi attivi, ossia numero di serventi disponibili nei vari blocchi.
- Tipologia di utente (macchina nuova/vecchia).
- Stato di ogni coda.
- Stato di ogni servente nei vari centri.
- Numero di abbandoni per i centri 1, 2 e 4.

In qualunque istante:

- lo stato di ogni coda può essere *not empty* (non vuota) o *empty* (vuota)
- lo stato di ogni servente può essere *idle* (libero) o *busy* (occupato), e in particolare si distinguerà se è occupato da una macchina nuova (*server_state* = 2) o una macchina vecchia (*server_state* = 1). Lo stato *idle* indica che il servente in quel momento non sta svolgendo nessuna attività e può iniziare a servire una richiesta in arrivo, mentre lo stato *busy* indica che il servente sta già eseguendo un'attività e non è immediatamente disponibile per servire ulteriori richieste.

3.2 FASCE ORARIE

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

- 8:30-13:00
- 13:00-17:30

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.

3.3 EVENTI

Gli eventi che si possono avere in tutti i centri del sistema sono:

- Completamento del servizio di un job
- Cambio di fascia oraria

Eventi aggiuntivi che si possono avere nel centro 1 (*lavaggio a mano*) sono:

- Arrivo di una macchina nuova/vecchia

- Abbandono di una macchina (nuova/vecchia)

Eventi aggiuntivi che si possono avere nel centro 2 (*lavaggio automatico*) sono:

- Arrivo di una macchina vecchia
- Abbandono di una macchina vecchia

Eventi aggiuntivi che si possono avere nel centro 4 (*lavaggio interni*) sono:

- Arrivo di una macchina nuova/vecchia
- Abbandono di una macchina (nuova/vecchia)

4 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.

4.1 DATI DI INPUT

I **tempi di interarrivo** dei veicoli 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.

Nella modellazione dei **tempi di servizio** nei centri multi-server dedicati al lavaggio delle automobili, invece, si è usata una **distribuzione Normale troncata**. Questa scelta è stata fatta per considerare accuratamente il comportamento tipico dei centri, eliminando l'effetto di valori eccezionali che potrebbero derivare da situazioni fuori dall'ordinario e potrebbero non riflettere il normale funzionamento del sistema. La distribuzione normale troncata ha permesso di concentrarsi sui tempi di servizio che rappresentano meglio il processo di lavaggio e lucidatura delle automobili, rendendo così il modello più realistico e coerente con le dinamiche effettive del sistema. Poiché i tempi di servizio nell'autolavaggio non possono essere negativi, si è usata tale distribuzione in quanto si ritiene che i tempi di servizio siano distribuiti in modo approssimativamente normale ma con restrizioni sul dominio dei valori (in questo caso, i tempi di servizio non possono essere negativi).

- Gli arrivi sono stati divisi in due diverse fasce orarie:
 - **08:30 – 13:00** → tasso di arrivo: 15 auto/ora (**1/4 auto/min**)
 - **13:00 – 17:30** → 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**
- Una componente cruciale nel nostro sistema riguarda la gestione delle code all'interno dei centri di lavaggio a mano e lavaggio automatico (centri 1 e 2), tenendo conto delle possibili perdite di clienti dovute alle lunghe attese. Al fine di modellare realisticamente l'interazione tra le aspettative dei clienti e il guadagno dell'autolavaggio, abbiamo introdotto un meccanismo di abbandono della coda basato su **soglie prestabilite**:
 - **CAR_TO_WAIT_H = 3** (centro lavaggio a mano)
 - **CAR_TO_WAIT_T = 4** (centro lavaggio con rulli)

In particolare, quando un'auto si trova in coda in uno dei centri, essa monitora il numero di auto davanti a sé. Qualora il numero superi una soglia definita (**CAR_TO_WAIT_H** oppure **CAR_TO_WAIT_T**, a seconda se si trova, rispettivamente, nel centro 1 o 2), l'auto affronta la possibilità di abbandonare la coda. Questi parametri rappresentano quindi il numero massimo di veicoli in coda che un'auto è disposta a tollerare prima di valutare l'opportunità di abbandonare il centro.

Per modellare l'effetto delle perdite, abbiamo introdotto un tempo esponenziale basato sul parametro λ_{abnd} . Se il numero di auto davanti a quella in coda supera la soglia prestabilita, la perdita di un'auto potrebbe verificarsi dopo un tempo medio pari a $1/\lambda_{abnd}$, che corrisponde a 360 secondi (6 minuti).

Tuttavia, è stato anche riconosciuto che le circostanze possono cambiare e che la decisione di abbandonare la coda potrebbe essere influenzata dalla dinamica delle code. Pertanto, abbiamo introdotto un'ulteriore condizione: se il numero di veicoli davanti a un'auto in coda diminuisce fino a diventare al più **CAR_TO_WAIT_H** oppure **CAR_TO_WAIT_T** prima che scada il tempo esponenziale, la probabilità di perdita si annulla. Questo perché si considera che, una volta che la coda diminuisce a un livello più accettabile, l'auto potrebbe decidere di rimanere in attesa.

4.2 PROBABILITÀ DI ROUTING

Sulla base delle osservazioni e delle ricerche condotte, è emerso che a Roma il **16% del parco auto in circolazione** è costituito da veicoli con **un'età inferiore ai 5 anni**, mentre **l'84% delle automobili ha un'età superiore a 5 anni**^[4]. Questa suddivisione dell'età delle vetture ci permette di definire due categorie di clienti nel nostro progetto: "auto nuove" e "auto vecchie". Le auto con un'età inferiore ai 5 anni saranno classificate come "nuove", mentre le vetture con un'età superiore a 5 anni rientreranno nella categoria di "vecchie". Questa distinzione ci consentirà di adattare i servizi di lavaggio in base alle preferenze e alle esigenze dei due gruppi di clienti:

- Il 30% delle auto vecchie 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.
- Le auto nuove effettuano solamente il lavaggio a mano.

I proprietari di auto nuove tendono 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 $0.16 + 0.252 = 0.412$.

La matrice di routing risultante è la seguente:

	ext	1	2	3	4
ext	0	$p_{new} + p_{old_h}$	p_{old_t}	0	0
1	$p_{abandon_h}$	0	0	$1 - p_{abandon_h}$	0
2	$p_{abandon_t}$	0	0	$1 - p_{abandon_t}$	0
3	$1 - p_{interior_{wash}}$	0	0	0	$p_{interior_{wash}}$
4	1	0	0	0	0

Dove:

- ext: esterno
- 1: centro lavaggio a mano
- 2: centro lavaggio automatico
- 3: centro lucidatura
- 4: centro lavaggio interni

In base alle nostre osservazioni e alle esperienze personali, i componenti della matrice di routing sono stati scelti nel seguente modo:

- $p_{new} = 0.16$
- $p_{old_t} = 0.588$
- $p_{old_h} = 0.252$
- $p_{interior_{wash}} = 0.8$

Quindi, la probabilità di entrare nel sistema accedendo al centro *lavaggio a mano* è $p_{new} + p_{old_h} = 0.412$, mentre la probabilità di entrare nel sistema accedendo al centro *lavaggio automatico* è 0.588.

4.3 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 ($TUNNEL_COST$) = **2500 € 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.

5 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>.

5.1 STRUTTURE DATI (CLASSI PYTHON)

5.1.1 Clock di sistema

Poiché un modello di simulazione ad eventi discreti è dinamico, man mano che il sistema simulato evolve è necessario tenere traccia del valore corrente del tempo simulato.

```
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
```

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 (arrivo, completamento o abbandono)
- **Last** tiene traccia dell'istante dell'ultimo arrivo

5.1.2 Stato del sistema

Lo stato di un sistema è una caratterizzazione completa del sistema in un istante nel tempo, una sorta di "istantanea" completa nel tempo. Quando si tratta di definire e descrivere lo stato di un sistema, il metodo principale consiste nell'assegnare valori alle variabili che lo caratterizzano, ossia le **variabili di stato**.

```
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)
```

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 servendo una macchina vecchia, mentre se è 2 sta servendo una macchina nuova.

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.

5.1.3 Classe eventi (Calendar)

Un evento è un **avvenimento che può modificare lo stato del sistema**. La struttura dati che mantiene gli eventi del sistema è riportata nella seguente figura:

```
class Calendar:
    def __init__(self):
        # lavaggio a mano
        self.newCar_arrivalTime_handWash = 0.0 # tempo arrivo new_car al centro 1
        self.oldCar_arrivalTime_handWash = 0.0 # tempo arrivo old_car al centro 1
        self.completions_handWash = None # completamenti di ogni server del centro 1
        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 old_car al centro 2
        self.completions_touchless = None # completamenti di ogni server del centro 2
        self.head_touchless = None
        self.tail_touchless = None
        # lucidatura
        self.newCar_arrivalTime_polishing = 0.0 # tempo arrivo new_car al centro 3
        self.oldCar_arrivalTime_polishing = 0.0 # tempo arrivo old_car al centro 3
        self.completions_polishing = None # completamenti di ogni server del centro 3
        # lavaggio interni
        self.newCar_arrivalTime_interiorWash = 0.0 # tempo arrivo new_car al centro 4
        self.oldCar_arrivalTime_interiorWash = 0.0 # tempo arrivo old_car al centro 4
        self.completions_interiorWash = None # completamenti di ogni server del centro 4
        self.change_time_slot = 0.0
        self.sampling = 0.0
```

Gli eventi riportati da tale struttura sono i seguenti:

Centro lavaggio a mano (centro 1)	
newCar_arrivalTime_handWash	Arrivo di una macchina <u>nuova</u> all'interno del centro <i>lavaggio a mano</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.
oldCar_arrivalTime_handWash	Arrivo di una macchina <u>vecchia</u> all'interno del centro <i>lavaggio a mano</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.
completions_handWash	Completamento di ogni servente del centro <i>lavaggio a mano</i> . Tale variabile è un array che contiene i tempi di completamento per ciascun servente nel centro <i>lavaggio a mano</i> . Ogni valore nell'array rappresenta il tempo in cui uno specifico servente termina il lavaggio per un cliente. La

	lunghezza dell'array è uguale al numero di serventi presenti nel centro.
--	--

Centro lavaggio automatico (centro 2)	
oldCar_arrivalTime_touchless	Arrivo di una macchina <u>vecchia</u> all'interno del centro <i>lavaggio automatico</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.
completions_touchless	Completamento di ogni servente del centro <i>lavaggio automatico</i> . Tale variabile è un array che contiene i tempi di completamento per ciascun servente nel centro <i>lavaggio automatico</i> . Ogni valore nell'array rappresenta il tempo in cui uno specifico servente termina il lavaggio per un cliente. La lunghezza dell'array è uguale al numero di serventi presenti nel centro.

Centro lucidatura (centro 3)	
newCar_arrivalTime_polishing	Arrivo di una macchina <u>nuova</u> all'interno del centro <i>lucidatura</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.
oldCar_arrivalTime_polishing	Arrivo di una macchina <u>vecchia</u> all'interno del centro <i>lucidatura</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.
completions_polishing	Completamento di ogni servente del centro <i>lucidatura</i> . Tale variabile è un array che contiene i tempi di completamento per ciascun servente nel centro <i>lucidatura</i> . Ogni valore nell'array rappresenta il tempo in cui uno specifico servente termina il lavaggio per un cliente. La lunghezza dell'array è uguale al numero di serventi presenti nel centro.

Centro lavaggio interni (centro 4)	
newCar_arrivalTime_interiorWash	Arrivo di una macchina <u>nuova</u> all'interno del centro <i>lavaggio interni</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.
oldCar_arrivalTime_interiorWash	Arrivo di una macchina <u>vecchia</u> all'interno del centro <i>lavaggio interni</i> : tale variabile rappresenta il relativo tempo di arrivo.

completions_interiorWash	Completamento di ogni servente del centro <i>lavaggio interni</i> . Tale variabile è un array che contiene i tempi di completamento per ciascun servente nel centro <i>lavaggio interni</i> . Ogni valore nell'array rappresenta il tempo in cui uno specifico servente termina il lavaggio per un cliente. La lunghezza dell'array è uguale al numero di serventi presenti nel centro.
--------------------------	--

5.1.4 Arrivi e completamenti

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 1 o dal centro 2. Successivamente si verifica se nel blocco corrispondente c'è un servente libero, e, in caso affermativo, si genera un servizio per il completamento tramite **GetService()**.

Gli arrivi ai centri sono generati tramite la funzione **Exponential()** presente dalla libreria *rvgs.py*, mentre i servizi sono generati tramite la funzione **TruncatedNormal()**. Nelle figure in seguito si mostra la gestione degli arrivi e dei servizi nel centro *lavaggio a mano*:

```
def getNewCarArrivalHandWash(arrival, inter_time):
    selectStream(0) # rvgs.py
    arrival += Exponential(inter_time / P_NEW)
    return arrival

def GetServiceHandWash(start):
    selectStream(3)
    mean = SERVICE_TIME_HANDWASH # Media in secondi (30 min)
    std_dev = 5.0 * 60.0 # Deviazione standard in secondi
    a = 0.0 # tempi di servizio non possono essere negativi
    b = 36.0 * 60.0
    return start + TruncatedNormal(mean, std_dev, a, b)
```

Per generare gli eventi randomicamente si è utilizzato il **generatore di Lehmer**, fornito dalla libreria *rvgs.py*.

Un generatore di numeri random dovrebbe essere:

1. casuale: in grado di produrre output che superano tutti i ragionevoli test statistici di casualità;
2. controllabile: in grado di riprodurre il suo output, se lo si desidera;
3. portatile: in grado di produrre lo stesso output su un'ampia varietà di sistemi informatici;
4. efficiente: veloce, con requisiti minimi di risorse informatiche;
5. documentato: teoricamente analizzato e ampiamente testato.

Un generatore di numeri random **ideale** è una funzione, diciamo *Random*, con la proprietà che ogni assegnazione $u = \text{Random}()$ produrrà un numero u a valore reale compreso tra 0.0 e 1.0, in modo tale che qualsiasi valore nell'intervallo $0.0 < u < 1.0$ abbia la stessa probabilità di verificarsi. Un **buon generatore** di

numeri casuali produce risultati (quasi) statisticamente indistinguibili da quelli prodotti da un generatore ideale.

Poiché un tipico modello di simulazione ad eventi discreti ha molti componenti stocastici, il modo migliore per soddisfare questa esigenza di più fonti di casualità è utilizzare un generatore di numeri casuali per generare più *stream* di numeri casuali, ognuno associato a una diversa componente stocastica. Questi stream sono ottenuti utilizzando *seed* iniziali.

A tale scopo viene utilizzata la libreria *rngs.py*, la quale prevede di default 256 stream indicizzati da 0 a 255, con 0 come stream predefinito. Per inizializzare gli stream è stata utilizzata la funzione *plantSeeds*. Solo uno stream per volta è attivo, mentre gli altri 255 sono passivi: per definire lo stream attivo si utilizza la funzione *selectStream*.

Le funzioni della libreria *rngs* utilizzate sono:

- ***random()***: è il generatore di numeri casuali Lehmer utilizzato.
- ***selectStream(index)***: questa funzione può essere utilizzata per definire lo stream attivo, cioè lo stream da cui arriverà il prossimo numero random. Lo stream attivo rimarrà come fonte di futuri numeri random finché non verrà selezionato un altro stream attivo chiamando *selectStream* con un indice di stream diverso.
- ***plantSeeds(x)***: questa funzione può essere utilizzata per impostare lo stato degli stream.

Quindi, nel nostro progetto, per ciascuna tipologia di evento e per ogni centro del sistema è stato usato uno stream diverso:

```
def getNewCarArrivalHandWash(arrival, inter_time):
    selectStream(0) # rngs.py
    arrival += Exponential(inter_time / P_NEW)
    return arrival

def getOldCarArrivalHandWash(arrival, inter_time):
    selectStream(1) # rngs.py
    arrival += Exponential(inter_time / P_OLD_H)
    return arrival

def getOldCarArrivalTouchless(arrival, inter_time):
    selectStream(2) # rngs.py
    arrival += Exponential(inter_time / P_OLD_T)
    return arrival
```

```
def GetServiceHandWash(start):
    selectStream(3)
    mean = SERVICE_TIME_HANDWASH
    std_dev = 5.0 * 60.0
    a = 0.0
    b = 36.0 * 60.0
    return start + TruncatedNormal(mean, std_dev, a, b)

def GetServiceTouchless(start):
    selectStream(4)
    mean = SERVICE_TIME_TOUCHLESS
    std_dev = 2.0 * 60.0
    a = 0.0
    b = 14.0 * 60.0
    return start + TruncatedNormal(mean, std_dev, a, b)

def GetServicePolishing(start):
    selectStream(5)
    mean = SERVICE_TIME_POLISHING
    std_dev = 1.0 * 60.0
    a = 0.0
    b = 4.0 * 60.0
    return start + TruncatedNormal(mean, std_dev, a, b)

def GetServiceInteriorWash(start):
    selectStream(6)
    mean = SERVICE_TIME_INTERIORWASH
    std_dev = 3.0 * 60.0
    a = 0.0
    b = 10.0 * 60.0
    return start + TruncatedNormal(mean, std_dev, a, b)

def getAbandonHandWash(start):
    selectStream(7) # rngs.py
    return start + Exponential(ABANDON_TIME_1)

def getAbandonTouchless(start):
    selectStream(8) # rngs.py
    return start + Exponential(ABANDON_TIME_2)
```

Sono stati quindi implementati stream distinti per i diversi tipi di arrivi e di servizi, in modo che tali eventi siano disaccoppiati tra loro. Questa suddivisione permette di considerare in modo indipendente le dinamiche specifiche di ciascun centro e di garantire che i tempi di arrivo e di servizio in un centro non siano influenzati da quelli di altri centri.

5.1.5 Cambio di fascia oraria

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

In particolare, se un server sta servendo un'automobile e nella nuova fascia oraria non sarà più attivo, il server 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**" i valori, rispettivamente, di -2 e -1 .

Se invece un server 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 server. Se un server 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 server 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 server siano attivati o disattivati in modo appropriato, tenendo conto dello stato attuale dei servizi in corso e massimizzando l'efficienza complessiva del sistema.

6 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 server 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 server **{20, 11, 8, 2}** durante la prima fascia oraria, la quale garantisce l'assenza di perdite nei primi 2 centri (e un tempo di attesa in coda pari a 0), mantenendo così la conformità tra il modello analitico e la simulazione.

Nel seguente paragrafo vengono quindi riportati e confrontati, per ogni centro, i risultati prodotti dal modello analitico e quelli prodotti dalla simulazione a orizzonte infinito con Batch Means, con parametri $b=1024$ e $k=128$ (vedere [Capitolo 8](#)).

6.1 CENTRO 1: LAVAGGIO A MANO

Il tasso di arrivo è:

$$\lambda_h = (p_{new} + p_{old_h}) * \lambda_1 = 0.412 * \frac{1}{240} = 1.71666 * 10^{-3} \text{ car/s}$$

Conoscendo il tempo medio di servizio per un server $E(S_i)$, possiamo ricavare l'utilizzazione:

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu} = \lambda * \frac{E(S_i)}{m}$$

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

Risultati ottenuti per il centro LAVAGGIO A MANO (M/M/20) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.154
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	3.082048448
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	1795.3750914087
Probabilità di perdita (P_{loss})	0

Gli intervalli di confidenza, con livello di confidenza al $1 - \alpha = 0.95$, prodotti dalle simulazioni sono riportati nella seguente tabella:

Intervalli di confidenza per il centro LAVAGGIO A MANO (M/M/20) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.1540837230 +/- 0.0010352832
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0 +/- 0.0
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	3.0816744611 +/- 0.0207056649
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0 +/- 0.0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	1795.7427389231 +/- 2.1839198756
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

6.2 CENTRO 2: LAVAGGIO CON RULLI

Il tasso di arrivo è:

$$\lambda_t = p_{old_t} * \lambda_1 = 0.588 * \frac{1}{240} = 2.45 * 10^{-3} \text{ car/s}$$

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

Risultati ottenuti per il centro LAVAGGIO CON RULLI (M/M/11) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.133
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	1.50675
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	615.0346338188
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

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

Intervalli di confidenza per il centro LAVAGGIO CON RULLI (M/M/11) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.1383465246 +/- 0.0012453188
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0 +/- 0.0
Popolazione media nel centro $E(N_S)$	1.5218117713 +/- 0.0136985071
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0 +/- 0.0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	615.3590541235 +/- 1.9508310956
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

6.3 CENTRO 3: LUCIDATURA

Il tasso di arrivo, poiché non ci sono state perdite nei primi due centri, è:

$$\lambda_p = \lambda_h + \lambda_t = 4.166 * 10^{-3} \text{ car/s}$$

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

Risultati ottenuti per il centro LUCIDATURA (M/M/8) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.06249
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0
Popolazione media nel centro $E(N_s)$	0.49992
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	120 s
Probabilità di perdita (P_{loss})	0

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

Intervalli di confidenza per il centro LUCIDATURA (M/M/8) prodotti dalle simulazioni	
Utilizzazione (ρ)	0.0627187907 +/- 0.0004616884
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0 +/- 0.0
Popolazione media nel centro $E(N_s)$	0.5017503259 +/- 0.0036935072
Tempo medio di servizio $E(S)$	119.4649516934 +/- 0.8278520384
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0 +/- 0.0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	119.8430506149 +/- 0.4026687272
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.0 +/- 0.0

6.4 CENTRO 4: LAVAGGIO INTERNI

Il tasso di arrivo è:

$$\lambda_{int} = p_{interior_{wash}} * \lambda_p = 3.3328 * 10^{-3} \text{ car/s}$$

Essendo un centro a buffer finito, il tasso di arrivo non è esattamente λ_{int} ma λ'_{int} :

$$\lambda'_{int} = \lambda_{int}(1 - p_{loss})$$

dove p_{loss} = probabilità che tutti e 2 i serventi siano occupati

Effettuando gli opportuni calcoli, risulta che $\lambda'_{int} = 2.6666 * 10^{-3} \text{ car/s}$.

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

Risultati ottenuti per il centro LAVAGGIO INTERNI (M/M/2) utilizzando i modelli analitici	
Utilizzazione (ρ)	0.39995
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0
Popolazione media nel centro $E(N_s)$	0.800317
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0 s
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	300 s
Numero arrivi	1024
Numero abbandoni	204.760576
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.1999615

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)	0.4011726437 +/- 0.0024644860
Popolazione media in coda $E(N_Q)$	0.0 +/- 0.0
Popolazione media nel centro $E(N_s)$	0.8023452875 +/- 0.0049289720
Tempo medio di attesa $E(T_Q)$	0.0 +/- 0.0
Tempo medio di risposta $E(T_S)$	300.1948956088 +/- 1.0203263116
Numero arrivi	1024.0 +/- 0.0
Numero abbandoni	206.8437499999 +/- 3.1444253431
Probabilità di perdita (P_{loss})	0.2019958496 +/- 0.0030707278

6.5 CONTROLLI DI CONSISTENZA

Per ogni centro, sono state controllate le seguenti metriche.

6.5.1 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.

6.5.2 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 $m * \rho$:

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

6.5.3 Probabilità di perdita

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

7 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 configurazione di serveri **{20, 11, 8, 2}** e sono state analizzate le prestazioni del sistema durante la prima e la seconda fascia 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 metriche di prestazione, relative al centro *lavaggio a mano* e *lavaggio automatico* 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.

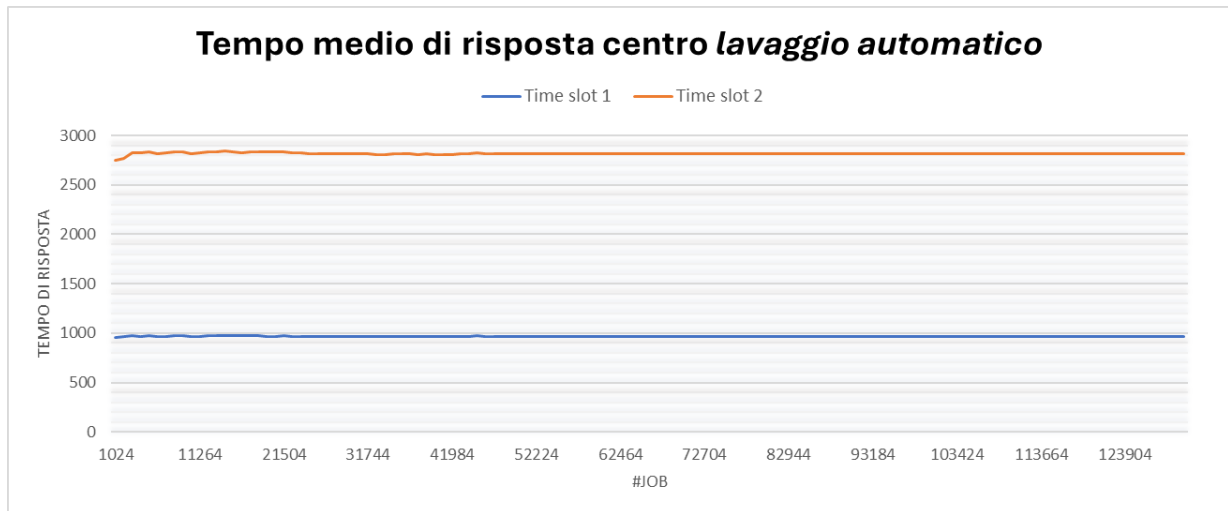


Figura 3: Tempo medio di risposta del centro lavaggio automatico al variare delle fasce orarie, per la configurazione {20,11,8,2}.

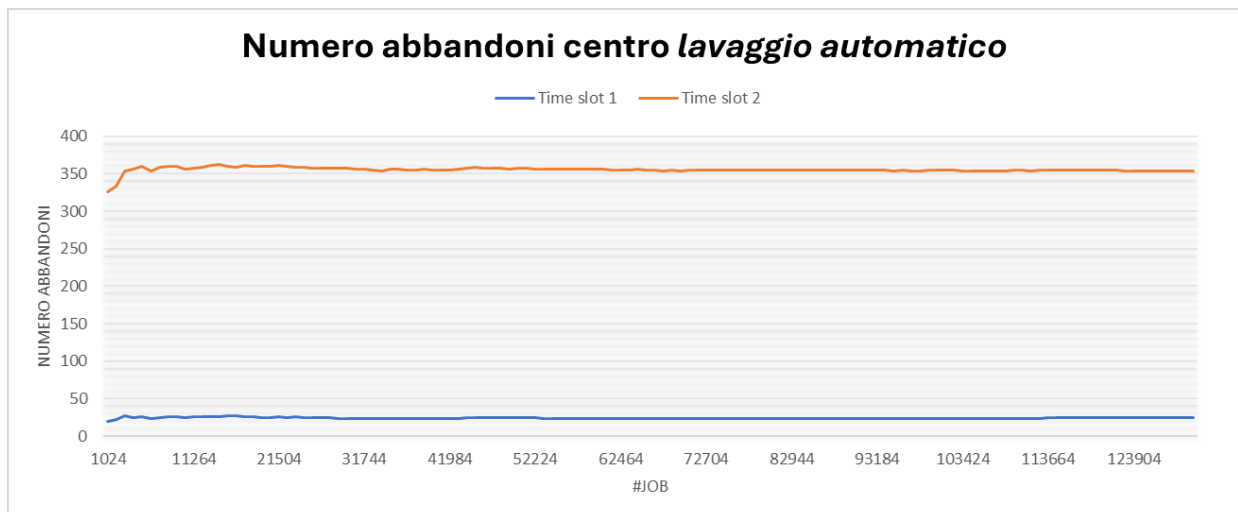


Figura 4: Numero medio di abbandoni dal centro lavaggio automatico al variare delle fasce orarie, per la configurazione {20,11,8,2}.

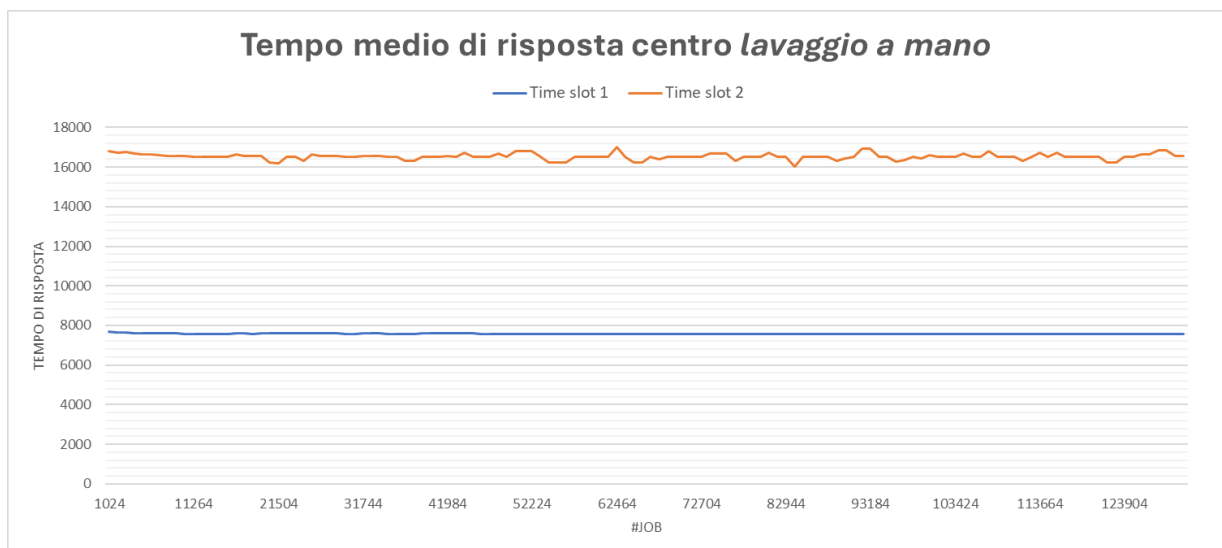


Figura 5: Tempo medio di risposta del centro lavaggio a mano al variare delle fasce orarie, per la configurazione {20,11,8,2}.

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.

8 ESECUZIONE DEGLI ESPERIMENTI E ANALISI DEI RISULTATI

La progettazione degli esperimenti si articola in tre fasi:

1. Analisi del flusso forzato
2. Esecuzione delle simulazioni a orizzonte infinito
3. Esecuzione delle simulazioni a orizzonte finito

L'analisi del flusso forzato nei centri consiste nel calcolare, con l'ausilio dell'analisi operativa e della simulazione, le visite medie e la domanda media per ciascun centro del sistema. Questo permette di effettuare l'**analisi del collo di bottiglia**, in modo tale da identificare i centri con la domanda più alta che, quindi, rappresentano il collo di bottiglia.

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 fascia 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.

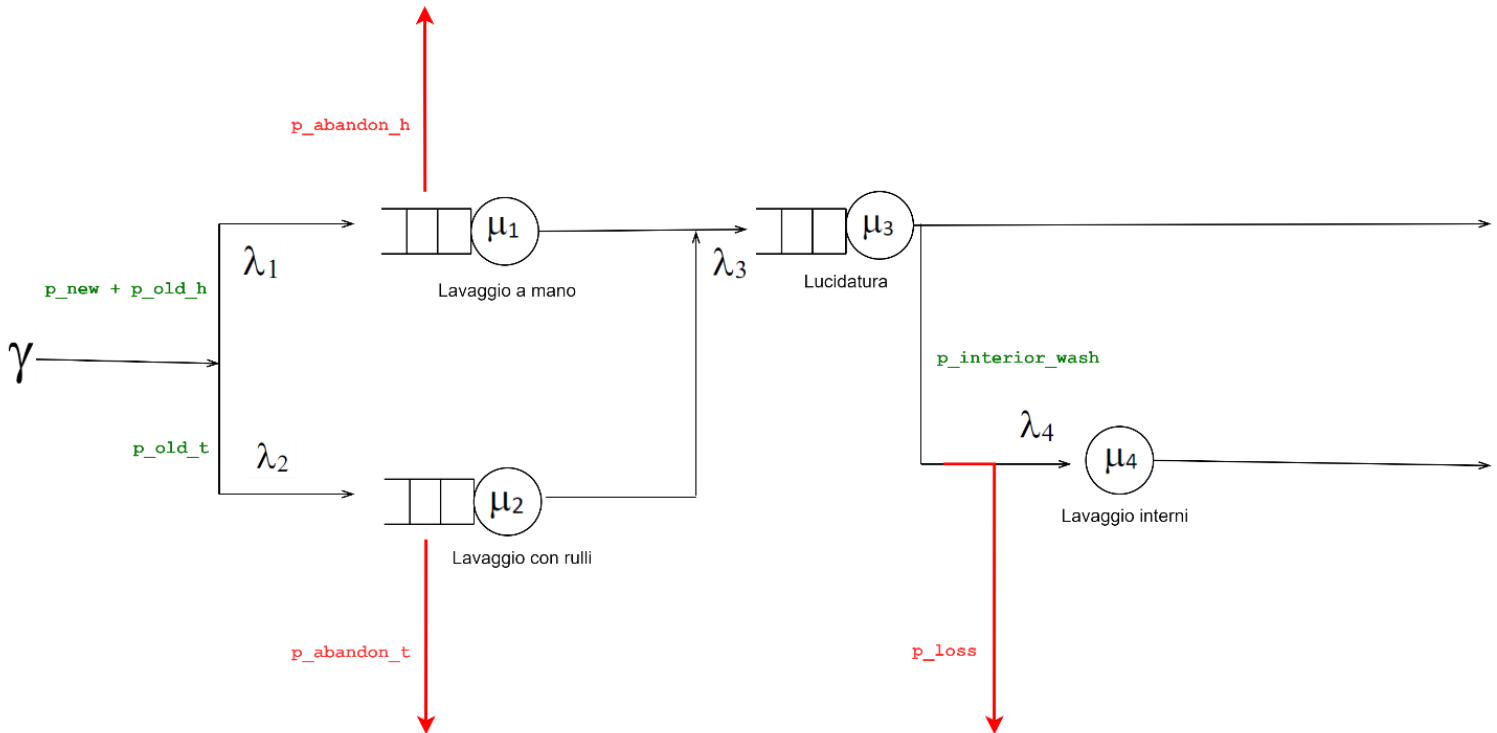
Le simulazioni sono state eseguite sia ad **orizzonte finito** che **infinito** per analizzare il comportamento del sistema in diverse condizioni. L'orizzonte finito rappresenta un periodo di tempo specifico, come ad esempio un'intera giornata di attività dell'autolavaggio. L'orizzonte infinito, invece, rappresenta un periodo di tempo molto lungo, solitamente molto superiore a quello reale, e consente di osservare il comportamento del sistema in uno stato stazionario in cui le prestazioni si stabilizzano nel tempo.

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.

Nei seguenti esperimenti, analizzeremo le diverse metriche in base alle diverse configurazioni utilizzate, mantenendo sempre l'obiettivo di minimizzare gli abbandoni nei centri al fine di massimizzare il profitto dell'autolavaggio.

8.1 ANALISI DEL FLUSSO FORZATO

Per l'analisi del collo di bottiglia abbiamo impostato un unico server per tutti i centri.



In figura, γ è il tasso di ingresso nel sistema, mentre λ_i è il tasso di ingresso al centro i .

Il **servizio medio** per ogni centro del sistema è:

$$S_1 = 1/\mu_1 = 1800 \text{ s}$$

$$S_2 = 1/\mu_2 = 600 \text{ s}$$

$$S_3 = 1/\mu_3 = 120 \text{ s}$$

$$S_4 = 1/\mu_4 = 300 \text{ s}$$

Per calcolare il numero medio di visite ai centri del sistema si effettuano i seguenti calcoli:

$$\lambda_1 = \gamma(p_{new} + p_{old_h}) = 0.412 \gamma$$

$$\lambda_2 = \gamma(p_{old_t}) = 0.588 \gamma$$

$$\lambda_3 = \lambda_1(1 - p_{abandon_h}) + \lambda_2(1 - p_{abandon_t}) = \gamma[0.412(1 - p_{abandon_h}) + 0.588(1 - p_{abandon_t})]$$

$$\lambda_4 = \lambda_3 * p_{interior_{wash}} = \gamma[0.3296(1 - p_{abandon_h}) + 0.4704(1 - p_{abandon_t})]$$

Da cui possiamo ricavare le **visite ai centri**:

$$v_1 = \lambda_1 / \gamma = 0.412$$

$$v_2 = \lambda_2 / \gamma = 0.588$$

$$v_3 = \lambda_3 / \gamma = [0.412(1 - p_{abandon_h}) + 0.588(1 - p_{abandon_t})]$$

$$v_4 = \lambda_4 / \gamma = [0.3296(1 - p_{abandon_h}) + 0.4704(1 - p_{abandon_t})]$$

Una volta calcolate le visite, possiamo calcolare la **domanda media** per i centri del sistema:

$$D_1 = v_1 S_1 = 741.6 \text{ s}$$

$$D_2 = v_2 S_2 = 352.8 \text{ s}$$

$$D_3 = v_3 S_3 = [49.44(1 - p_{abandon_h}) + 70.56(1 - p_{abandon_t})]$$

$$D_4 = v_4 S_4 = [39.552(1 - p_{abandon_h}) + 56.448(1 - p_{abandon_t})]$$

Eseguendo la simulazione a orizzonte infinito per le singole fasce orarie abbiamo ottenuto i valori per la probabilità media di abbandono dal centro 1, probabilità media di abbandono dal centro 2 e per le domande medie relative ai vari centri.

	08:30 → 13:00	13:00 → 17:30
$p_{abandon_h}$	0.67552	0.83752
$p_{abandon_t}$	0.34764	0.67086
D_1	741.6	741.6
D_2	352.8	352.8
D_3	62.07281	31.25712
D_4	49.65825	25.00570

Dalla tabella precedente è possibile osservare che il centro 1 (*lavaggio a mano*) rappresenta il collo di bottiglia in tutte e due le fasce orarie, mentre il centro 2 (*lavaggio automatico*) è il secondo centro a domanda media più alta.

Tale risultato sarà il punto di partenza per le simulazioni che seguono.

8.2 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 molto superiore a quello reale, consentendo 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.

Questa simulazione viene eseguita tramite 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.

Per determinare le dimensioni ottimali dei batch, abbiamo seguito le raccomandazioni proposte da *Banks, Carson, Nelson e Nicol* ^[5]. In particolare, abbiamo cercato di individuare il valore di b per il quale l'autocorrelazione del campione risultante fosse inferiore a 0.2 per lag $j = 1$. L'autocorrelazione rappresenta il grado di dipendenza tra le osservazioni successive nel campione, e un valore elevato di

autocorrelazione può influenzare negativamente la rappresentatività del campione. Su ogni campione è stata quindi valutata l'autocorrelazione tramite il programma *acs.py*^[6], ed infine si è trovato che i valori ottimali sono:

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

Infatti, le linee guida riportate all'interno del libro di testo *Lawrence M. Leemis, Stephen K. Park, Discrete-Event Simulation - A first course, Pearson Education Prentice Hall, 2006*, sono le seguenti:

Guidelines

If the value of the product $n = bk$ is fixed, then the batch size b cannot be too large for if it is the number of batches k will be too small resulting in a wide interval estimate width (see Figure 8.1.8). The following guidelines are offered for choosing (b, k) .

- Schmeiser (1982) recommends a number of batches between $k = 10$ and $k = 30$, although this advice should be tempered by the two other guidelines.
- Pegden, Shannon, and Sadowski (1995, page 184) recommend a batch size that is at least ten times as large as the largest lag for which the autocorrelation function remains significant (see Section 4.4).
- Banks, Carson, Nelson, and Nicol (2001, page 438) recommend that the batch size be increased until the lag one autocorrelation between batch means is less than 0.2.

Viene eseguita una simulazione di $n = k * b$ jobs, in cui ad ogni b job vengono calcolati i tempi di attesa, di risposta e le probabilità di perdita del batch. A questo punto lo stato del sistema (numero di job in coda e nel centro) viene lasciato invariato, si azzerano le sole statistiche di output (e.g., tempi di risposta, tempi di attesa, job completati), in modo da calcolare le statistiche di interesse solo in base ai valori del batch. Grazie a questo accorgimento le medie dei batch sono indipendenti tra loro. Per ogni metrica di interesse viene calcolata una media per ciascun batch, ed una volta raggiunto il numero indicato di batch, si termina la raccolta delle stime di un determinato centro e viene calcolato l'intervallo di confidenza tramite *estimate.py*.

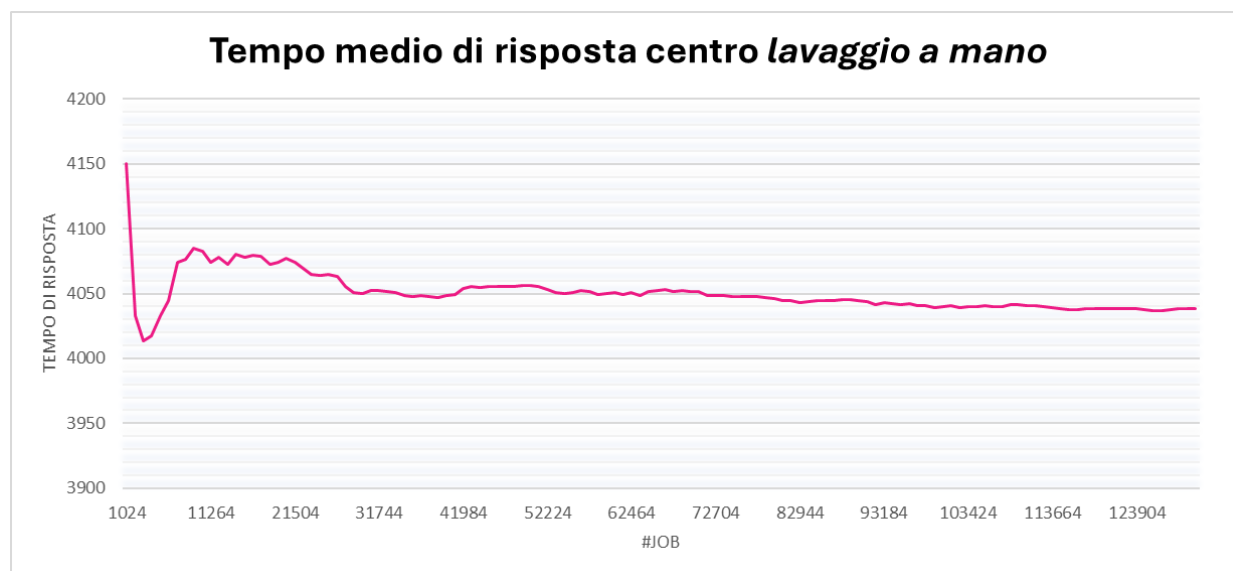
Nel contesto della simulazione ad orizzonte infinito, il nostro studio si è focalizzato su tre obiettivi principali:

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.

8.2.1 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}, che prevede 2 serventi nel centro lavaggio a mano, 2 serventi nel centro lavaggio automatico, 1 servente nel centro lucidatura e 3 serventi nel centro lavaggio interni.



Dal grafico precedente si può osservare come già il tempo di risposta nel centro lavaggio a mano sia nettamente superiore al massimo desiderato. Il tempo medio di risposta infatti è **4038.3726268910 +/- 18.2050363274**, nettamente superiore ai 45 minuti (2700 secondi) desiderati. Nonostante ciò, possiamo osservare che il tempo di risposta, all'aumentare del numero di job, tende a stabilizzarsi intorno al valore medio, indicando una certa stabilità.

Per quanto riguarda i tempi di attesa dei vari centri, invece, gli intervalli di confidenza calcolati sono:

Tempo medio di attesa-centro-1 ----- **2242.3417082339 +/- 16.9910323743**

Tempo medio di attesa-centro-2 ----- **353.9279634554 +/- 10.1700825180**

Tempo medio di attesa-centro-3 ----- 31.1152042550 +/- 0.5644474690

Tempo medio di attesa-centro-4 ----- 0.0 +/- 0.0

I valori evidenziati in rosso non soddisfano i requisiti di qualità prefissati. In particolare, il centro 1 presenta un tempo di attesa nettamente superiore alla soglia desiderata. Anche il centro 2 ha un tempo di attesa superiore ai 300 secondi desiderati, sebbene inferiore rispetto al centro 1.

Le utilizzazioni dei vari centri sono:

Utilizzazione centro-1 ----- **0.9887554958 +/- 0.0011904591**

Utilizzazione centro-2 ----- 0.742587991 +/- 0.0059775297

Utilizzazione centro-3 ----- 0.4213739506 +/- 0.0027577124

Utilizzazione centro-4 ----- 0.2775156634 +/- 0.0018554521

Si può osservare come l'utilizzazione del centro 1, ossia quello relativo al lavaggio a mano, tenda quasi ad 1, indicando una situazione di congestione, con un tempo di attesa medio di circa 2242 secondi, nettamente superiore alla soglia desiderata. Anche il centro 2 presenta un tempo di attesa leggermente superiore alla soglia desiderata, e un'utilizzazione di circa 0.74.

Questi risultati suggeriscono che sarà necessario aumentare il numero di serventi nei primi due centri per ridurre i tempi di attesa e garantire un servizio più efficiente, pur mantenendo sotto controllo i costi.

Configurazione {4,3,1,3} vs {5,3,1,3}

Abbiamo quindi eseguito una simulazione per confrontare due diverse configurazioni del sistema: {4,3,1,3} e {5,3,1,3}. Queste configurazioni differiscono principalmente nel numero di serventi nel centro lavaggio a mano, con la seconda configurazione che prevede un servente in più.

Gli intervalli di confidenza calcolati per il centro *lavaggio a mano* sono i seguenti:

Metriche	{4,3,1,3}	{5,3,1,3}
Utilizzazione centro <i>lavaggio a mano</i>	0.746478247144921 +/- 0.004278043572339762	0.6116506330825727 +/- 0.0040022600469890365
Tempo medio di risposta complessivo auto che effettua <i>lavaggio a mano</i>	2715.6592499368 +/- 8.59375028429	2578.2749294358 +/- 8.5468970784
Tempo medio di attesa centro <i>lavaggio a mano</i>	318.5545002810428 +/- 8.123509553528054	109.1980080870218 +/- 4.274929392891962
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 del centro 1, sia quello relativo al tempo di risposta non sono soddisfatti (marcati in rosso). Tuttavia, nella configurazione {5,3,1,3}, osserviamo un miglioramento significativo nei tempi di attesa e di risposta nel centro lavaggio a mano. I risultati mostrano che questa configurazione si avvicina maggiormente agli obiettivi prefissati, mantenendo un costo accettabile.

Questa analisi suggerisce che l'aggiunta di un servente al centro *lavaggio a mano* potrebbe essere una scelta vantaggiosa per migliorare le prestazioni del sistema e soddisfare i requisiti di qualità del servizio. Tuttavia, è importante bilanciare questa ottimizzazione con l'impatto sui costi operativi complessivi.

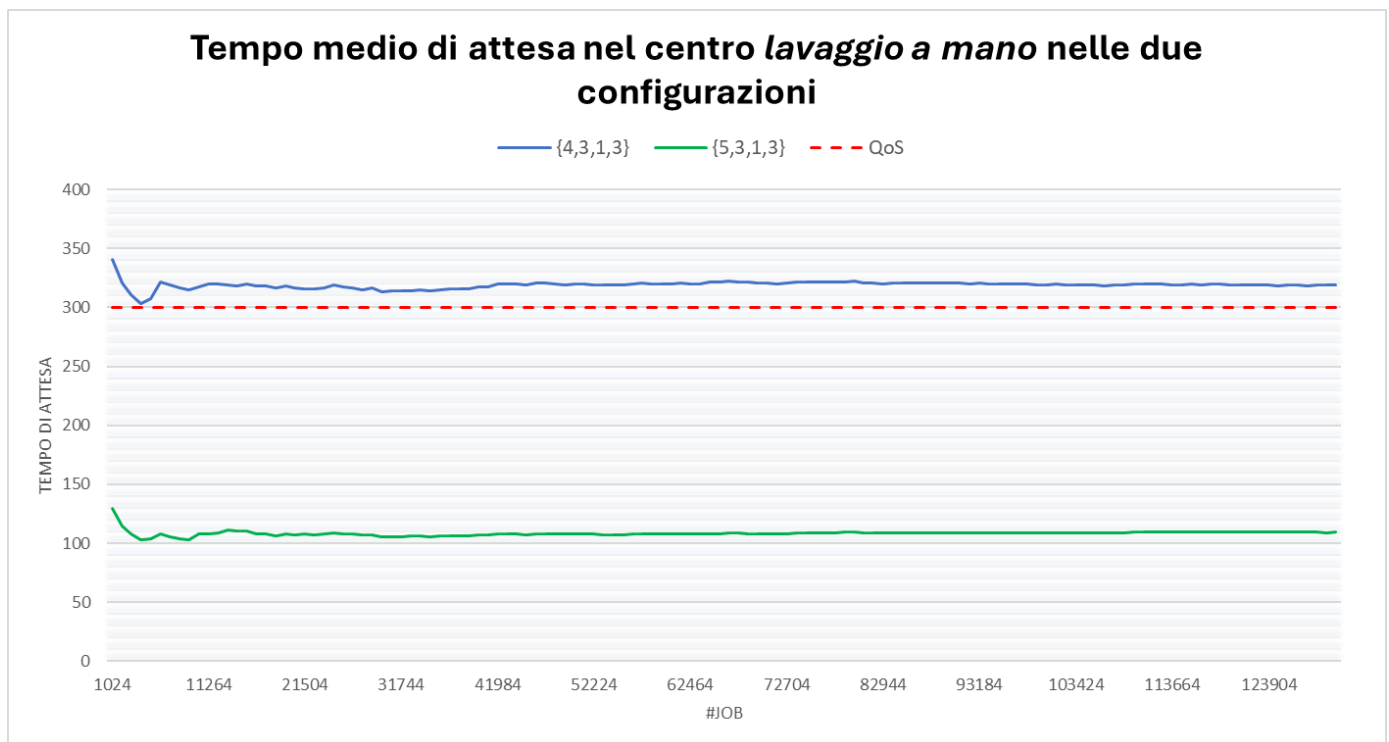
Per quanto riguarda il centro *lavaggio con rulli*, gli intervalli di confidenza calcolati per la configurazione {4,3,1,3} sono:

Utilizzazione-centro-2 -----	0.5066780775 +/- 0.0044763611
Tempo medio di attesa-centro-1 -----	62.5069703311 +/- 2.6592499368
Tempo medio di risposta-centro-1 -----	677.8575157098 +/- 3.9615655994
Numero abbandoni-centro-1 -----	1.8148437500 +/- 0.3749478061
Probabilità abbandono-centro-1 -----	0.0011215209 +/- 0.0003661599

Possiamo osservare che il requisito sul tempo di attesa viene rispettato in tale centro. Il tempo medio di attesa, infatti, pari a 62.51 s +/- 2.66, soddisfa ampiamente il nostro obiettivo di mantenere il tempo di attesa basso, confermando un'esperienza di servizio veloce per i clienti.

La nuova configurazione {5,3,1,3} ha dimostrato di avere un impatto positivo sulle prestazioni, migliorando ulteriormente la qualità del servizio. Anche se questo cambiamento ha comportato un leggero aumento dei costi operativi, ha consentito di soddisfare pienamente tutti e tre i requisiti di qualità del servizio (QoS) prefissati:

Tempo medio di attesa lavaggio a mano	109.1980080870218 +/- 4.274929392891962
Tempo medio di attesa lavaggio automatico	62.50697033110187 +/- 2.659249936875137
Probabilità abbandono lavaggio interni	0.031433105468749986 +/- 0.001260378567662939
Tempo medio di risposta complessivo auto che effettua <i>lavaggio a mano</i>	2578.2749294358 +/- 8.5468970784



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

Procediamo ora con una riduzione del numero di serventi nel centro *lavaggio interni*, al fine di valutare se è possibile ottenere un risparmio sui costi operativi, mantenendo comunque il soddisfacimento dei requisiti di qualità del servizio (QoS). La nostra sfida consiste nel trovare l'equilibrio perfetto tra l'allocazione delle risorse e l'efficienza operativa. Ridurre i macchinari (ossia i serventi) in questo centro è un passo significativo, ma dobbiamo farlo senza compromettere la soddisfazione dei clienti e mantenendo un tempo di attesa accettabile.

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.

Metriche	{5,3,1,3}	{5,3,1,2}
Tempo medio di risposta auto che ha effettuato lavaggio a mano	2578.2749294358 +/- 8.5468970784	2460.352892812 +/- 7.5209305207
Probabilità di abbandono del centro lavaggio interni	0.0314331054 +/- 0.0012603785	0.1577911376 +/- 0.0027353389
Costo	54560 €	54260 €

Rimuovendo un servente nel centro 4 (*lavaggio interni*), abbiamo constatato che tutti i requisiti di qualità del servizio (QoS) rimangono 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 simulazioni cercando di ridurre ulteriormente il numero di serventi nel centro *lavaggio interni*. Tuttavia, i risultati di queste simulazioni hanno rivelato un aumento significativo della probabilità di abbandono nel centro, che è salita a **0.4706649780 +/- 0.0028986665**. 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**.

8.2.2 Fascia oraria 14:30 – 19:00

Configurazione {5,3,1,2}

Poiché 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, siamo partiti dalla configurazione ottima trovata per la fascia oraria precedente, mantenendo quindi lo stesso numero di serventi. Ci aspettiamo che, mantenendo lo stesso numero di serventi per una fascia oraria con più traffico, le prestazioni del sistema peggiorino.

Le metriche prestazionali con tale configurazione nella seconda fascia oraria sono:

Utilizzazione-centro-1 ----- 0.9659264580 +/- 0.0021218392377407766
 Utilizzazione-centro-2 ----- 0.9113949597509604 +/- 0.004180414991989489
 Utilizzazione-centro-3 ----- 0.8551212315672573 +/- 0.004093915333483908
 Utilizzazione-centro-4 ----- 0.6175370205845073 +/- 0.002318416622336601

Tempo medio di attesa-centro-1 ----- **775.3839888224383 +/- 11.064964446031013**
 Tempo medio di attesa-centro-2 ----- **468.5530513464071 +/- 10.818889210726045**

Tempo medio di risposta-centro-1 ----- **2571.281238139112 +/- 11.812850552079434**

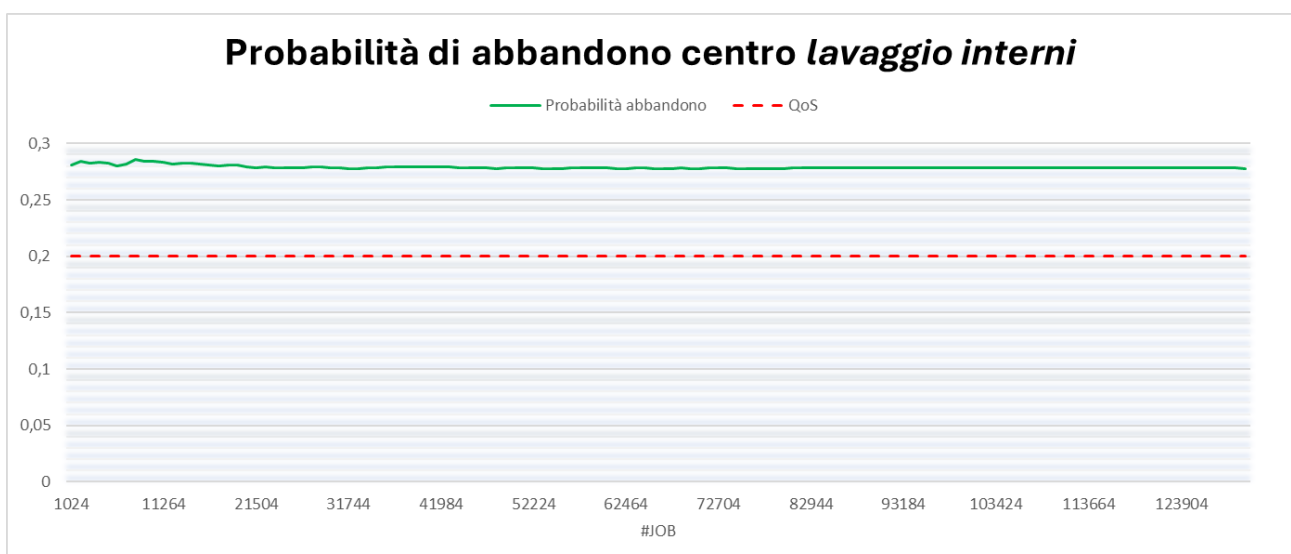
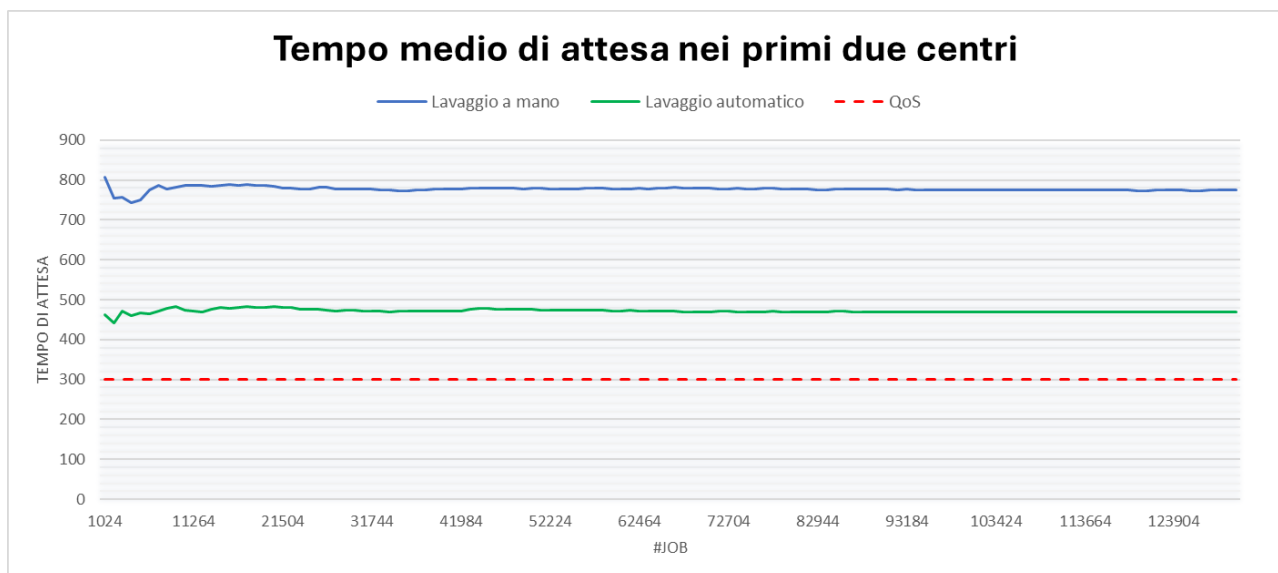
Tempo medio di risposta-centro-2 ----- 1083.8910427549372 +/- 12.00275312401242

Tempo medio di risposta-centro-3 ----- 307.8068864262171 +/- 7.266524880037177

Probabilità abbandono-centro-4 ----- **0.2779235839843749 +/- 0.002403004658238187**

Il tempo medio di risposta di un job che entra nel sistema effettuando il lavaggio a mano è di **3183,3195268523 +/- 7.266275310037177**, superiore al limite desiderato di 2700 secondi.

Si osserva quindi che, con tale configurazione, nessuno dei tre QoS viene rispettato, per cui è necessario modificare il numero di serventi nei vari centri, cercando di mantenere un livello contenuto di costi di gestione.



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

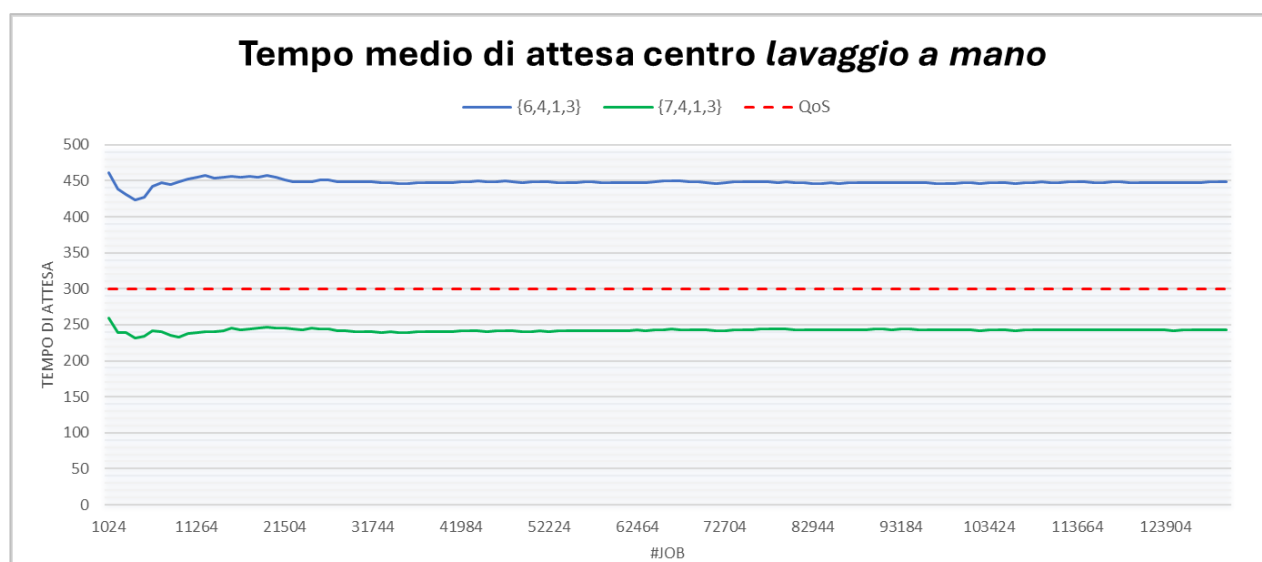
Metriche	{6,4,1,3}	{7,4,1,3}
Utilizzazione centro lavaggio a mano	0.9114134720 +/- 0.0035953150	0.8360290157273699 +/- 0.004211178889167693
Tempo medio di risposta auto che ha effettuato lavaggio a mano	3916.68481491685 +/- 24.576275225	3891.1619966598 +/- 96.5578744911
Tempo medio di attesa centro lavaggio a mano	448.4443527278 +/- 8.9787717741	242.8942500140 +/- 6.4368280275
Tempo medio di attesa centro lavaggio con rulli	149.1065259269 +/- 5.9012483278	149.10652592695803 +/- 5.9012483278581165
Probabilità di abbandono del centro lavaggio interni	0.11727142333984375 +/- 0.002203486486559394	0.11727142333984375 +/- 0.002203486486559394

Figura 6: Confronto tra le configurazioni {6,4,1,3} e {7,4,1,3}. In verde i QoS rispettati, in rosso i QoS violati.

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

Si è provato anche a diminuire il numero di serventi nel centro lavaggio interni, ma questo ha portato a un aumento nella probabilità di abbandono in tale centro, superando il requisito di QoS richiesto.

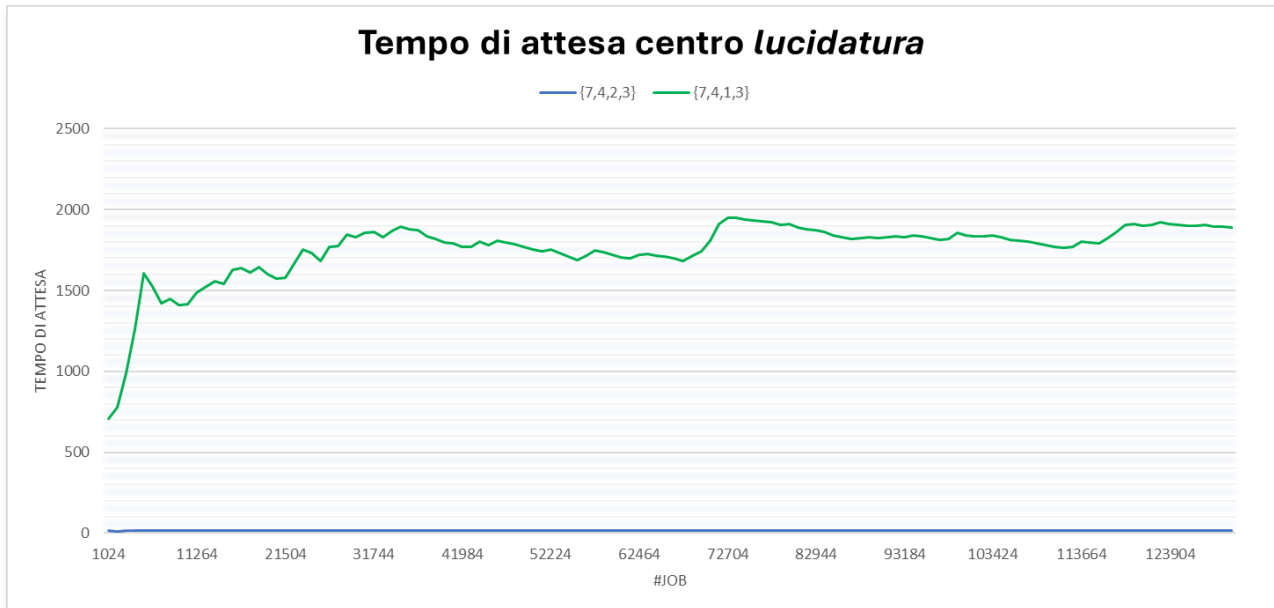
Sulla base di queste osservazioni, si è provato ad aumentare il numero di serventi nel primo centro, cercando di soddisfare tutti e 3 i requisiti di qualità, cercando sempre di rimanere entro un livello di costi non troppo elevato. Dalla tabella precedente si può osservare che, nonostante l'aumento di 1 del numero di serventi in tale centro, il tempo di risposta complessivo di un'auto che ha effettuato il lavaggio a mano continua a rimanere troppo elevato. 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 attesa di 1888.8466454387 +/- 333.4775811405, per cui si può ipotizzare che tale centro faccia rallentare di molto il tempo di risposta complessivo. Si cerca quindi di migliorare le prestazioni di tale centro, provando ad aumentarne il numero di server.



Configurazione {7,4,2,3}

Metriche	{7,4,1,3}	{7,4,2,3}
Tempo di attesa centro lucidatura	1888.8466454387 +/- 333.4775811405	16.9055849827 +/- 0.4644716036

Dagli intervalli di confidenza prodotti dalla simulazione si può osservare come, aumentando anche solo di 1 servente il centro 3, si ottiene un netto miglioramento del tempo di attesa di tale centro (con un conseguente miglioramento del tempo di risposta):



Grazie alla configurazione **{7,4,2,3}**, si riesce ad ottenere un tempo di risposta globale per gli utenti che fanno il lavaggio a mano di 2576.6741678598 +/- 5.6752356579, e un'utilizzazione del centro 3 pari a 0.5363850056 +/- 0.0028945740, mentre prima era 0.9557744172 +/- 0.0081383435. In questo modo, si soddisfano tutti e 3 i QoS.

Con tale configurazione, il costo è di **62.740€**.

Successivamente, è stato eseguito un ulteriore tentativo di riduzione del numero di serventi negli altri centri, mantenendo comunque un numero di server per i centri 2 (lavaggio automatico) 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 serventi ha portato alla violazione dei QoS definiti. Ciò indica che la configurazione ottimalmente precedentemente identificata rappresenta un punto di equilibrio tra il numero di serventi 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}.

8.2.3 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}**

8.3 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. Inoltre, per le simulazioni è stato scelto uno stato iniziale corrispondente al sistema vuoto. Ogni replicazione è volta a misurare indipendentemente le stesse metriche, fornendo un punto di stima utile per calcolare gli intervalli di confidenza per ognuna di esse. Le repliche, infatti, vengono utilizzate per generare stime indipendenti della stessa statistica transitoria; pertanto, il seme iniziale per ogni replica deve essere scelto in modo che non vi sia alcuna sovrapposizione da replica a replica nella sequenza di numeri casuali utilizzati.

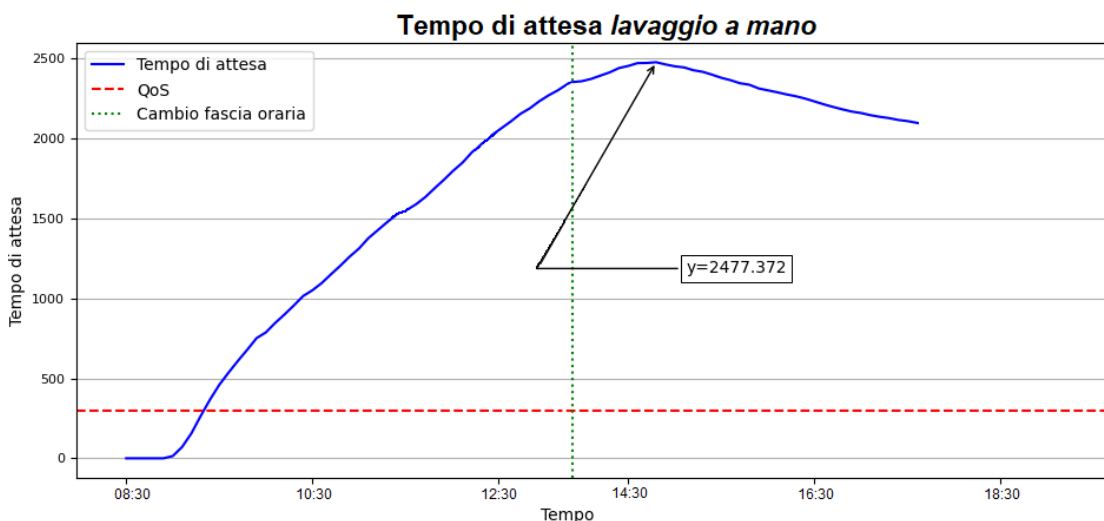
Come da linee guida^[5], il seed viene impostato tramite `PLantSeeds()` fuori dal ciclo di replicazione, mentre tra una simulazione e la successiva si riutilizza lo stato finale di ogni stream. In questo modo è possibile generare stime indipendenti della stessa statistica transiente, evitando possibili sovrapposizioni degli eventi generati dalle singole repliche. Per calcolare la media campionaria e l'intervallo di confidenza al 95%, è stato utilizzato il programma `estimate.py`, che utilizza il metodo one-pass di Welford, per calcolare gli intervalli di confidenza per ogni centro e per ogni statistica di interesse.

La simulazione termina quando viene raggiunto l'orario di chiusura (17:30), corrispondente a 32400 secondi (= 9 ore).

8.3.1 Configurazione {2, 2, 1, 2}, {10,9,6,9} – UNDER PROVISIONING

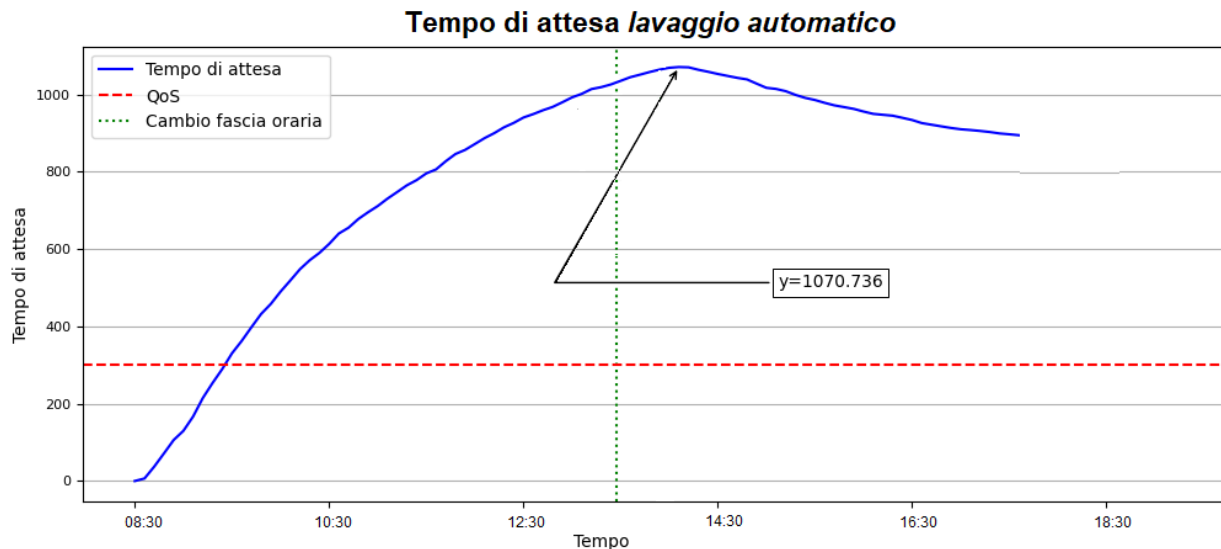
Nella prima fascia oraria abbiamo allocato un numero limitato di serventi in ogni centro, come definito nella configurazione {2, 2, 1, 2}. Tuttavia, questa configurazione si è rivelata sottodimensionata per gestire il flusso di arrivi, in quanto numero di serventi assegnati non è sufficiente a mantenere il sistema stabile, risultando in tempi di attesa e tempi di risposta che superano i nostri obiettivi di qualità del servizio.

Per smaltire il traffico accumulato durante la prima fascia oraria abbiamo adottato una configurazione sovradimensionata {10, 9, 6, 9} nella seconda fascia. Questo significa che abbiamo allocato un numero significativamente maggiore di serventi in ogni centro rispetto a quanto effettivamente richiesto. Questo approccio ha permesso di smaltire il traffico accumulato in precedenza, ma tale configurazione ha comportato un eccesso di risorse impiegate rispetto a quanto realmente necessario.



Come si osserva dal grafico precedente, nella prima fascia oraria aumenta il tempo di attesa nel centro *lavaggio a mano*, in quanto il sistema è instabile. Al cambio di fascia oraria vengono attivati molti più server, e ciò porta il sistema a smaltire velocemente i job rimasti in coda dalla prima fascia, per poi avere una decrescita del tempo di attesa medio.

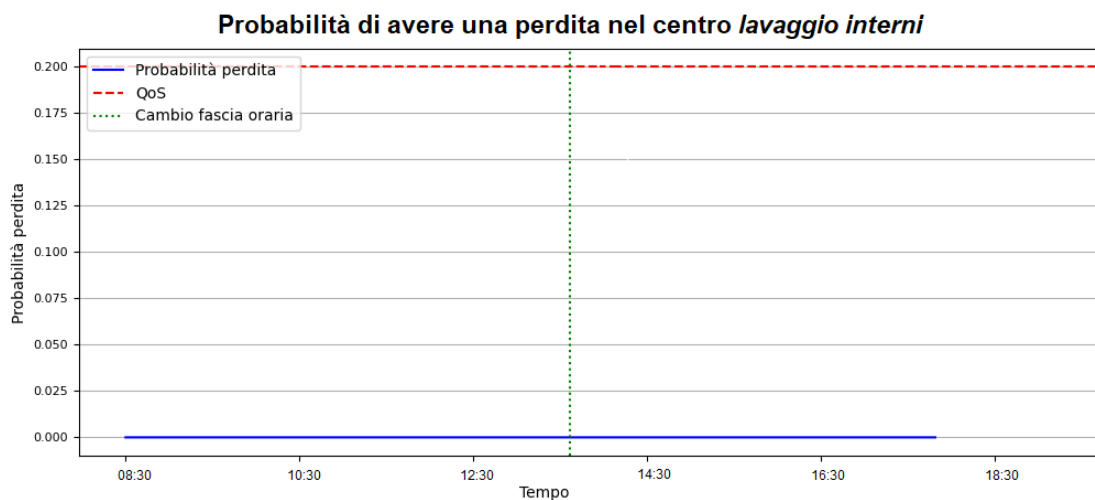
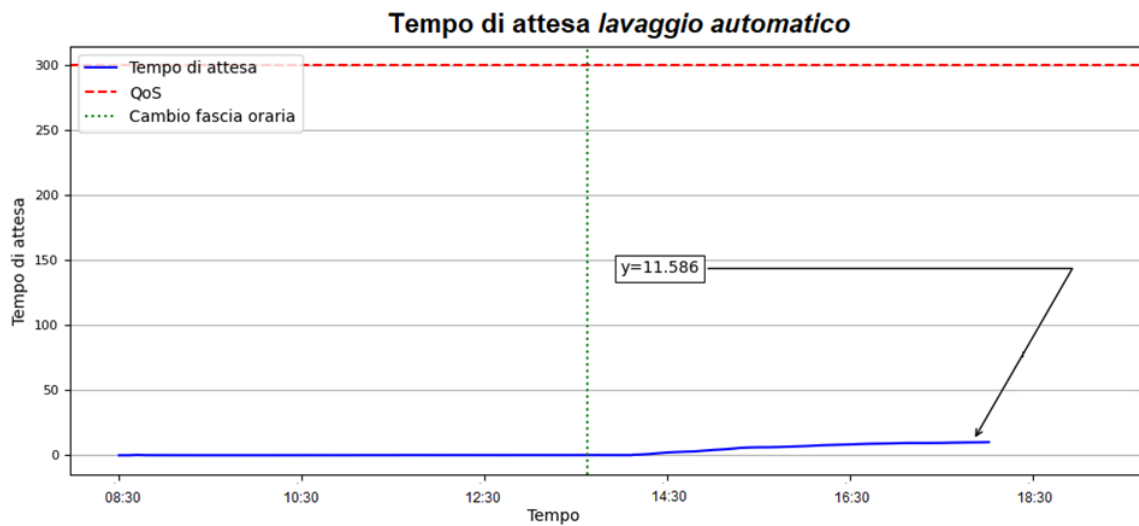
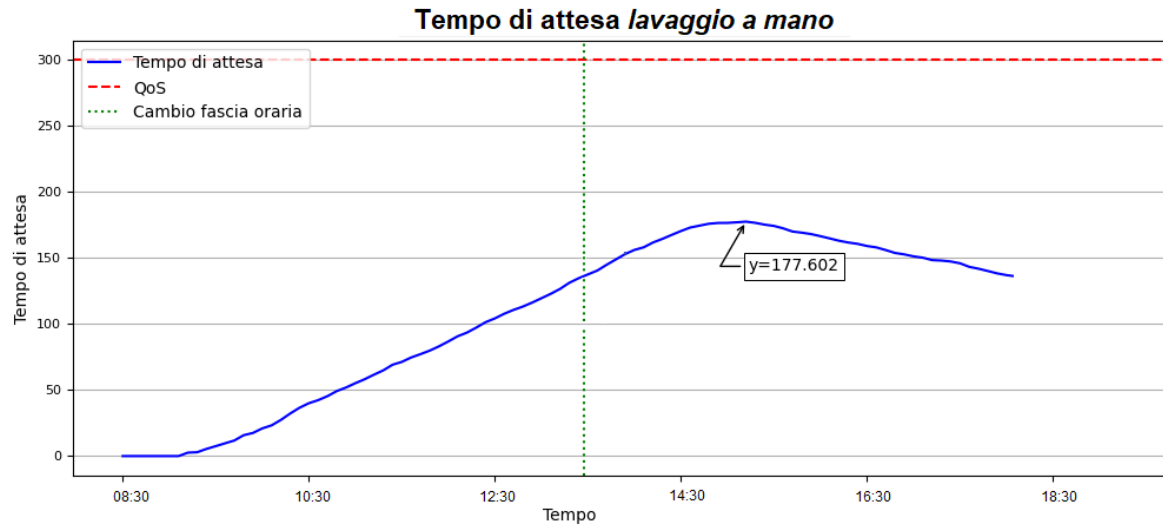
Situazione analoga accade per il centro *lavaggio automatico*:



Al termine della giornata lavorativa i tempi di attesa nei due centri rimangono comunque superiori al limite di 300 secondi.

8.3.2 Configurazione {7, 7, 6, 9}, {10,9,6,9} – OVER PROVISIONING

La configurazione {7, 7, 6, 9} risulta essere una situazione di "over provisioning", che significa che sono state allocate più risorse o capacità di quelle necessarie per soddisfare le esigenze del sistema. In altre parole, ci sono più server rispetto a quelli necessari per gestire il carico di lavoro effettivo. Questo tipo di configurazione può portare a risultati interessanti nelle simulazioni, poiché ci si aspetta che il tempo di risposta e di attesa medi siano generalmente inferiori ai requisiti di qualità del servizio (QoS), dato il surplus di risorse a disposizione. Tuttavia, può anche comportare costi operativi più elevati a causa dell'allocazione eccessiva di personale o risorse.



Nel caso specifico della configurazione {7, 7, 6, 9}, è probabile che il sistema sia in grado di gestire il carico di lavoro agevolmente e che i tempi di attesa e di risposta siano ben al di sotto dei limiti desiderati. Questo potrebbe essere un risultato positivo, ma è importante considerare anche l'aspetto dei costi operativi, poiché mantenere un numero eccessivo di serventi può comportare spese aggiuntive.

Come osserviamo dai grafici, i tempi di attesa nei primi due centri sono nettamente inferiori al limite stabilito. Dal grafico relativo al centro *lavaggio automatico* si può osservare che il tempo di attesa medio sembra raggiungere la stazionarietà nella seconda fascia oraria.

Siamo quindi ampiamente al di sotto del limite di 300 secondi imposto dal QoS, ma il costo totale della configurazione nelle 9 ore lavorative è di **75.380€**, sicuramente migliorabile.

8.3.3 Configurazione {5, 6, 1, 5}, {7,6,4,5} – OTTIMO

Partendo dalla configurazione ottima trovata tramite la simulazione ad orizzonte infinito, ossia:

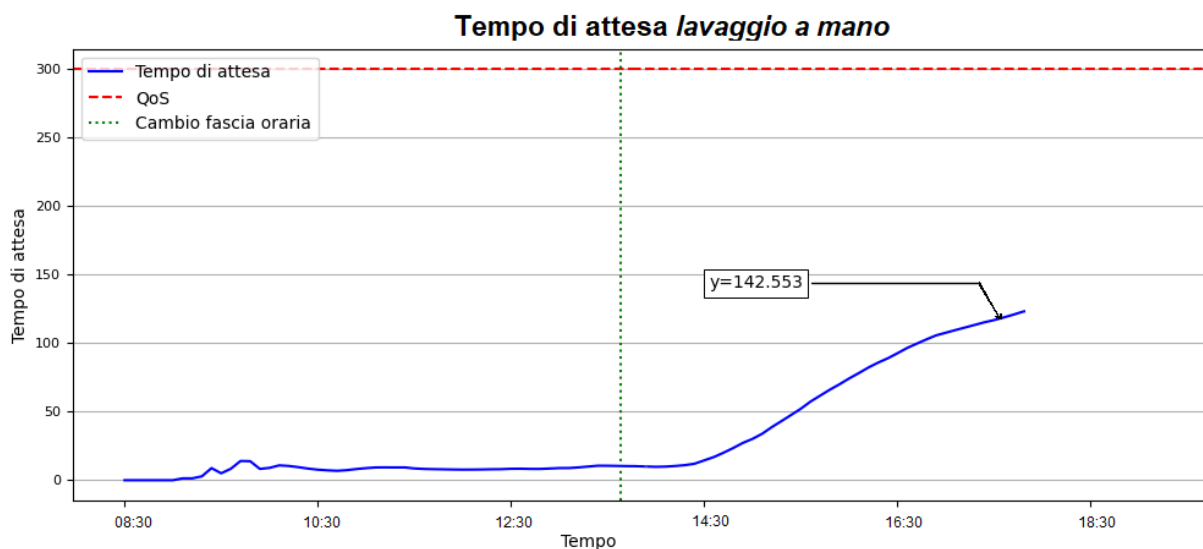
- 08:30 – 13:00 → {5,4,1,3}
- 14:30 – 19:00 → {7,4,2,3}

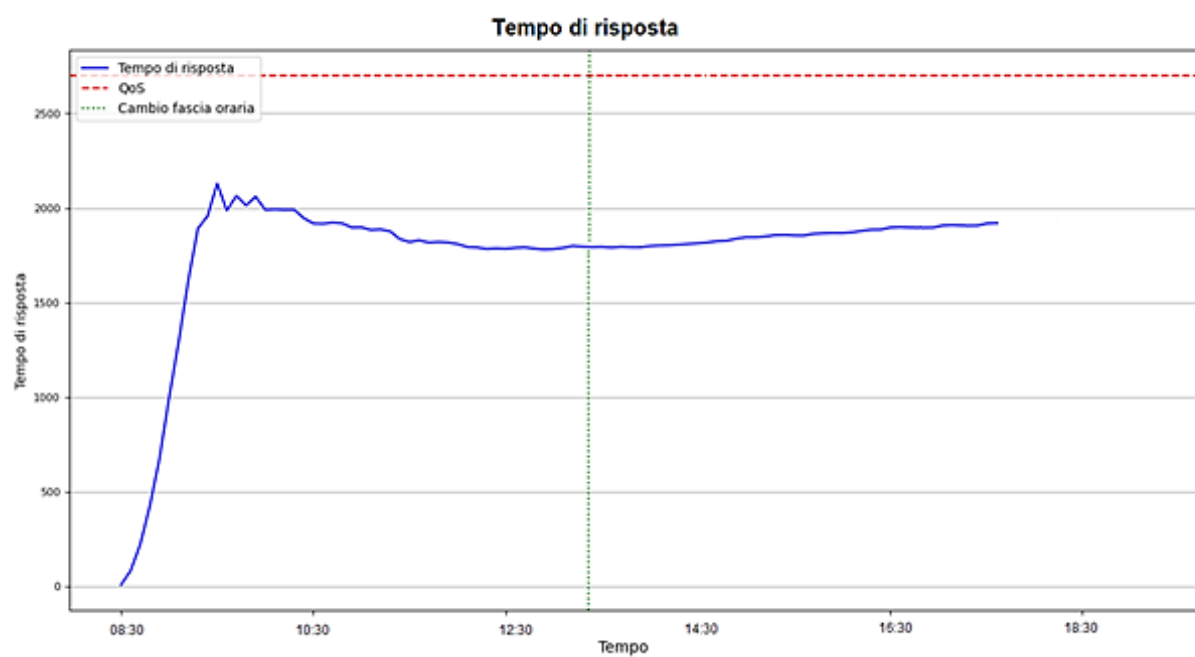
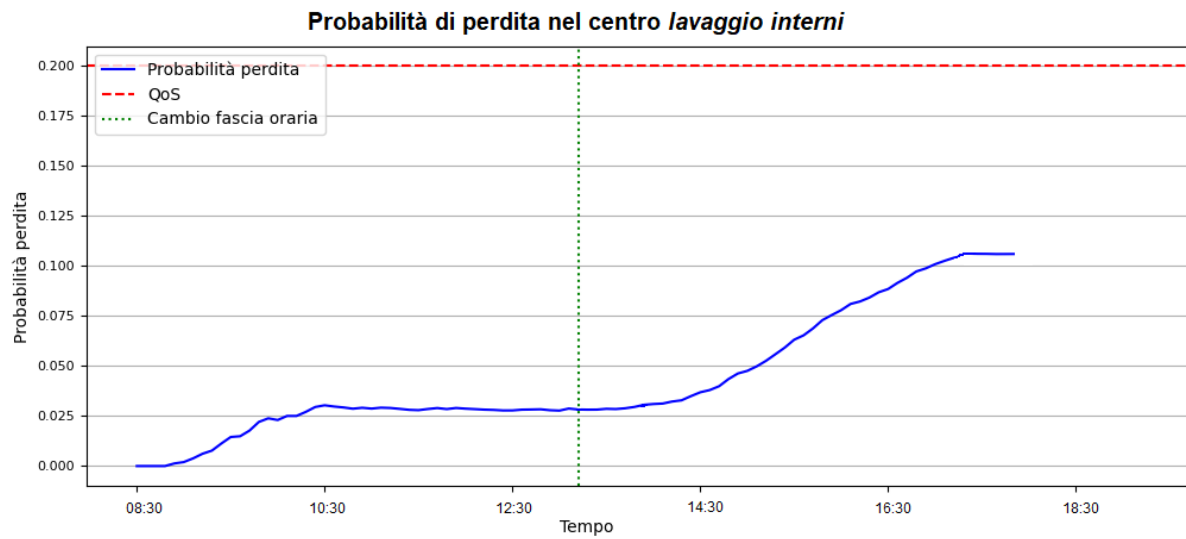
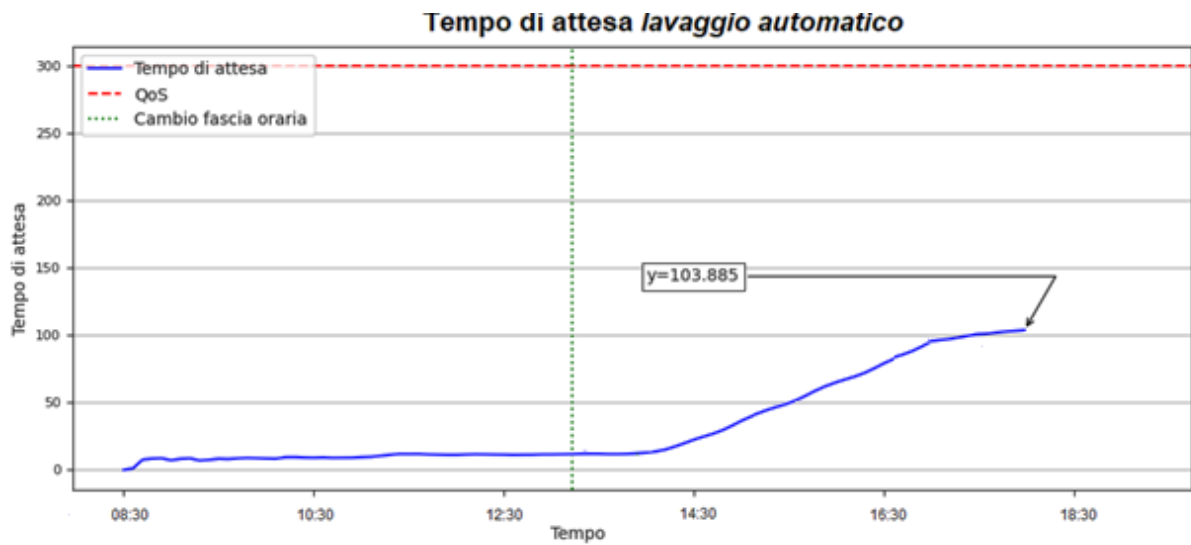
sono stati effettuati opportuni esperimenti aumentando il numero di serventi nei vari centri, con l'intento di diminuire le perdite e massimizzare il profitto dell'autolavaggio, pur mantenendo soddisfatti i QoS richiesti.

Come prima cosa, ci siamo concentrati sulla seconda fascia oraria, essendo quella con maggior traffico, aumentando il numero di serventi nei centri più affollati (in primis nel centro *lavaggio a mano*, in quanto la maggior parte del traffico si riversa verso tale centro). 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. Nel momento in cui abbiamo notato una diminuzione del profitto (dovuto a costi di gestione derivanti dall'aumento dei serventi), ci siamo concentrati sull'aumento di serventi negli altri centri, cercando di aumentare il guadagno.

A questo punto, ci siamo occupati della prima fascia oraria, tenendo conto del fatto che il centro 2 e il centro 4 devono avere lo stesso numero di serventi nelle due fasce orarie.

Si è arrivati così alla soluzione {5,6,1,5},{7,6,4,5}, grazie alla quale si ottengono le statistiche riportate nei grafici seguenti. Tale configurazione permette di avere il minimo costo sulle 9 ore (e quindi di avere il massimo profitto) e di rispettare i QoS stabiliti.





Dai grafici si può osservare che i requisiti di qualità relativi ai tempi di attesa e alla probabilità di perdita sono soddisfatti. Il tempo medio di risposta complessivo risulta essere di 2369.776582 +/- 25.238367 secondi, che soddisfa il requisito di qualità di 2700 secondi.

Vediamo che nella prima fascia oraria, nel centro *lavaggio a mano* si parte da un tempo di attesa molto basso, per poi stabilizzarsi intorno al valore medio alle 11:00 circa. Questo comportamento è ragionevole, in quanto il sistema è inizialmente *idle* e quindi per i primi arrivi si avranno tempi di risposta molto bassi.

Tramite questa configurazione, si ha un guadagno mensile di **635.597,48€**, e un costo di **50.874€**, nettamente inferiore dei **75.380€** visti nella configurazione di over-provisioning.

Tale configurazione è quindi considerata come la configurazione ottima dei serventi nei vari centri e nelle diverse fasce orarie, in quanto permette di soddisfare tutti i requisiti di qualità imposti con un costo di gestione tollerabile.

9 CONCLUSIONI

Le configurazioni che consentono di massimizzare il profitto mensile sono quindi:

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

Le quali consentono un guadagno mensile di **635.597,48€**.

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

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.openpolis.it/numeri/negli-anni-e-aumentato-il-numero-di-automobili/>
- [2] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_EQS_CARHAB_custom_2930041/default/table?lang=en
- [3] Brown C 2002 Water use in the professional carwash industry. A Report for the International Carwash Association (Chicago:International Carwash Association Inc.) p.52
- [4] <https://www.anfia.it/data/studi-e-statistiche/automobili-cifre/statistiche-italia/circolante/gruppo-a/18avregioneannoimm.xlsx>
- [5] Hill, R. Discrete-Event Simulation: A First Course. J Simulation 1, 371
- [6] <https://github.com/pdsteele/DES-Python/blob/master/acs.py>
- [7] S. Kurkowski, T. Camp, M. Colagrosso, MANET Simulation Studies: The Incredibles, Mobile Computing and Communications Review, Volume 9, Number 4, October 2005