POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale – Percorso Logistica

Tesi di Laurea di II livello

Analisi di una rete di trasporto su gomma basata su autoarticolati elettrici con tecnologia Battery Swap

Relatori:

Prof. Franco Lombardi
Prof.ssa Giulia Bruno
Ing. Alberto Faveto
Ing. Luigi Panza

Candidato:

Filippo Cassano

Anno Accademico 2021-2022

Ringraziamenti

Ringrazio il professor Franco Lombardi e la professoressa Giulia Bruno per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro di tesi e i dottorandi Alberto Faveto e Luigi Panza per avermi seguito nella realizzazione.

Un ringraziamento particolare va alla mia famiglia, che mi ha supportato in tutti questi anni, e agli amici di sempre, con cui spero di poter condividere il mio percorso di vita ancora a lungo.

Abstract

Negli ultimi anni, si è cercato di ridurre sempre di più le emissioni di gas serra e di polveri sottili nel settore dei trasporti. In ambito automotive si sta assistendo ad una vera e propria rivoluzione tecnologica, che vede nell'elettrificazione la soluzione al momento dominante. Gran parte delle case produttrici hanno inserito nelle proprie gamme dei veicoli elettrici e le quote di mercato di questi ultimi crescono costantemente. Nonostante questo, le tecnologie ad oggi in commercio presentano dei limiti non trascurabili che le rendono ancora poco competitive rispetto alle motorizzazioni tradizionali a combustione interna. Tra questi vi sono i tempi di ricarica e il costo delle batterie ancora troppo elevati. Se per quest'ultimo aspetto si prospetta un rapido calo dei prezzi, favorito dal progresso tecnologico e dalle economie di scala, vi sono molte più incertezze riguardo alla diminuzione dei tempi di ricarica, soprattutto per mezzi che ospitano batterie molto capienti, come i veicoli pesanti a lungo raggio. Proprio per questo motivo, la produzione e diffusione di camion elettrici si trova in una situazione di forte ritardo rispetto a mezzi quali automobili, furgoni o veicoli a due ruote. Una delle soluzioni tecnologiche presenti al momento, che permetterebbe di superare tali ostacoli, è il Battery Swap, che consiste nella sostituzione delle batterie scariche con batterie precedentemente caricate. Questa tecnologia offre vari vantaggi, tra i quali permettere un tempo di scambio di pochi minuti, piuttosto che una ricarica di diverse ore.

Il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di valutare l'applicazione della tecnologia Battery Swap nel settore del trasporto pesante su gomma. In un primo momento è stata condotta un'analisi riguardante la tecnologia e gli sviluppi di mercato. In seguito, è stato proposto un modello di ottimizzazione matematica, più precisamente di Programmazione Lineare Intera (PLI), per dimensionare le stazioni di una rete per il Battery Swap. La verifica dell'effettivo funzionamento del servizio e la validazione dei risultati ottenuti dall'ottimizzatore sono stati effettuati tramite la creazione e l'utilizzo di un modello di simulazione a eventi discreti. Tale modello riproduce il caso studio di un servizio logistico operante sul territorio italiano attraverso le due principali dorsali autostradali nazionali e tramite l'uso di autoarticolati elettrici, serviti da una rete di stazioni per lo scambio e la ricarica delle batterie. Sono stati condotti diversi esperimenti per testare la risposta del modello al variare dei parametri di input e verificare la robustezza delle soluzioni.

Indice

Ringraziamenti III
Abstract V
Indice VI
Indice delle tabelle VIII
Indice delle figure IX

1. Introduzione 1
2. Analisi e sviluppi delle tecnologie considerate 4
2.1 La tecnologia Battery Swap 4
2.1.1 I vantaggi della tecnologia Battery Swap 4
2.1.2 Gli svantaggi della tecnologia Battery Swap 6
2.1.3 Storia e mercato della tecnologia Battery Swap 7
2.2 Veicoli commerciali pesanti elettrici 16
3. Strumenti di analisi utilizzati 21
3.1 La ricerca operativa 21
3.1.1 L'ottimizzazione 22
3.1.2 La simulazione 24
3.2 Stato dell'arte del problema 26
4. Il caso studio 29
4.1 Scelte riguardanti i dati di input 29
5. Il modello di ottimizzazione 39
5.1 Impostazione del modello di ottimizzazione e assunzioni 39
5.2 Spiegazione del modello di ottimizzazione 40
5.3 Risoluzione del modello di ottimizzazione 47
5.4 Risultati del modello di ottimizzazione 57
5.4.1 Risultati dell'ottimizzazione relativi allo scenario 1 57
5.4.2 Risultati dell'ottimizzazione relativi allo scenario 2 59
6. Il modello di simulazione 61
6.1 Impostazioni del modello di simulazione e assunzioni 61
6.2 Spiegazione del modello di simulazione 62
6.3 Risoluzione del modello di simulazione 71
6.4 Risultati del modello di simulazione 72
6.4.1 Risultati della simulazione relativi allo scenario 1 72

6.4.2 Risultati della simulazione relativi allo scenario 2 77
7. Conclusioni 81

Appendice A - Risultati dell'ottimizzazione relativa allo scenario 1 83
Appendice B - Risultati dell'ottimizzazione relativa allo scenario 2 85
Appendice C - Risultati di una simulazione relativa allo scenario 1 87
Appendice D - Risultati di una simulazione relativa allo scenario 2 95

Bibliografia 103
Sitografia 105

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Valori attribuiti ai parametri di input per la risoluzione del modello di ottimizzazione 30
Tabella 2 - Dati di percorrenza e consumo di batterie relativi ad ogni tratta 31
Tabella 3 - Suddivisione degli autoarticolati per tratta autostradale.....31
Tabella 4 - Nuova domanda di batterie per ogni BSS e ogni intervallo di tempo 37
Tabella 5 - Nuova offerta di batterie per ogni BSS e ogni intervallo di tempo 37
Tabella 6 - Nuova domanda di batterie durante il primo giorno di attività.....37
Tabella 7 - Nuova offerta di batterie durante il primo giorno di attività 38
Tabella 8 - Risultati principali dell'ottimizzazione nello scenario 1.....57
Tabella 9 - Risultati principali dell'ottimizzazione nello scenario 2 59
Tabella 10- Risultati della simulazione relativi allo scenario 1 74
Tabella 11 - Riduzione delle batterie per testare la robustezza dei risultati dell'ottimizzazione nello scenario 1 74
Tabella 12 - Risultati della simulazione relativi allo scenario 1 con quantità di batterie ridotte.....76
Tabella 13 - Riduzione delle batterie per testare la robustezza dei risultati dell'ottimizzazione nello scenario 2 77
Tabella 14 - Risultati della simulazione relativi allo scenario 1 con quantità di batterie ridotte 79

Indice delle figure

Figura 1 - Percentuale di emissioni totali di gas serra nell'UE 1
Figura 2 - Ripartizione delle emissioni per tipologia di trasporto (2016) 2
Figura 3 - Andamento delle emissioni di CO_2 in Europa per settore (1990 - 2016) 2
Figura 4 - Funzionamento della tecnologia Battery Swap 4
Figura 5 - Stazione per il Battery Swapping 6
Figura 6 - Business model di Better Place per il Battery Swapping 8
Figura 7 - BSS di Better Place 9
Figura 8 - Business model di Tesla per il Battery Swapping 10
Figura 9 - Rete di Ricarica NIO in Cina (Dicembre 2021) 11
Figura 10 - BSS di NIO 12
Figura 11 - BSS di Geely 13
Figura 12 - BSS di Ample 14
Figura 13 - BSS di Gogoro 15
Figura 14 - Gamma di camion elettrici Volvo. 17
Figura 15 - Camion elettrico Mercedes eActros 18
Figura 16 - Gamma di Camion elettrici Nikola Motor 19
Figura 17 - Camion elettrico Tesla Semi 20
Figura 18 - Classificazione dei modelli di simulazione. 25
Figura 19 - Rappresentazione dei viaggi e degli intervalli di scambio batterie relativi alla tratta Torino - Bologna - Roma, direzione Roma 32
Figura 20 - Richieste di sostituzione per le BSS di Torino e Bologna, relativamente ai viaggi della tratta Torino - Bologna - Roma, percorsa in direzione Roma 32
Figura 21 - Rappresentazione dei viaggi e degli intervalli di scambio batterie relativi alla tratta Torino - Bologna - Roma, direzione Torino 32
Figura 22 - Richieste di sostituzione per le BSS di Torino e Bologna, relativamente ai viaggi della tratta Torino - Bologna - Roma, percorsa in direzione Torino 33
Figura 23 - Domanda totale relativa alla tratta Torino - Bologna - Roma 33
Figura 24 - Offerta totale relativa alla tratta Torino - Bologna - Roma 33
Figura 25 - Domanda totale giornaliera per ogni stazione della rete 35
Figura 26 - Offerta totale giornaliera per ogni stazione della rete 36
Figura 27 - Schema della modellizzazione del funzionamento di una BSS. 43
Figura 28 - Logo di MATLAB 48
Figura 29 - Confronto delle domande nelle BSS di Milano e Salerno 58

Figura 30 - Logo FlexSim. 61
Figura 31 - Schermata dell'interfaccia di FlexSim 63
Figura 32 - Token all'interno del process flow 63
Figura 33 - Schermata del modello di simulazione 3D su FlexSim 64
Figura 34 - Rappresentazione della BSS di Roma nel modello 3D di FlexSIm 64
Figura 35 - Rappresentazione della flotta di autoarticolati nel modello 3D di FlexSim 65
Figura 36 - Rappresentazione dei viaggi degli autoarticolati lungo le tratte autostradali nel modello 3D di FlexSim 65
Figura 37 - Sezione "Truck process" presente nel process flow del modello di FlexSim 66
Figura 38 - Sezione "Batteries creation" presente nel process flow del modello di FlexSim 66
Figura 39 - Sezione "Battery Swap stations" presente nel process flow del modello di FlexSim 66
Figura 40 - Sottosezione che modellizza il funzionamento della singola tratta nel process flow del modello di FlexSim 67
Figura 41 - Tabella relativa ad una singola tratta utilizzata nel modello di FlexSim 69
Figura 42 - Esempio di distribuzione lognormale 70
Figura 43 - Modellizzazione su FlexSim della funzione di distribuzione utilizzata per i moduli "delay" 70
Figura 44 - Sottosezione che modellizza il funzionamento della singola BSS nel process flow del modello di FlexSim 71

1. Introduzione

In una società caratterizzata da un'economia sempre più veloce e interconnessa i trasporti svolgono un ruolo essenziale e la qualità della vita è sempre più legata all'efficienza logistica. Allo stesso tempo i trasporti sono una delle fonti principali di emissione nell'atmosfera di gas a effetto serra e particolato, oltre all'inquinamento acustico e all'impatto ambientale delle infrastrutture che ne permettono il funzionamento.

Secondo i dati dell'Agenzia europea dell'ambiente i trasporti consumano un terzo di tutta l'energia finale nell'UE e poiché i combustibili fossili rappresentano la fonte primaria di alimentazione dei veicoli fino ad ora, ciò significa che tale settore è responsabile di buona parte delle emissioni di gas a effetto serra nell'UE e contribuisce in larga misura ai cambiamenti climatici. Come si può osservare in *Figura 1*, i trasporti incidono per più di un quarto delle emissioni di gas serra in UE e non è prevista un'inversione di tendenza, di queste oltre il 70% sono generate da autovetture, furgoni, camion, moto e autobus, la quota restante proviene principalmente dal trasporto marittimo e aereo (*Figura 2*). Inoltre, come osservabile in *Figura 3*, a differenza di altri settori come quello della produzione di energia elettrica e dell'industria, che hanno diminuito le proprie emissioni nell'Unione Europea dal 1990, le emissioni da trasporto sono aumentate ulteriormente negli anni. Per tali ragioni il settore dei trasporti costituisce un importante ostacolo alla realizzazione degli obiettivi dell'UE in materia di protezione del clima.

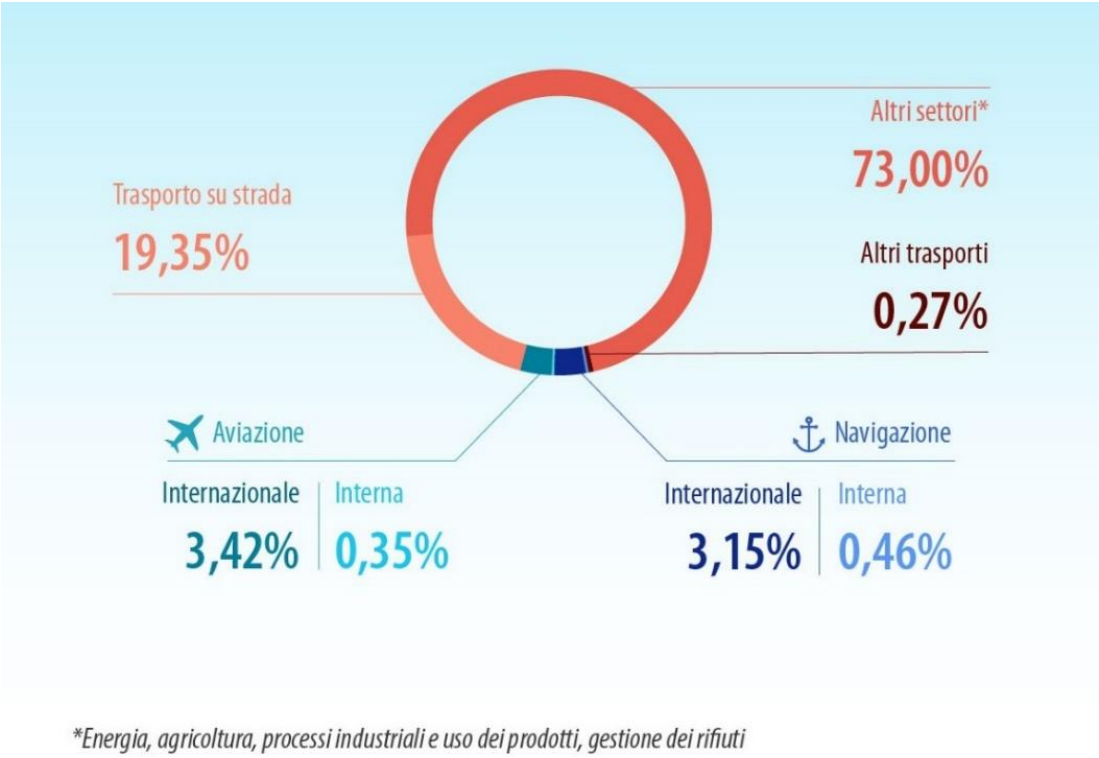


Figura 1 - Percentuale di emissioni totali di gas serra nell'UE
Fonte infografica: sito Parlamento Europeo[1]
Fonte dati: Agenzia europea dell'ambiente

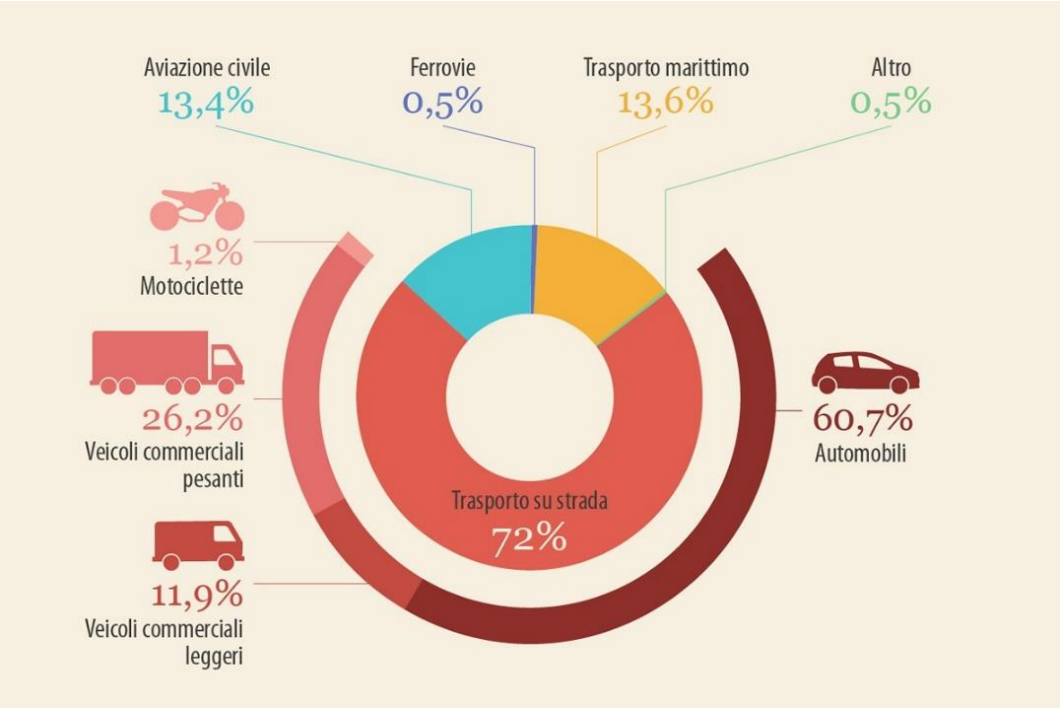


Figura 2 - Ripartizione delle emissioni per tipologia di trasporto (2016)
Fonte infografica: sito Parlamento Europeo[2]
Fonte dati: Agenzia europea dell'ambiente

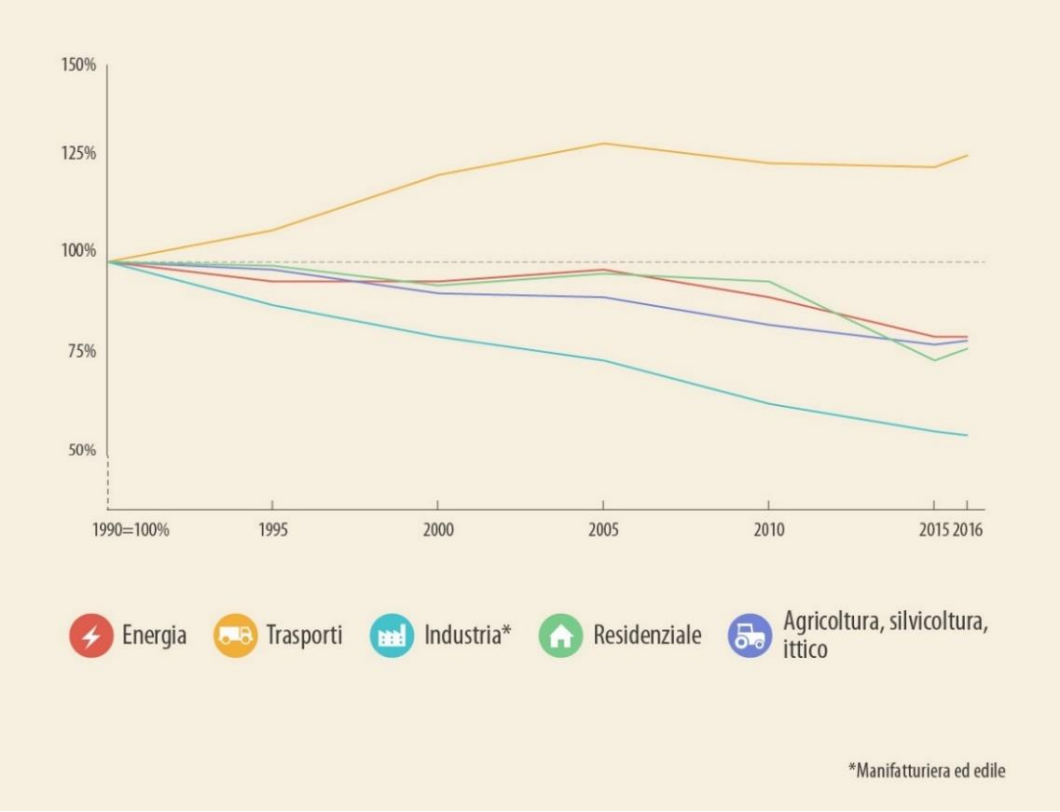


Figura 3 - Andamento delle emissioni di CO_2 in Europa per settore (1990 - 2016)
Fonte infografica: sito Parlamento Europeo[2]
Fonte dati: Agenzia europea dell'ambiente

Oltre ai gas a effetto serra, i trasporti sono responsabili anche di rilasciare inquinanti atmosferici, come il particolato (PM) e il biossido di azoto (NO_2), causando problemi di salute soprattutto in ambienti cittadini. Nonostante i progressi e i miglioramenti ottenuti in tale campo negli ultimi dieci anni, dovuti all'introduzione di norme di qualità per i carburanti, alle norme EURO sulle emissioni dei veicoli e all'uso di tecnologie più pulite, le concentrazioni di inquinanti atmosferici sono ancora troppo elevate.

Da anni ormai si discute di mobilità sostenibile e di transizione energetica nel mondo dei trasporti. I veicoli elettrici a batteria rappresentano la tecnologia che più si sta imponendo sul mercato a tal proposito e negli ultimi anni è stato possibile osservare una prima concreta diffusione sulle strade e la messa in commercio di moltissimi modelli da parte delle case produttrici di veicoli di ogni genere.

Ad un trend positivo delle vendite si affiancano gli importanti progressi tecnologici che hanno coinvolto le batterie e le metodologie di ricarica. La propulsione elettrica a batterie è stata infatti individuata da molti come una soluzione ai problemi ambientali legati al trasporto, ma non si tratta di certo di una novità nel panorama del settore automotive. Gli ostacoli di tipo tecnologico quali i tempi di ricarica, la dimensione, l'autonomia e il costo delle batterie, oltre alla creazione di una rete di ricarica diffusa, hanno fatto sì che le motorizzazioni tradizionali a combustione dominassero il mercato fino ai tempi recenti. Lo stato di innovazione attuale ha permesso una prima diffusione sulle strade, ma i limiti di tale tecnologia sono ancora rilevanti. Nel futuro prossimo si prevedono importanti diminuzioni di costo delle batterie, aumento di autonomia e diffusione della rete di ricarica, ma un problema che, seppur migliorando nel tempo, difficilmente permetterà di eguagliare la comodità e l'efficacia dei veicoli tradizionali è la durata della ricarica.

La tecnologia Battery Swap si pone in modo complementare all'uso di batterie e motori elettrici per superare proprio l'ostacolo dei lunghi tempi di ricarica. Il capitolo seguente fornisce un'analisi più approfondita di tale tecnologia, del suo funzionamento e di vantaggi e svantaggi che la caratterizzano.

2. Analisi e sviluppi delle tecnologie considerate

2.1 La tecnologia Battery Swap

Un sistema Battery Swap prevede la sostituzione di una o più batterie scariche presenti a bordo del veicolo con batterie cariche, in modo da eliminare i lunghi tempi di ricarica e permettere rifornimenti di pochi di minuti, tempi paragonabili, se non inferiori, a quelli dei veicoli tradizionali a carburante. Le batterie vengono poi caricate separatamente e in maniera più efficiente, non dovendo ricorrere ad esempio a ricariche molto veloci, che contribuiscono fortemente al degrado, o ricaricando in momenti in cui l'energia elettrica ha un costo minore.

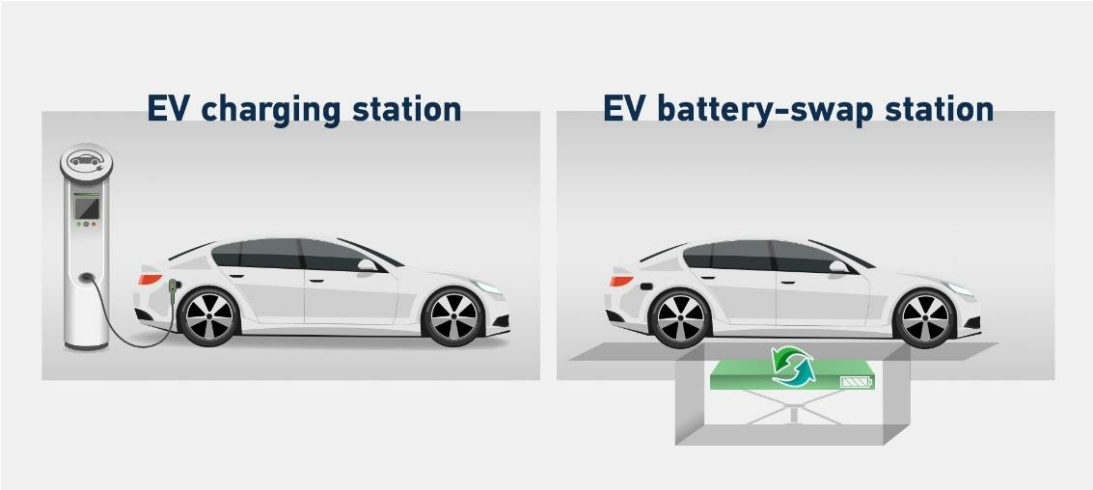


Figura 4 - Funzionamento della tecnologia Battery Swap
Fonte: sito GTCN[4]

Tale sistema può poi essere implementato in diversi modi e utilizzando diverse formule commerciali. In base al tipo e allo scopo del veicolo, si può ad esempio concepire un sistema di sostituzione totalmente automatizzato o uno scambio effettuato con l'ausilio di un operatore. La gestione delle batterie costituisce dunque un servizio a sé, che può essere fornito dalle case produttrici di automobili, da società che gestiscono una flotta di veicoli, come società di trasporto pubblico o car sharing, società di raccolta rifiuti o aziende logistiche, ma può essere anche implementato da società totalmente esterne, che fanno della gestione, ricarica e movimentazione delle batterie il proprio core business.

In seguito, sono analizzati i vantaggi e gli svantaggi di tale tecnologia.

2.1.1 I vantaggi della tecnologia Battery Swap

Il Battery Swap è un sistema che offre molteplici benefici nel campo della mobilità elettrica, andando a risolvere o migliorare alcuni aspetti tipici dei veicoli a batteria e interessando sia il consumatore finale che gli altri attori della filiera.

- Eliminazione del problema dei lunghi tempi di ricarica.
  Come già anticipato, uno degli ostacoli principali alla diffusione dell'elettrico nel settore della mobilità è la lunghezza dei tempi di ricarica. Nonostante i progressi degli ultimi anni e le prospettive future, abbattere queste tempistiche, in modo da raggiungere gli standard tipici dei

rifornimenti tradizionali di carburante, appare tuttora difficile, soprattutto per la gestione di viaggi a lunga percorrenza o di veicoli commerciali pesanti. La tecnologia Battery Swap permette sostituzioni delle batterie nel giro di pochi minuti e una ricarica senza fretta nel momento più opportuno.

- Eliminazione del problema dell'autonomia limitata
  Grazie a un sistema di ricarica semplice e rapido, l'autonomia limitata non costituisce un problema rilevante, in quanto brevi pause per lo scambio della batteria permettono di coprire qualsiasi distanza senza rilevanti perdite di tempo.

- Abbattimento del prezzo di vendita dei veicoli elettrici.
  Attualmente la diffusione di veicoli elettrici è limitata dal prezzo nettamente maggiore rispetto ai corrispettivi veicoli a motore termico e il pacco batterie rappresenta il componente che più incide sul prezzo di acquisto. Con la diffusione di un sistema Battery Swap, la batteria non sarebbe più di proprietà di chi acquista il veicolo, ma di chi offre il servizio di sostituzione e ricarica. In tal modo il costo del pacco batterie sarebbe escluso dal prezzo di vendita, permettendo una netta diminuzione di quest'ultimo e incentivando l'acquisto di veicoli elettrici. Le economie di scala legate al servizio avrebbero poi un impatto positivo a livello di prezzi delle batterie sull'intera filiera.

- Eliminazione del problema di usura della batteria.
  Le batterie non rappresentano un problema solamente per il costo, ma anche per il degrado, essendo il componente con il più elevato tasso di deterioramento. Il proprietario di un veicolo elettrico non solo deve porre attenzione alle modalità di ricarica quotidiane, se vuole evitare di accelerare il processo di usura, ma vede in ogni caso diminuire drasticamente il valore del proprio veicolo nel tempo a causa dell'obsolescenza di tale componente. Anche la possibilità futura di dover sostituire il pacco batterie della propria vettura in caso di un guasto, con un costo molto rilevante, può rappresentare un motivo di diffidenza nei confronti dei mezzi elettrici. Con l'utilizzo di un sistema di Battery Swap, la gestione delle batterie passerebbe ad un attore esterno, liberando l'utente finale da questo fattore di ansia e permettendo di effettuare dei cicli di ricarica più lenti e regolari, che meno impattano sul degrado delle batterie.

- Ripartizione dei costi di produzione degli EV tra produttori di auto e fornitori di batterie.
  Attualmente la batteria è vista dal produttore d'auto come un costo imprescindibile per la vendita di un EV e dalla quale non trae alcun profitto. Molto diverso sarebbe per il fornitore delle batterie, che vedrebbe la batteria come un investimento per vendere il servizio di sostituzione e ricarica.

- Infrastruttura di ricarica più concentrata rispetto al sistema di ricarica a colonnine.
  Il sistema Battery Swap è dotato di un'infrastruttura concentrata in un unico luogo per un raggio operativo di una certa rilevanza, a differenza del sistema di ricarica tramite colonnine, che, non solo deve essere diffuso in maniera ampia e capillare sul territorio per risultare efficace, ma occupa nel complesso superfici più ampie per via delle auto lasciate parcheggiate a ricaricare. La tipologia di infrastruttura, molto simile a quella dei distributori di carburante, potrebbe permettere la conversione di questi ultimi in stazioni per lo swapping, nel caso avvenga tale sostituzione tecnologica in futuro. Inoltre, non sarebbe più necessaria l'istallazione in parcheggi e garage privati di caricatori personali ad alta potenza.

2.1.2 Gli svantaggi della tecnologia Battery Swap

Insieme ai vantaggi appena citati, la tecnologia in questione porta con sé anche alcuni svantaggi non trascurabili, alcuni dei quali costituiscono il motivo per cui finora non si è imposta sul mercato.

- Standardizzazione delle batterie e dei vani.
  Il problema più rilevante per l'implementazione della tecnologia su larga scala è senza dubbio la standardizzazione della forma e delle dimensioni dei pacchi batterie, oltre che del vano che li ospita a bordo dei veicoli. Tale soluzione ha infatti un impatto rilevante sul progetto del veicolo e soprattutto elimina un elemento di differenziazione e innovazione sul quale le case automobilistiche e soprattutto, i produttori di batterie, possono lavorare per distinguersi.

- Design del pacco batteria.
  Affinché la sostituzione risulti semplice e veloce, il pacco batterie deve essere facilmente accessibile e avere caratteristiche che ne permettano una facile rimozione e montaggio, rendendo la progettazione di molti componenti del veicolo più complessa.

- Costo dell'infrastruttura maggiore e maggiore impatto della costruzione.
  Nonostante le stazioni per lo swapping possano avere degli aspetti positivi, come spiegato in precedenza, è chiaro che la costruzione di una di queste infrastrutture (esempio in Figura 5) sia più impegnativa a livello di singolo investimento e di impatto dei lavori di costruzione rispetto all'istallazione di colonnine di ricarica. Un utilizzo di BSS (Battery Swapping Station) per scooter, bici elettriche o minicar di carsharing, risulta essere una soluzione molto più semplice da realizzare e poco invasiva, in quanto la sostituzione può essere effettuata manualmente e dunque non necessita di una postazione e un meccanismo automatico, mentre i luoghi di stoccaggio non sono altro che dei blocchi molto simili agli armadietti utilizzati da Amazon o altri corrieri per la consegna di pacchi.

- Necessità di un grande numero di batterie
  Affinché il sistema funzioni, è chiaro che il numero di batterie in circolo all'interno della rete di stazioni deve essere nettamente maggiore rispetto al numero di veicoli elettrici circolanti, con problemi legati allo smaltimento e alla produzione.

Figura 5 - Stazione per il Battery Swapping
Fonte: sito Nio[5]

2.1.3 Storia e mercato della tecnologia Battery Swap

Il concetto di batteria intercambiabile fu proposto per la prima volta nel 1896 per superare il limitato raggio d'azione di auto e camion elettrici. All'epoca i primi veicoli avevano fatto la propria comparsa da qualche anno e non si era ancora affermata una tecnologia di propulsione definitiva tra motore a vapore, a combustione interna ed elettrico.

L'idea è stata messa in pratica per la prima volta da Hartford Electric Light Company attraverso il servizio GeVeCo (General Vehicle Company, una sussidiaria della General Electric Company) ed era inizialmente disponibile per camion elettrici. Il proprietario del veicolo acquistava il veicolo dalla GeVeCo senza batteria e l'elettricità era acquistata da Hartford Electric attraverso la sostituzione di una batteria intercambiabile. Il proprietario pagava una tariffa variabile per miglio e una tariffa di servizio mensile per coprire la manutenzione e il rimessaggio del camion. Il servizio è stato fornito tra il 1910 e il 1924 e durante quel periodo i veicoli che lo utilizzavano hanno percorso più di 6 milioni di miglia. A partire dal 1917 un servizio simile operò a Chicago per i proprietari di auto Milburn Light Electric, che potevano anche acquistare il veicolo senza le batterie.

Le esigenze più recenti, legate ai cambiamenti climatici e all'inquinamento nelle città, insieme ad una prospettiva di scarsità di combustibili fossili in un futuro ormai prossimo stanno forzando una ridefinizione delle tecnologie legate alla mobilità, con l'utilizzo di veicoli elettrici a batteria che si sta imponendo sul mercato. Parallelamente, la ricerca di soluzioni alternative accompagna il costante progresso tecnologico che interessa il mondo della mobilità elettrica. Ed è in questo contesto che il Battery Swap è stato individuato nuovamente come possibile soluzione in tempi recenti.

I primi sviluppi moderni della tecnologia Battery Swap risalgono al 2007, grazie all'idea della start-up Better Place. Anche Tesla tentò questa strada senza successo. Attualmente, i grandi progressi tecnologici legati alle batterie e ai veicoli elettrici hanno dato un nuovo slancio a questa tecnologia.

La Cina ricopre il ruolo di mercato di riferimento, qui sono nate e operano buona parte delle aziende del settore e le prime reti effettivamente funzionanti si stanno rapidamente diffondendo. L'espansione della tecnologia in questione in Cina è fortemente agevolata dal potere di influire sull'industria che la politica ha nel Paese. Come è stato precedentemente spiegato, infatti, la standardizzazione resta l'ostacolo principale e qualora i produttori non si accordino per for fronte a tale problematica, sono necessarie delle direttive centrali per la realizzazione. Ben diversa è la situazione in Occidente, con i costruttori mal disposti a rinunciare alla possibilità di distinguere le prestazioni e l'autonomia dei propri modelli elettrici da quelli dei competitor. Senza considerare infine il vantaggio che ciò concederebbe al rivale più grande, i costruttori cinesi, ben più preparati a una produzione su larga scala.

In Cina molte case automobilistiche come NIO, BAIC, SAIC, GAC, Hozon, Geely e alcuni altri OEM cinesi insieme a operatori terzi di servizi di scambio batterie, come Aulton, hanno insistito sull'esplorare l'opzione Battery Swap, compiendo progressi sostanziali. Nel 2020 il governo centrale cinese ha incluso la tecnologia Battery Swap nella *National New Energy Vehicle Development Strategy* dal 2021 al 2035. Il Ministero dell'Industria e della tecnologia dell'informazione cinese ha dichiarato di voler promuovere attivamente l'applicazione della modalità di sostituzione della batteria e migliorare il sistema lavorando sulla standardizzazione. I passi successivi sono la promozione di un ambiente di sviluppo ottimale, di un modello di business maturo e dei veicoli elettrici a batteria in generale. Una combinazione di governi provinciali locali, industria automobilistica, sviluppatori IT, imprenditori, operatori di Battery Swap, fornitori di energia elettrica, istituti e università sta sviluppando un nuovo ecosistema e sta mettendo attuando azioni su larga scala. Il nuovo ecosistema comprende quindi la maggior parte dei principali attori del sistema energetico e di elettrificazione.

Di seguito è proposta un'analisi dei principali player operanti nel settore.

Better Place

La prima azienda a concepire un business model attuale per lo scambio di batterie è stata Better Place, fondata da Shai Agassi nel 2007. Better Place era una società internazionale sostenuta da venture capital, formalmente basata a Palo Alto, in California, ma che vedeva la maggior parte della sua pianificazione e delle sue operazioni in Israele, dove risiedevano sia il suo fondatore e i suoi principali investitori.

La società aprì la sua prima stazione di ricarica funzionante nel dicembre 2008 a Pi-Glilot vicino a Tel Aviv. Renault-Nissan accettò di produrre 100.000 auto elettriche, adattate alle specifiche della start-up. Le prime consegne ai clienti di Renault Fluence Z.E., le auto elettriche designate per il servizio, iniziarono in Israele nel secondo trimestre del 2012, e al culmine, a metà settembre 2012, c'erano 21 stazioni di sostituzione delle batterie operative aperte al pubblico in Israele.

Better Place implementò un modello di business in cui i clienti sottoscrivevano abbonamenti che garantivano di coprire determinate distanze di guida, garantendo l'utilizzo, la ricarica e la sostituzione delle batterie. Il costo iniziale di un veicolo elettrico poteva anche essere sovvenzionato al contratto d'uso delle batterie. L'obiettivo di Better Place era quello di consentire la vendita di auto elettriche a meno rispetto al prezzo medio di un'auto a benzina venduta negli Stati Uniti. Si veda *Figura 6* per una schematizzazione del modello di business.

La rete dell'infrastruttura di ricarica per auto elettriche di Better Place si basava su una piattaforma software smart grid prima al mondo nel suo genere, che doveva consentire a Better Place di gestire la ricarica di centinaia di migliaia di auto elettriche contemporaneamente, gestendo automaticamente il periodo di ricarica al di fuori delle ore di punta della giornata, prevenendo così il sovraccarico della rete elettrica.

Better Place dichiarò bancarotta nel maggio 2013. Le difficoltà finanziarie dell'azienda furono causate da un business model non ben definito, sforzi inutili per stabilire punti di partenza ed eseguire progetti pilota in diversi Paesi, elevati investimenti necessari per sviluppare l'infrastruttura di ricarica e scambio e una penetrazione del mercato di gran lunga inferiore a quanto originariamente previsto da Shai Agassi. Un altro elemento chiave del fallimento fu la difficoltà nell'accordarsi con le case produttrici di automobili. Solo Renault, infatti, accettò di prendere parte al progetto e lo fece con un solo modello, una familiare non adatta a soddisfare le esigenze di un mercato molto variegato.

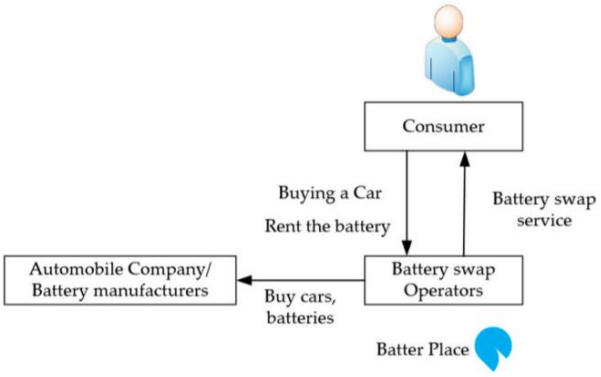


Figura 6 - Business model di Better Place per il Battery Swapping
Fonte: Rif. [1]

Figura 7 - BSS di Better Place
Fonte: sito Forbes[6]

Tesla

Anche la famosa casa produttrice di auto elettriche californiana decise nel giugno 2013, un mese dopo il fallimento di Better Place, di proporre un servizio di Battery Swap per i propri clienti. I proprietari di Tesla Model S predisposte alla sostituzione delle batterie, potevano utilizzare una stazione di swapping collocata a Harris Ranch, tra Los Angeles e San Francisco, come alternativa alla ricarica tradizionale. Il meccanismo di sostituzione permetteva lo scambio in circa 90 secondi.

L'azienda californiana offriva due modalità di servizio, in entrambi i casi la batteria era proprietà del cliente, a differenza del business model di Better Place e di quelli più attuali (*Figura 8*). Il consumatore poteva decidere di scambiare la propria batteria scarica con una carica e tornare poi a recuperarla pagando una tariffa tra i 60 e gli 80 $ per lo scambio e per l'energia, oppure poteva scegliere di tenere la nuova batteria pagando una differenza di prezzo in base al differente degrado delle due. Differentemente da Better Place, i cui profitti erano basati solamente sui canoni d'affitto delle batterie, Tesla ottiene i suoi profitti dalla vendita dei veicoli.

Il servizio venne implementato in forma sperimentale, nell'area di interesse, ma riscosse pochissimo successo e così, nel 2015 venne definitivamente abbandonata l'idea. Le ragioni si possono identificare in un processo macchinoso di fruizione del servizio, che risultava anche meno conveniente rispetto all'utilizzo dei supercharger Tesla (all'epoca persino gratuito), in alti costi di realizzazione delle stazioni di ricarica e nella poca flessibilità del servizio. Anche in questo caso, infatti, vi era un unico modello di auto coinvolto.

Ultimamente, visti i recenti sviluppi della tecnologia, soprattutto da parte di provider cinesi, il Battery Swap è stato nuovamente accostato al nome di Tesla, ma nulla è stato ufficialmente confermato dalla casa automobilistica.

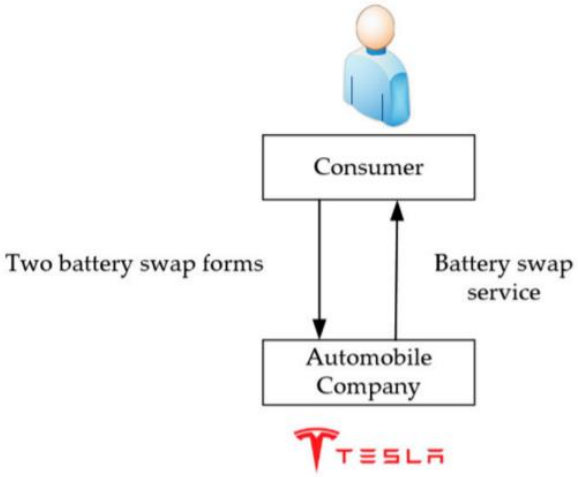


Figura 8 - Business model di Tesla per il Battery Swapping
Fonte: Fonte: Rif. [1]

NIO

La NIO è una casa automobilistica cinese specializzata in produzione di veicoli elettrici, nata a Shangai nel 2014. Dopo la fondazione, diverse società hanno investito in NIO, tra cui Tencent, Temasek, Baidu, Sequoia, Lenovo e TPG. La società partecipa tramite la sua scuderia al campionato FIA di Formula E ed è quotata alla borsa di New York da settembre 2018. Attualmente l'azienda cinese risulta essere la più rilevante nel settore del Battery Swap a livello mondiale, grazie a una serie di strategie, accordi e agevolazioni che ne hanno permesso una rapida e concreta espansione.

Nel 2016 NIO ha lanciato il suo primo modello, una vettura sportiva per il solo uso in pista dotata di un sistema per sganciare e sostituire le batterie scariche con quelle cariche e a dicembre 2017 ha presentato il suo primo veicolo stradale. I modelli ora in commercio sono 5 e altri sono in arrivo. Inoltre, NIO ha fatto sapere che anche le batterie che arriveranno in futuro saranno compatibili con i veicoli ad oggi in circolazione. Le stazioni di rifornimento elettrico attualmente presenti in Cina sono però disponibili solo per i proprietari di auto di marca NIO.

Nel maggio 2018 è stata aperta nel distretto di Nanshan in Cina la sua prima stazione di sostituzione della batteria, soprannominata la "Power Swap Station". Per ottenere una prima importante crescita sul territorio sono state implementate due fasi di espansione. La prima fase è stata completata nel novembre 2018 e consisteva nell'installazione di 18 stazioni in 14 diverse località lungo l'autostrada G4, una strada di 2.273 chilometri che collega Pechino con il delta del fiume Pearl (la più grande area urbana del mondo, dove si trovano Hong Kong e Shenzhen). La seconda fase consisteva nell'installazione di stazioni in 8 località lungo l'autostrada G2, una strada lunga 1.212 chilometri che collega Pechino con Shanghai. Questa fase è stata completata nel gennaio 2019.

Il 10 dicembre 2021, NIO ha installato la sua settecentesima stazione di scambio batteria in Cina (*Figura 9*), raggiungendo il suo obiettivo annuale prima del previsto. La stazione di cambio batteria di seconda generazione di NIO (*Figura 10*) consente al veicolo di parcheggiare automaticamente nella stazione, nella quale gli utenti possono scambiare una batteria in 277 secondi rimanendo all'interno del veicolo (permettendo teoricamente fino 312 batterie scambi di batteria al giorno). Finora, NIO ha fornito oltre 5,3 milioni di swap agli utenti in Cina e la sostituzione della batteria è diventata una delle soluzioni di alimentazione preferite dai propri clienti, facendo registrare una crescita rapidissima.

Gli ambiziosi piani di espansione sono stati svelati durante l'evento *NIO Day 2021* e puntano ad essere presenti in 25 Paesi entro il 2025. Attualmente, la casa automobilistica è già sbarcata in Europa, partendo dalla Norvegia, dove sta costruendo le prime stazioni. Nel 2022 porterà le sue vetture anche in Germania, Olanda, Svezia e Danimarca. Oltre all'Europa la società si sta organizzando per un prossimo sbarco negli Stati Uniti. Un altro obiettivo della casa automobilistica è quello di arrivare ad avere operative 4.000 stazioni per il Battery Swap entro il 2025, 3.000 in Cina e 1.000 nei Paesi dove il marchio si sta espandendo.

Per raggiungere i suoi obiettivi, la casa cinese si avvale di partnership importanti, anche con grandi aziende legate alla mobilità tradizionale, come Sinopec, il colosso dell'industria petrolifera cinese, che in ottica di transizione energetica ha deciso di lanciarsi in questo business, sviluppando insieme a NIO la tecnologia automatica di scambio delle batterie. Anche Shell, gigante anglo-olandese dell'energia, del petrolio e della petrolchimica, sfrutterà questa opportunità per espandere la propria presenza in Cina, approfittando dell'infrastruttura di NIO. Questo avverrà con l'iniziale installazione di colonnine di ricarica rapida *Shell Recharge* proprio presso le sedi NIO. Dell'accordo di cooperazione strategica si servirà in modo simile NIO per portare le sue stazioni in Europa, godendo della diffusione sul territorio dei punti di servizio Shell.

Il business model prevede la gestione della batteria come servizio, BaaS (Battery as a Service), permettendo ai propri clienti di non acquistare il pacco batteria nel momento in cui comprano l'auto e ottenere un risparmio legato al mancato acquisto di quest'ultima. Questi dovranno poi pagare un canone mensile per la gestione e la sostituzione delle batterie. Il piano di abbonamenti disponibile per la Norvegia prevede 2 formule: gli acquirenti che scelgono la batteria di gamma standard possono detrarre 90.000 corone (9.216 €) dal prezzo di acquisto del veicolo e pagare un canone di abbonamento per la batteria di 1.399 corone (143 €) al mese. Per la batteria a lungo raggio, la riduzione del prezzo è di 160.000 corone (16.691 €) e il canone di abbonamento mensile è di 1.999 corone (205 €).

Figura 9 - Rete di Ricarica NIO in Cina (Dicembre 2021)
Fonte: sito Nio[5]

Figura 10 - BSS di NIO
Fonte: sito Nio[5]

Geely

Geely Auto Group è un produttore di auto cinese fondato nel 1997 e con sede a Hangzhou, nel Zhejiang. È tra i principali produttori privati di auto in Cina, insieme a BYD Auto, Chery Automobile e Great Wall e conta 12 impianti produttivi e più di 50.000 dipendenti. Dal 2005 il titolo è inoltre quotato alla Borsa di Hong Kong. La società madre è la Geely Holding Group che ha cominciato la sua attività nel 1986.

Geely gode di un certo potere di influenza decisionale, dovuto alle sue importanti partecipazioni anche in grandi aziende occidentali, che può avere un ruolo importante nell'introdurre la tecnologia Battery Swap e nel dettarne gli standard. Possiede infatti il produttore svedese di autovetture Volvo Cars (con il quale collabora in joint venture per operare nel segmento premium tramite il brand Lynk & Co), la londinese London Electric Vehicle Company, il 49,9% della casa automobilistica malese Proton Holdings, il 51% della britannica Lotus Cars. Dal dicembre 2017 è il maggiore azionista di Volvo Group con l'8,2% del capitale e dal febbraio 2018 è il maggior azionista della Daimler AG con il 9,69%.

Oltre a NIO, Geely si sta affermando come grande player in ambito Battery Swap. Ha iniziato a lavorare su questa tecnologia già dal 2017, ampliando progressivamente il proprio team di ricerca e sviluppo e registrando centinaia di brevetti collegati al sistema di scambio. Nel settembre del 2020 è stata inaugurata la prima stazione per lo scambio delle batterie a Chongqing. Permette di effettuare la sostituzione in appena 59 secondi e si presenta come un'infrastruttura innovativa, elegante e attenta alla pulizia (*Figura 11*). Nel corso degli ultimi mesi, questa rete è stata ampliata, rendendo disponibile le stazioni in 10 province cinesi come parte di un progetto pilota, che permette la sostituzione della batteria alle auto elettriche che fanno parte del servizio di trasporto CaoCao. Di recente ha annunciato di voler rendere operative ben 5'000 stazioni per il Battery Swap in Cina, entro il 2025, allargando il servizio alle autovetture del gruppo Geely sotto il nome di *E-Energee*.

Figura 11 - BSS di Geely
Fonte: sito Geely[7]

BAIC

Il gruppo BAIC (ufficialmente Beijing Automotive Industry Holding Co., Ltd.) è una azienda statale cinese produttrice di autoveicoli, motoveicoli e mezzi commerciali e militari con sede a Pechino, in Cina. Fondata nel 1987 dal Governo Municipale di Pechino dalla fusione della Beijing Automobile Works (BAW, produttrice di autoveicoli fuoristrada) e la Beijing Automobile and Motorcycle United Company (BAM). Le sue filiali principali includono la casa automobilistica BAIC Motor, la BAW produttrice di veicoli militari, fuoristrada e SUV e la Foton Motor specializzata nella produzione di camion, autobus, veicoli industriali e agricoli. BAIC produce anche autovetture per conto di case automobilistiche estere, nello specifico con la Hyundai e la Mercedes-Benz attraverso le joint venture Beijing Hyundai e Beijing Benz ed è partner di Daimler grazie a partecipazioni incrociate. La gran parte dei modelli BAIC sono piccoli e convenienti, con prezzi adatti al mercato cinese.

Attraverso BluePark, lo spin-off dell'azienda che si occupa di batterie e tecnologie legate alla mobilità elettrica, BAIC ha installato 187 stazioni di Battery Swapping in 15 città cinesi per una flotta di 16'000 taxi elettrici (dati di inizio 2021) e ha annunciato piani per 3'000 stazioni di scambio, sufficienti a fornire mezzo milione di veicoli elettrici entro la fine del 2022.

Ample

Ample è una startup americana, che ha come obiettivo la realizzazione di stazioni per il Battery Swap e la diffusione dei veicoli elettrici. A differenza dei marchi cinesi non può ancora vantare una concreta rete di infrastrutture o partecipazioni in grandi gruppi produttori d'auto, ma ha ottenuto di recente un ulteriore finanziamento di 160 milioni, per un totale di risorse ricevute di 230 milioni di dollari.

Ciò che contraddistingue il servizio che Ample vuole offrire è la modularità e la flessibilità delle batterie adottate, in modo da garantire un servizio che coinvolga veicoli di diverso tipo e modelli di diversi brand.

L’azienda opererebbe, quindi, nel mercato come operatore terzo e universale, a differenza degli operatori cinesi, che sono prima di tutto produttori d’auto e che finora non hanno mostrato interesse nella standardizzazione delle batterie e delle tecnologie di sostituzione, ponendo dunque dei limiti alla diffusione del Battery Swap.

L’idea è quella di utilizzare batterie modulari e il più universali possibili, non imponendo alle case produttrici di adattare i propri veicoli alla tecnologia, ma occupandosene personalmente. In questo modo sarà possibile effettuare sostituzioni solo delle batterie scariche e non dell’intero pacco batteria, ma anche ospitare a bordo un numero di batterie necessarie unicamente al proprio utilizzo o al proprio veicolo. La tecnologia Ample presuppone un intervento sul veicolo che richiede 2-3 mesi, per ottenere una piattaforma compatibile al sistema. Ample studia la nuova configurazione in accordo con la casa costruttrice, mettendo a disposizione del mercato una sorta di versione customizzata abilitata al Battery Swap.

Le stazioni di sostituzione impiegano circa 10 minuti a effettuare l’intero processo e occupano uno spazio non superiore a quello di due posti auto, perciò possono facilmente essere collocate, e eventualmente spostate, in diversi punti di una città. Sono completamente robotizzate e identificano il tipo di auto su cui intervenire con sistemi che combinano visione artificiale e sensori ottici.

Ample attualmente gestisce diverse stazioni di scambio nella Bay Area al servizio dei conducenti di veicoli elettrici di Uber. Il nuovo round di finanziamento è stato guidato dal fondo di Singapore Moore Strategic Ventures, con la partecipazione di Shell Ventures e della compagnia petrolifera giapponese ENEOS ed è stata annunciata una partnership con Sally, fornitore di flotte di veicoli con sede a New York. Se i concetti di modularità e universalità risultassero fondamentali per la diffusione su larga scala della tecnologia Battery Swap, la startup americana si troverebbe ad avere un vantaggio competitivo rispetto ai brand cinesi, attualmente più avanti nei progetti.

Figura 12 - BSS di Ample
Fonte: sito Batteries News[8]

Gogoro

Gogoro è un'azienda taiwanese specializzata nell'offrire un servizio diffuso di Battery Swap per scooter, ciclomotori e motocicli elettrici. Sviluppa inoltre una propria linea di Smartscooter elettrici e offre le proprie innovazioni a partner produttori di veicoli come Hero, Yamaha, Aeonmotor, PGO, eReady ed eMOVING.

Gogoro è stata fondata nel 2011 da Horace Luke e Matt Taylor e ha ricevuto investimenti per un totale di 480 milioni di dollari in 6 anni. Gogoro Smartscooter, il primo prodotto di consumo, è stato presentato al Consumer Electronics Show (CES) di Las Vegas nel gennaio 2015. Attualmente i modelli in commercio sono 7 e la propria rete di rifornimento conta, solo a Taiwan, oltre 2'100 stazioni di scambio batterie, 250 milioni di sostituzioni di batterie (270.000 ogni giorno), e un servizio che coinvolge 400.000 utenti. Forte del successo in patria, Gogoro si sta espandendo attraverso diverse collaborazioni anche in Cina con Yadea e DJC, in India con Hero e presto anche in Indonesia (i tre Paesi rappresentano i primi tre al mondo per numero di veicoli a due ruote circolanti).

Le stazioni di ricarica non sono altro che dei blocchi molto simili per forma e dimensioni agli smart-lock per ricevere e spedire pacchi, sono modulabili, standardizzati e poco invasivi (*Figura 13*). L'intero processo di scambio della batteria avviene in circa un minuto ed è effettuato manualmente dal cliente.

Gogoro risulta essere l'azienda con più esperienza riguardo il Battery Swap, nonché quella con la rete di stazioni più grande e diffusa. È anche vero che un servizio di Battery Swap risulta più facilmente applicabile a veicoli a due ruote, vista la maggior semplicità di implementazione e utilizzo delle stazioni e la possibilità di integrare batterie standardizzate in modo più semplice.

Figura 13 - BSS di Gogoro
Fonte: sito Gogoro[9]

eHaul

In Europa non vi sono ancora aziende private che abbiano deciso di puntare sulla tecnologia Battery Swap, rischiando così di rimanere molto indietro nel caso quest'ultima si affermasse. Una delle poche iniziative è stata lanciata dalla Technical University di Berlino, raccogliendo 6,5 milioni di euro per sviluppare stazioni in grado di cambiare le batterie ai veicoli elettrici in modo completamente

automatizzato. Il progetto si chiama eHaul, è finanziato dal ministero tedesco per gli Affari economici e l'Energia con il supporto di altri partner finanziari come l'Istituto Fraunhofer, la IBAR Systemtechnik, Bosch e Unitax Pharmalogistik.

A differenza dei casi visti finora, il progetto tedesco si rivolge ai camion. Questi mezzi, infatti, si presterebbero particolarmente ad un'applicazione del Battery Swap. In una prima fase saranno utilizzati due camion elettrici, messi alla prova su tragitti più lunghi di quelli che possono coprire con una sola ricarica. La prima fase della sperimentazione durerà fino al settembre del 2023 e vedrà i due camion, dotati di sensori e centraline per la raccolta dei dati, impegnati sul campo. Sfrutteranno la prima stazione automatica di cambio esistente, a sud della città di Berlino.

Eni e XEV

Eni ha annunciato a fine 2021 di voler ampliare la flotta del servizio di car sharing Enjoy con il modello XEV YOYO, un quadriciclo elettrico capace di raggiungere la velocità di 80 Km/h e guidabile anche con patente B1. Tale veicolo sarà dotato di due batterie rimovibili e sostituibili manualmente. Il nuovo servizio, denominato *Battery Xchange*, sarà disponibile nel 2022 in un numero selezionato di stazioni di servizio Eni, diventando il primo servizio di Battery Swapping in Europa.

Poiché il presente lavoro di tesi si concentra su una rete di rifornimento per autoarticolati elettrici a batterie, è utile analizzare la situazione attuale di sviluppo tecnologico e di mercato riguardante questi veicoli pesanti. Nel seguente paragrafo vengono presentati i modelli attualmente in commercio e le novità in arrivo, ponendo particolare attenzione alle specifiche delle batterie.

2.2 Veicoli commerciali pesanti elettrici

Come è stato precedentemente esposto, i trasporti generano una buona parte delle emissioni totali di CO_2. Di queste una percentuale rilevante del 38,1 % è causata dall'uso di veicoli commerciali, dei quali il 26,2 % da veicoli commerciali pesanti e l'11,9 % da veicoli commerciali leggeri (si veda la *Figura 2*).

Per questo motivo, anche il futuro dei veicoli commerciali è destinato a subire una rivoluzione, sulle orme di quella che, già da qualche anno, ha iniziato a coinvolgere le automobili. Per quanto riguarda i veicoli commerciali leggeri, non è difficile incontrare furgoni elettrici che già operano nelle nostre città, più complesso è invece il discorso per i mezzi pesanti, soprattutto se a lunga percorrenza. La necessità di percorrere distanze elevate e l'impossibilità di sostare per lunghi periodi di tempo per la ricarica delle batterie, nonché l'ostacolo dovuto alle grandi dimensioni e al peso eccessivo delle batterie, che limitano il carico utile del mezzo, rende più difficoltosa la transizione verso l'elettrico e per tale motivo vi è un certo ritardo rispetto al mercato delle automobili o dei veicoli a due ruote.

Sebbene sembrerebbe definita la direzione verso la mobilità elettrica, per i mezzi pesanti non è stata ancora identificata una soluzione definitiva in termini di tecnologia. Dalle case produttrici di camion sono stati commercializzati o annunciati diversi veicoli elettrici a batteria e fuel cell, mentre sono oggetto di studi e sperimentazioni linee di trasmissione elettrica tramite cavi aerei per motrici dotate di pantografo o tramite cavi interrati per l'uso di tecnologia a induzione. Complementarmente all'uso di batterie vi sarebbe poi l'applicazione del Battery Swapping ai mezzi pesanti, che permetterebbe di

risolvere i problemi relativi ai tempi di ricarica e al raggio di percorrenza e di limitare l'ostacolo dell'ingombro di grandi batterie.

Nel panorama attuale, alcuni grandi produttori come Volvo, Mercedes e MAN hanno già presentato i primi modelli della propria gamma elettrica, mentre alcuni nuovi player del settore come Tesla e Nikola Motor si accingono ad entrare nel mercato con progetti ancora più ambiziosi.

In particolare, Volvo ha messo in commercio nel 2021 cinque veicoli pesanti completamente elettrici (*Figura 14*), di cui tre per percorrenze più lunghe e due per un uso urbano:

- Volvo FH Electric, per il trasporto regionale e interurbano
- Volvo FM Electric, un camion versatile per trasporti locali pesanti e la distribuzione regionale
- Volvo FMX Electric, per trasporti edili
- Volvo FE Electric, per la distribuzione locale e urbana, la raccolta dei rifiuti
- Volvo FL Electric, per la distribuzione locale e cittadina

La produzione dei nuovi camion inizierà con i trattori nella seconda metà del 2022, con gli autocarri a seguire nel 2023.

Citando non testualmente il sito del costruttore[10], i nuovi veicoli pesanti per il trasporto regionale e il settore delle costruzioni hanno una massa a pieno carico fino a 44 t, e sono disponibili in combinazioni di due, tre o quattro assi. Le batterie ad alta densità utilizzano l'ultima generazione di celle agli ioni di litio e verranno assemblate in un impianto di produzione Volvo. Un camion elettrico con sei pacchi di batterie è in grado di immagazzinare una capacità nominale di 540 kWh, consentendo un'autonomia fino a 300 km. I camion offrono due modalità di ricarica: AC fino a 43 kW, ideale per la ricarica notturna o DC molto più veloce, fino a 250 kW, molto utile in caso di turni di guida consecutivi o per una ricarica durante la pausa pranzo, per aggiungere ulteriore autonomia. Con un caricatore DC da 250 kW, è possibile ricaricare fino all'80% della batteria in meno di 90 minuti.

Figura 14 - Gamma di camion elettrici Volvo.
Fonte: sito Volvo Trucks Italia[10]

Anche Mercedes ha commercializzato il suo primo camion elettrico. Si tratta dell'autocarro pesante *eActros* (*Figura 15*), corrispondente elettrico del modello già presente nella gamma Mercedes. La produzione è iniziata a ottobre 2021, dopo tre anni di test con alcuni clienti nel settore della logistica.

Citando non testualmente il sito di Mercedes Trucks[11], l'eActros è disponibile in due versioni, con tre o quattro batterie. Ciascuna di queste batterie speciali batterie agli ioni di litio ha una capacità di circa 112 kWh, che consentono di raggiungere nel complesso una capacità complessiva di circa 336 o 448 kWh. Una riserva energetica, questa, che permette di effettuare percorsi di lunghezza fino a 300 km/400 km.

Con una potenza di ricarica di 160 kW è possibile passare dal 20 all'80% in poco più di un'ora (nei veicoli con tre batterie) oppure in circa un'ora e mezza (nei veicoli con quattro batterie). L'asse a trazione elettrica realizzato appositamente dalla Mercedes-Benz è dotato di due motori in grado di erogare una potenza continua di 330 kW e una potenza di picco pari a 400 kW e che permette di disporre immediatamente di una potente accelerazione.

Mercedes ha poi in programma un camion per uso urbano, ad esempio per la raccolta rifiuti (di cui è già iniziata la sperimentazione), un camion a medio-lungo raggio a batterie ed uno a lunga percorrenza a idrogeno (entrambi sono ad oggi solamente un concept).

Figura 15 - Camion elettrico Mercedes eActros
Fonte: sito Mercedes-Benz Trucks[11]

Tra i nuovi nomi del settore c'è Nikola Motor Company, azienda statunitense fondata da Trevor Milton nel 2014 a Salt Lake City, Utah, che ha l'obiettivo di rivoluzionare il mondo dei trasporti tramite i suoi camion elettrici a batterie e fuel cell e alla propria rete di infrastrutture per la ricarica.

Da settembre 2019 Iveco e Nikola hanno sancito una partnership, che ha portato, nel settembre del 2021, all'inaugurazione dell'impianto di produzione di Ulm, in Germania, dove i camion a batteria Nikola Tre saranno assemblati sulla base dell'Iveco S-Way, con assale elettrico co-progettato e prodotto da FPT Industrial. L'impianto si aggiunge ad un'altra fabbrica negli Stati Uniti dove viene prodotta la versione americana dei veicoli. Nonostante gli ostacoli legati alla pandemia e a vicende giudiziarie in cui è stato coinvolto il fondatore di Nikola, ormai dimessosi dalla carica di CEO, i piani relativi alla costruzione dell'impianto e alla produzione dei primi esemplari sono stati pienamente rispettati, anche se i programmi di produzione per il nuovo anno sono stati ridimensionati notevolmente.

Stando a quanto riportato sul sito ufficiale[12], il camion vanta una powertrain da 480 kW, circa 645 cavalli, alimentato da una batteria da 753 kWh, caricabile in corrente continua a 240 kW. L'autonomia stimata è di 560 km e il tempo di ricarica dal 10% all'80% è di 2 ore. Oltre al modello in produzione è stato presentato al pubblico lo step successivo di questa piattaforma pesante modulare, cioè il prototipo di veicolo elettrico ibrido a celle a combustibile (sviluppate da Bosch) del Nikola TRE, che entrerà in produzione entro la fine del 2023. Quest'ultimo permetterà di coprire fino a 800 km e di effettuare un rifornimento di idrogeno in 20 minuti. Un ulteriore modello, ancora più prestante, è previsto per il 2024 e prenderà il nome di Nikola Two. Sarà anch'esso un veicolo FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) e avrà un'autonomia di quasi 1'500 km con un pieno.

L’inaugurazione del nuovo impianto in Germania è stata l’occasione per sancire un accordo con il porto di Amburgo per la consegna di 25 camion a batteria nel corso del 2022. In una prima fase i mezzi effettueranno delle prove per le operazioni di trasporto e logistica, oltre a test sulle ricariche ad alte prestazioni. Si passerà poi all’integrazione vera e propria dei veicoli elettrici nelle operazioni portuali e all'installazione dell'infrastruttura di ricarica.

La prima consegna è avvenuta invece il 17 settembre 2021. Nikola ha consegnato alla società di autotrasporti statunitense Total Transportation Services i primi tre esemplari del suo trattore elettrico e saranno utilizzati per il trasporto di container da e per il bacino portuale di Los Angeles e Long Beach. La Total Transportation Services ha annunciato un programma di acquisto di cento camion elettrici, di cui trenta entreranno in servizio nel 2022 e settanta nel 2023, questi ultimi con celle a combustibile alimentate con idrogeno.

Nella *Figura 16* in seguito è mostrata la gamma dei trattori del marchio.

Figura 16 - Gamma di Camion elettrici Nikola Motor
Fonte: sito Nikola Motor[12]

Anche la famosa casa produttrice di auto elettriche Tesla ha in programma la messa in commercio a breve di un proprio modello totalmente elettrico e a batterie. Il veicolo prende il nome di *Semi* (*Figura 17*) ed era stato presentato già a fine 2017. Dopo un lungo periodo di ritardo, si sono aggiunti problemi di approvvigionamento post pandemia dei semiconduttori e delle celle 4680, sviluppate dalla casa americana e utilizzate nei pacchi batteria, facendo slittare le prime consegne nel 2022.

Il Tesla Semi sarà proposto in due versioni, con opzioni di autonomia di 483 km e 804 km per $ 150.000 e $ 180.000 rispettivamente, anche se di recente Elon Musk ha parlato della possibilità di avere sino a 1.000 Km di autonomia. Sarà possibile caricare l’80% della batteria in solo mezz’ora, grazie ad apposite centraline di ricarica e sarà equipaggiato con il sistema di guida autonoma presente sulle autovetture. La trazione sarà fornita da quattro motori elettrici indipendenti montati sugli assali posteriori, che permetteranno un’accelerazione da zero a 100 km/h in 20 secondi, con una massa complessiva di 36 tonnellate, e di affrontare una pendenza del 5% a 105 km/h. I dati rilasciati promettono, inoltre, risparmi sul costo del carburante per più di 200’000 $.

Secondo attendibili indiscrezioni, una linea pilota per la produzione di questo veicolo è stata costruita in un nuovo capannone all'interno della Gigafactory del Nevada e sarebbe pronta per essere messa in funzione. Il Tesla Semi dovrebbe poi essere costruito anche nella nuova fabbrica del Texas.

La lista degli ordini conta già numeri importanti, con diverse grandi aziende che hanno effettuato degli ordini. Per esempio, Walmart ha prenotato 130 di questi mezzi, PepsiCo 100 unità e UPS 125.

Figura 17 - Camion elettrico Tesla Semi
Fonte: sito Tesla[13]

3. Strumenti di analisi utilizzati

L'oggetto del lavoro di tesi è lo studio di una rete di stazioni di ricarica tramite tecnologia Battery Swap per una flotta di mezzi pesanti elettrici. L'obiettivo principale consiste nel dimensionare le stazioni per il Battery Swap, determinando il numero ottimo di batterie e caricatori da allocare in ognuna di esse per garantire lo svolgimento efficace del servizio di rifornimento.

Per ottenere i risultati ottimi relativi ad ogni BSS è stato realizzato un modello di ottimizzazione matematica, che è poi stato risolto tramite il software *Matlab*. Nonostante implichi ulteriori attenzioni in fase di modellizzazione e possa richiedere uno sforzo computazionale maggiore con un numero elevato di dati di input, si è optato per un modello di programmazione lineare intero, al fine di ottenere un risultato unico ed esatto. Affinché il servizio possa ritenersi efficiente, è necessario non solo che le stazioni siano in grado di soddisfare la domanda di batterie, operando al di sopra di un certo livello di servizio, ma anche che non vi siano batterie o caricatori inutilizzati, al fine di limitare i costi. In una fase successiva è stato sviluppato un modello di simulazione tramite *FlexSim* per verificare l'effettivo funzionamento della rete di scambio di batterie e la robustezza dei risultati.

Le metodologie utilizzate si collocano nell'ambito della ricerca operativa e per questo motivo è proposto in seguito un breve approfondimento sull'argomento.

3.1 La ricerca operativa

La ricerca operativa è una disciplina scientifica che si occupa di modellizzare problemi complessi e risolverli tramite strumenti matematici e metodi quantitativi avanzati. In particolare, si pone come supporto ad attività decisionali complesse, con lo scopo di operare le scelte migliori per raggiungere un determinato obiettivo nel rispetto di vincoli esterni. La ricerca operativa è generalmente considerata una branca della matematica applicata, ma presenta forti caratteristiche interdisciplinari, in quanto la modellizzazione del problema può coinvolgere vari ambiti scientifici, come economia e finanza, statistica o ingegneria, mentre la strutturazione del modello, così come la risoluzione tramite algoritmi, ha molti elementi in comune con la programmazione informatica.

Il termine è stato coniato in ambito militare negli anni subito precedenti alla Seconda Guerra Mondiale, tuttavia, esistono esempi importanti di anticipazione dei metodi della ricerca operativa in anni più lontani, come in uno studio sui metodi di produzione del 1885 da parte di Frederick Taylor o prima ancora, nel 1776, nello studio di un problema relativo ai trasporti da parte di G. Monge. Ma la ricerca operativa per come la intendiamo oggi nasce, appunto, con la necessità del Regno Unito di ottimizzare la distribuzione delle apparecchiature radar sul territorio per l'intercettazione di velivoli inglesi e nemici e di segnalarne i movimenti ad opportune località. Fu istituito, dunque, un gruppo di ricerca composto da scienziati provenienti da varie discipline che portò nel 1938 alla definizione dei primi metodi quantitativi. La ricerca operativa ha oggi moltissime applicazioni soprattutto negli ambiti economico, infrastrutturale, logistico, militare, dei trasporti e di data science.

Un problema può essere affrontato tramite ricerca operativa seguendo le fasi qui riportate:

1. Analisi della situazione reale e raccolta di informazioni e dati.
   È una fase preliminare, ma fondamentale per decidere come impostare il problema e collegare il modello alla realtà.

2. Formulazione del problema.
   Individuazione delle variabili controllabili e non controllabili, dei parametri di input e della scelta dell'obiettivo da ottimizzare. È importante delineare molto bene i confini del problema, esplicitandone chiaramente gli scopi e determinando cosa prendere in considerazione e cosa tralasciare. La realtà, infatti, è un sistema enormemente complesso, descrivibile attraverso infinite variabili il cui rapporto reciproco è spesso non modellizzabile. Per tale motivo, lo scopo di questa fase è quello di scegliere attentamente quegli elementi del problema che abbiano un impatto significativo sul sistema e che meglio ne riproducano il comportamento reale.
3. Costruzione del modello.
   Un buon modello fornisce una rappresentazione della realtà più accurata possibile, pur mantenendo una certa semplicità d'utilizzo, e rappresenta il problema fornendo tutte le informazioni per poter assumere una decisione idonea. In modo simile alla fase precedente, è dunque necessario operare un trade-off tra realisticità del modello e semplicità. La ricerca di quest'ultima è utile non solo alla scrittura e comprensione del modello, ma anche alla sua risoluzione.
4. Soluzione del modello mediante gli strumenti più opportuni.
   La scelta del metodo si può basare sulla necessità di ottenere risultati più o meno esatti e precisi (soluzione ottimale o subottimale), sulla velocità di risoluzione o sul costo degli strumenti necessari per risolvere il problema (nel caso servano, ad esempio, calcolatori da prestazioni elevate o software a pagamento).
5. Analisi e verifica delle soluzioni ottenute.
   Si controlla se la funzione teorica offre i vantaggi attesi, se i risultati sono soddisfacenti nella rappresentazione della realtà e per lo scopo per cui il modello è stato pensato.

La ricerca operativa si divide in numerose sotto-branche. La prima e più importante classificazione distingue tra:

- Ottimizzazione: detta anche approccio what-is-best, si occupa di formalizzare il problema in un modello matematico (tipicamente un modello di programmazione matematica o un grafico di flusso) ed individuare per esso una soluzione ottima o subottima.
- Simulazione: (detta anche approccio what-if), si occupa di problemi complessi da risolvere tramite ottimizzazione e si pone come strumento sostitutivo o di supporto/convalida ad essa.
- Processi stocastici: consiste nel realizzare modelli probabilistici al fine di determinare i comportamenti dei sistemi, più che i risultati ottimi ed esatti. Questa branca risulta essere alla base dell'ingegneria finanziaria e dell'ottimizzazione stocastica.

3.1.1 L'ottimizzazione

Più nello specifico, un problema di ottimizzazione prevede la formalizzazione tramite minimizzazione o massimizzazione di una funzione, detta funzione obiettivo, la quale può essere sottoposta a dei vincoli. Un problema di minimizzazione è sempre riconducibile ad un problema di massimizzazione, e viceversa.

In particolare, la funzione obiettivo rappresenta lo scopo del problema, ovvero ciò che si sta ricercando in generale, ed è una funzione contenente al suo interno le variabili decisionali, quelle di cui si vuole ottenere il valore ottimo per far sì che si raggiunga il valore minimo (o massimo) della funzione obiettivo. Funzioni obiettivo molto comuni sono le funzioni di costo minimo, di massimo profitto o ricavo, di distanza minima percorsa, di tempo minimo richiesto, di massima soddisfazione o di massimo utilizzo.

I vincoli rappresentano invece le relazioni tra le variabili, che delimitano le condizioni di ammissibilità delle soluzioni. Questi devono infatti risultare tutti veri nella risoluzione del modello, discriminando dunque le combinazioni di valori delle variabili decisionali che rappresentano soluzioni accettabili del problema, da quelle che non lo sono. Alcune tipologie di vincoli comuni rappresentano limitazione di risorse, sequenza di azioni, distanze tra posizioni o vincoli temporali.

Il caso più semplice di modello di ottimizzazione consiste nel minimizzare una funzione senza alcun vincolo. Per la risoluzione di questi problemi si utilizzano le tecniche dell'analisi differenziale. Tipicamente, invece, gli altri casi sono riconducibili ad un modello di programmazione matematica, con n variabili ed un sistema di m vincoli, la cui forma generica è:

$$\begin{aligned} &\text{(funzione obiettivo)} && \min/\max\ C(x_1, \dots, x_n) \\ & && \varphi_1(x_1, \dots, x_n) \leq b_1 \\ &\text{(vincoli)} && \dots \\ & && \varphi_m(x_1, \dots, x_n) \leq b_m \end{aligned}$$

I vincoli e l'obiettivo sono funzioni reali a variabili vettoriali e possono anche rappresentare dei vincoli sul valore delle singole variabili (ad esempio di non negatività o di integralità).

Una categoria particolare di modelli di programmazione matematica è quella dei modelli di programmazione lineare (PL). In questi modelli la funzione obiettivo è costituita da un'espressione lineare delle variabili decisionali e tutti i vincoli sono determinati da equazioni o disequazioni lineari; dove per "lineare" si intende che le variabili, di qualsiasi natura esse siano, possono essere solamente moltiplicate per una costante e sommate fra loro. In tal caso, la struttura del modello riprende quella generale, ma si presenta nella seguente forma specifica:

$$\begin{aligned} &\text{(funzione obiettivo)} && \min/\max \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \\ & && \sum_{i=1}^{n} a_{1,i} x_i \leq b_i \\ &\text{(vincoli)} && \dots \\ & && \sum_{i=1}^{n} a_{m,i} x_i \leq b_m \end{aligned}$$

In base alla natura o al dominio delle variabili decisionali, si parla di:

- modelli di Programmazione Lineare continua (PL): se tutte le variabili possono assumere valori reali;
- modelli di Programmazione Lineare Intera (PLI): se tutte le variabili devono assumere valori interi;

- modelli di Programmazione Lineare Intera Mista (PLIM): se alcune variabili possono assumere valori reali e altri valori interi.

I modelli di Programmazione Lineare godono di particolare attenzione per via dei diversi vantaggi che essa presenta e che possono essere così sintetizzati:

1. Generalità e flessibilità: i modelli di Programmazione Lineare si adattano alla descrizione di situazioni reali molto varie e godono quindi di un carattere di universalità e di adattabilità alle diverse realtà applicative. Inoltre, anche quando l'ipotesi di linearità non è accettabile, il modello lineare costituisce una buona base di partenza per successive generalizzazioni.
2. Semplicità: i modelli di Programmazione Lineare risultano facilmente interpretabili poiché il linguaggio dell'algebra lineare ne permette la comprensione anche in assenza di conoscenze matematiche più elevate.
3. Diffusione degli algoritmi risolutivi: per la risoluzione di modelli di Programmazione Lineare sono largamente diffusi programmi in grado di elaborarli, spesso in modo molto efficiente, permettendo a tutti di risolvere modelli anche complessi.
4. Esattezza del risultato: un ulteriore motivo per cui questa classe di problemi risulta essere particolare è che fornisce sempre risultati esatti. Esistono infatti metodi che permettono di trovare la miglior soluzione ammissibile, qualora essa esista, che risolve il problema studiato. Inoltre, qualora non vi fosse alcuna soluzione ammissibile, è possibile saperlo con certezza. Per i modelli di PL continua l'algoritmo di risoluzione più importante è il *metodo del simplesso*, per i modelli di PLI è l'algoritmo *branch and bound, m*entre per i modelli PLIM il più importante è l'algoritmo *branch and cut.* Tutti questi metodi sono, appunto, metodi di risoluzione esatti.

3.1.2 La simulazione

La simulazione è uno strumento largamente utilizzato in ingegneria ed è una metodologia indispensabile per la risoluzione di molti problemi del mondo reale. Viene utilizzata per descrivere e analizzare il comportamento di un sistema e ha un ruolo rilevante nella progettazione di sistemi reali o nella sperimentazione di soluzioni relative a questi ultimi, consentendo di prevedere lo svolgersi dinamico di una serie di eventi o processi. I principali ambiti di applicazione della simulazione sono molto simili a quelli citati per l'ottimizzazione, ai quali si aggiungono anche usi in campo sportivo o dei videogiochi.

Alcune definizioni di simulazione sono:

- "Un'imitazione del funzionamento nel tempo di un processo o sistema del mondo reale" (J. Banks, J. Carson, B. Nelson, D. Nicol, 2001)
- "Una situazione in cui viene creato un particolare insieme di condizioni artificialmente per studiare o sperimentare qualcosa che potrebbe esistere nella realtà" (Oxford Learner's Dictionaries)
- "Un'imitazione di un sistema che evolve nel tempo" (S. Robinson, 2014)

Una simulazione prevede le prestazioni di un sistema sotto un insieme specifico di condizioni e ne valuta le performance, ma generalmente non ne ottimizza i risultati. Per questo motivo, se si vuole raggiungere una soluzione ottima è necessario procedere per iterazioni, andando a cambiare gli input e scegliendo poi la soluzione migliore. Tale approccio può essere lungo e richiedere notevoli risorse e, inoltre, in alcuni problemi potrebbe risultare molto difficile, se non impossibile, trovare effettivamente la soluzione migliore in assoluto.

Fare simulazione non implica solo creare un modello. La simulazione, infatti, è uno strumento statistico e come tale deve avere una significatività e validità statistica. I dati in input in particolare devono essere trattati con attenzione e così come i dati risultanti dall'output.

Si può definire generalmente un modello di simulazione come insieme di relazioni logiche e matematiche che descrivono i componenti del sistema modellato e le interazioni tra essi. In base alla caratteristica presa in considerazione si possono classificare i modelli di simulazione nei seguenti modi.

- Statici o dinamici:
  - **modelli statici**: rappresentano sistemi in un determinato istante di tempo o sistemi che non dipendono dal tempo (ad esempio simulazione Monte Carlo);
  - **modelli dinamici**: rappresentano i sistemi durante la loro evoluzione temporale.
- Deterministici o stocastici
  - **modelli deterministici**: rappresentano sistemi caratterizzati dalla mancanza di casualità e, dunque, esperimenti con la stessa impostazione dei dati di input forniscono gli stessi risultati in output;
  - **modelli stocastici**: rappresentano sistemi casuali, nei quali c'è variabilità tra le varie esecuzioni e si possono ottenere risultati differenti di volta in volta.
- Discreti o continui
  - **modelli a tempo continuo**: rappresentano sistemi che possono evolversi in qualsiasi momento;
  - **modelli a tempo discreto**: rappresentano sistemi che si evolvono in determinati istanti di tempo.

Vi possono poi essere modelli ibridi, nei quali due logiche operano in modo combinato nella modellizzazione di elementi diversi dello stesso problema.

Il modello sviluppato per il lavoro di tesi si può classificare come dinamico, stocastico e a tempo discreto. Lo schema sottostante mostra le possibili classificazioni di un modello di simulazione ed è evidenziata in rosso la casella relativa al modello in questione.

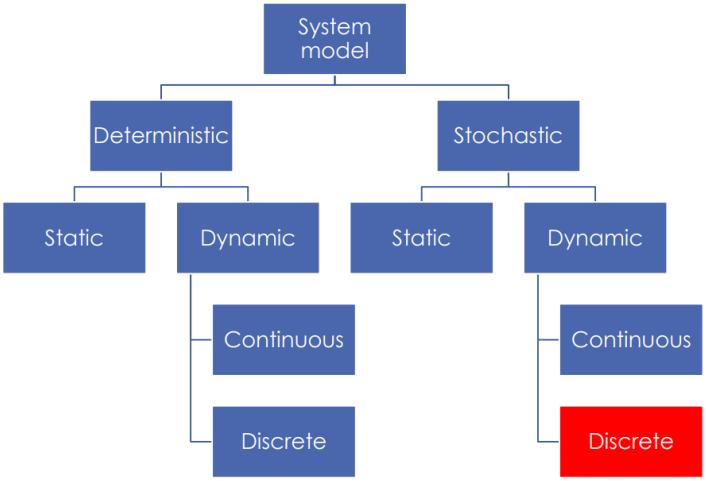


Figura 18 - Classificazione dei modelli di simulazione.
Fonte: dispense del corso Simulazione dei sistemi gestionali, Politecnico di Torino (a.a. 2021).

3.2 Stato dell'arte del problema

Gli studi di ottimizzazione riguardanti il tema del Battery Swap presenti in letteratura si soffermano su obiettivi e casi studio che possono essere molto vari tra loro. I modelli possono quindi essere classificati in base allo scopo con il quale vengono concepiti.

Diversi modelli considerano il problema del posizionamento ottimale delle stazioni di swapping sul territorio, valutando il problema in base a parametri decisionali diversi. *Rif.* [2] utilizza due metodi, un metodo analitico e la meta-euristica *Artificial Bee Colony,* per collocare le stazioni per lo swapping in modo ottimale, utilizzando come criterio l'impatto sulla rete elettrica in termini di perdita di potenza. Con entrambe le metodologie si ottengono risultati simili ed è confermato che una disposizione ottima riduce significativamente l'impatto di tali infrastrutture sulla rete elettrica. *Rif.* [3] si occupa della progettazione ottimale di una rete di BSS per un servizio di car sharing, prendendo in considerazione, oltre agli elementi funzionali basilari del sistema, la soddisfazione del consumatore. Per farlo sono stati modellizzati due stati d'ansia del cliente legati alla possibilità di consumare l'intera batteria e alla necessità di dover sostituire la batteria quando ha ancora una certa carica. Il problema è formulato come un modello di programmazione lineare intera in scenari deterministici e fuzzy. Viene, inoltre, proposta un'euristica Tabu Search combinata con *GRASP* per risolvere il problema in modo efficiente. *Rif.* [4] prende in esame il caso studio di un servizio di sharing operante tramite scooter elettrici con batteria rimovibile nel territorio di Taiwan. In un primo momento sono stati utilizzati la simulazione Monte Carlo e dati sul traffico e sulla distribuzione della popolazione per predire una domanda e in seguito sono stati stimati vari possibili scenari. Ciascuno scenario fornisce differenti posizioni delle stazioni e la distribuzione nel tempo della domanda. Per risolvere in modo ottimo gli scenari è stato utilizzato un algoritmo genetico. I criteri utilizzati sono il soddisfacimento della domanda e il costo di affitto dei terreni nell'area presa in considerazione.

Altri modelli assumono il punto di vista dell'utente del servizio, generalmente un privato possessore del veicolo, un autista di taxi o un cliente di car sharing, e ne ottimizzano le scelte di sostituzione in base alle posizioni delle stazioni e ai fabbisogni energetici delle tratte percorse e ancora da percorrere. *Rif.* [5], in particolare, propone un algoritmo in grado di guidare in maniera ottimale i veicoli appartenenti ad una flotta di taxi elettrici verso il punto di ricarica più appropriato, in base a requisiti variabili nel tempo. Il sistema considera sia stazioni di scambio batteria che punti di ricarica plug-in, con l'obiettivo di ridurre al minimo il ritardo di viaggio del veicolo. L'algoritmo è poi testato nello scenario cittadino di Helsinki.

Vi sono poi diversi modelli che hanno come obiettivo la gestione ottimale della messa in carica delle batterie. Questi si focalizzano sull'ottenere un impatto di carico minimo sulla rete elettrica o sul minimizzare i costi di esercizio, sfruttando i prezzi variabili dell'energia durante la giornata. *Rif.* [6] presenta un'euristica per una strategia di ricarica centralizzata tramite Battery Swap. In particolare, l'algoritmo, un ibrido tra *Particle Swarm Optimization (PSO)* e un algoritmo genetico, determina la priorità di ricarica di un EV e il luogo di scambio, all'interno di una rete di distribuzione, minimizzando il costo totale di ricarica, la perdita di potenza e la deviazione di tensione. *Rif.* [7] fornisce un modello integrato per la strategia di gestione di una stazione che permette di ricaricare l'auto sia con la ricarica tradizionale che con il Battery Swap e che dispone di un sistema di accumulo di energia. Il modello è non lineare e ha l'obiettivo di limitare il carico sulla rete elettrica considerando l'incertezza sulla domanda, espressa in termini di potenza elettrica richiesta. *Rif.* [8] propone un modello di minimizzazione dei costi, attraverso la programmazione lineare mista intera, per una politica di gestione ottimale delle ricariche dei veicoli in arrivo presso una stazione che permette di ricaricare la batteria tramite cavo o swapping. Ogni veicolo elettrico specifica il livello di carica della batteria desiderato, il

tempo di attesa accettabile e se è consentito o meno lo scambio della batteria e in seguito viene risolto un problema di ottimizzazione delle ricariche che considera un orizzonte temporale futuro di un giorno. Il costo delle operazioni è analizzato nell'ambito di uno schema di tariffazione dinamica dell'energia e considerando il costo associato all'invecchiamento della batteria. *Rif.* [9] formula un modello non lineare di schedulazione ottimale delle ricariche di una BSS, utilizzando come variabile da minimizzare il costo d'esercizio e sfruttando le variazioni di prezzo dell'energia. È inoltre utilizzato un modello statistico per stimare la domanda, basandosi su dati storici, e generare diversi scenari di richiesta.

Altri modelli ancora si concentrano sul dimensionamento della stazione di sostituzione, ricercando il numero ottimale di batterie e talvolta di caricatori da allocare. *Rif.* [10] si colloca in modo intermedio tra questa categoria e la precedente. L'obiettivo primario è la gestione ottimale delle ricariche, minimizzando i costi e considerando il costo opportunità di ricaricare subito una batteria piuttosto che effettuare ricariche just in time e, inoltre, valuta in maniera semplicistica il buon dimensionamento di una stazione in termini di batterie allocate. *Rif.* [11] propone un modello matematico per trovare il numero ottimo di caricatori e batterie in un'unica stazione per il rifornimento di una flotta di taxi elettrici. Il modello, non lineare, considera una domanda casuale uniformemente distribuita ed è stato risolto tramite l'algoritmo genetico *Differential Evoultion* (DE). Anche *Rif.* [12] fornisce un modello che permette di ricavare il numero ottimo di caricatori e batterie. Il modello di ottimizzazione non lineare minimizza i costi di investimento, manutenzione e elettricità della BSS, imponendo un vincolo sui tempi di attesa extra dei veicoli. Lo studio prende in considerazione la possibilità che un veicolo ospiti a bordo più di una batteria, ma assume che il numero di batterie sia fisso e che nel momento dello swapping sono sostituite tutte le batterie presenti, non apportando di fatto alcuna novità rispetto alla modellizzazione dello scambio di singole batterie e non rappresentando i possibili vantaggi di montare diversi pacchi batteria sui veicoli. Il modello è risolto con l'algoritmo genetico chiamato DE. È stato poi progettato un modello di simulazione delle operazioni di una BSS che serve una flotta di taxi e bus elettrici ed è stata simulata l'evoluzione del sistema secondo diverse strategie operative.

Nonostante, come è stato appena visto, vi siano diversi lavori relativi all'argomento dell'ottimizzazione di un servizio di Battery Swap, la maggior parte di essi si focalizzano su argomenti di allocazione delle stazioni e gestione ottima dell'uso di energia elettrica. Meno indagato è il tema del dimensionamento ottimo delle stazioni di scambio e, in particolare, non vi è un modello che sia lineare o che modellizzi una rete di stazioni anziché una sola. Il modello oggetto del lavoro di tesi ha, appunto, come obiettivo il dimensionamento ottimo delle stazioni per il Battery Swap appartenenti a une rete di rifornimento per camion elettrici. Il dimensionamento di ogni stazione prevede la determinazione del numero ottimo di batterie e caricatori da collocare all'interno affinché venga soddisfatta la domanda futura, mantenendo il livello di servizio al di sopra di un dato valore. I valori ottimi in questione vengono determinati fornendo al modello la domanda futura di tutti i periodi di tempo a venire, per l'orizzonte considerato. Più nello specifico, la domanda è determinata tenendo conto dei flussi medi per ogni periodo e delle batterie necessarie a compiere le tratte confinanti con la stazione. Una delle novità del modello, infatti, è costituita dal fatto che i mezzi non ospitano un solo pacco batteria, ma più batterie modulari e standardizzate e, in particolare, montano ogni volta un numero di batterie sufficiente a percorrere la tratta d'interesse. Ciò permette di sostituire anche solo parte delle batterie presenti a bordo ed è consentito scambiarne un numero variabile in base al fabbisogno del camion. Il modello ha il pregio di essere un modello di programmazione lineare, per la precisione programmazione lineare intera (PLI), in quanto le variabili sono rappresentate da quantità di batterie e caricatori, che per loro natura devono avere valori interi. Gode, dunque, dei vanteggi attribuiti alla programmazione lineare, seppur la

programmazione lineare intera è, da un punto di vista algortimico, più complessa e onerosa da risolvere della PL continua.

Il modello di programmazione è poi affiancato da un modello di simulazione che ha lo scopo di validare i risultati dell'ottimizzazione e verificare un corretto funzionamento della rete. Il contesto applicativo scelto è una novità nel campo del Battery Swap, poiché gli studi precedenti si sono sempre focalizzati su un servizio di car sharing o di taxi o comunque su un utilizzo rivolto alle automobili e in un contesto cittadino. L'applicazione del Battery Swap a un business logistico, effettuato tramite camion lungo le principali autostrade italiane, presenta delle differenze sostanziali nell'operatività. Tali peculiarità saranno evidenziate nel corso dell'esposizione del lavoro.

4. Il caso studio

Il caso studio preso in esame per il lavoro di tesi è un servizio logistico effettuato tramite autoarticolati elettrici nel territorio italiano. In particolare, tali veicoli sono predisposti per l'uso della tecnologia Battery Swap e sono serviti da stazioni di scambio collocate lungo le due principali dorsali autostradali del Paese, ovvero la "Tirrenica" e l'"Adriatica". Lo scopo principale è il dimensionamento ottimo di tali stazioni in termini di batterie e caricatori da allocare all'attivazione del servizio. Gli aspetti presi in considerazione per l'analisi sono le necessità di soddisfare un certo livello di servizio relativo alla domanda e di mantenere i costi di acquisto e manutenzione più bassi possibile. Sono state considerate sei tratte, percorse ogni giorno contemporaneamente nei due sensi di marcia, e per ogni tratta è stata prevista una sosta intermedia per effettuare lo swapping.

Per la risoluzione del modello è stato necessario effettuare delle scelte operative e assegnare in modo realistico dei valori ai vari parametri considerati, nonché alle matrici dei flussi. Di seguito sono spiegate nel dettaglio le assunzioni e i metodi utilizzati per ottenere tali valori.

4.1 Scelte riguardanti i dati di input

Per la modellizzazione del tempo sono stati utilizzati intervalli regolari di 1 ora e, dunque, una giornata è rappresentata da 24 periodi consecutivi.

Per ipotizzare le specifiche relative alle batterie ospitate a bordo dei camion, è stata presa come riferimento la batteria del modello già in commercio *Nikola Tre* (si veda il paragrafo 2.2), la quale dispone di una capacità di 753 kWh, corrispondente ad un'autonomia dichiarata di 560 km. Considerando che i valori delle specifiche fornite dai costruttori sono determinati in condizioni ottimali, che poco rispecchiano il normale utilizzo, e volendo tenere conto dell'invecchiamento degli accumulatori si è preferito utilizzare valori conservativi. È stato dunque ipotizzato che gli autoarticolati montino 4 batterie identiche da 250 kWh per un totale di 1′000 kWh, utilizzate però all'80% di carica, per preservare più a lungo nel tempo le condizioni, con un'autonomia di 500 km. Per la ricarica è stato scelto di non sfruttare la possibilità di ricariche ultraveloci, per non degradare rapidamente gli accumulatori. Attualmente le colonnine possono raggiungere una potenza di 350 kW e, ad esempio, il Nikola Tre permette la ricarica a 240 kW. Nel lavoro in questione sono stati considerati caricatori con una potenza di 50 kW, in grado di ricaricare le batterie da 250 kWh (all'80%) in 4 ore esatte. Alle batterie è stato associato un costo d'acquisto di 22′000 € (circa 25′000 $), stabilito sulla base del prezzo minimo raggiunto per le batterie di autobus, pari a 100 $/kWh, e alla stima che tale prezzo sarà raggiunto entro il 2023 anche per gli autoveicoli (*Rif.* [13]). Il costo d'acquisto di un singolo caricatore è invece supposto essere di 25′000 € (circa 28′000 $) sulla base del contenuto degli articoli relativi all'argomento *Rif.* [14] e *Rif.* [15]. Sia alle batterie che ai caricatori è stato associato un costo di manutenzione annuo, ipotizzato essere rispettivamente pari a 140 € e a 70 €, come proposto nel *Rif.* [12]. Poiché attualmente la vita media di una batteria si aggira attorno agli 8-10 anni, è stata ipotizzata una vita utile di 8 anni (marchi come Audi, BMW, Jaguar, Nissan, Renault e Tesla offrono una garanzia sulle batterie di 8 anni), mentre pari a 15 anni per quanto riguarda i caricatori (*Rif.* [12]). Infine, è stato assunto un tasso di sconto annuale dell'investimento pari al 6% (*Rif.* [12]). Di seguito sono state schematizzate le ipotesi appena menzionate per una maggiore chiarezza.

Parametro di input	Valore attribuito
Durata del singolo intervallo di tempo	1 h
Numero massimo di batterie per camion	4
Capienza delle batterie	250 kWh
Autonomia totale di un camion	500 km
Potenza dei caricatori	50 kW
Tempo di ricarica di una batteria	4 h
Costo di una singola batteria	22'000 €
Costo di un singolo caricatore	25'000 €
Costo di manutenzione di una batteria	140 €
Costo di manutenzione di un caricatore	70 €
Vita utile di una batteria	8 anni
Vita utile di un caricatore	15 anni
Tasso di sconto dell'investimento	6%
Livello di servizio minimo	95%

Tabella 1 - Valori attribuiti ai parametri di input per la risoluzione del modello di ottimizzazione

Oltre allo scenario caratterizzato dai valori dei parametri appena descritti, che sarà chiamato scenario 1, è stato testato uno scenario simile, denominato scenario 2, caratterizzato da valori identici, se non per la potenza del caricatore, da 22 kW anziché 50. Caricatori di potenza superiore ai 25 kW sfruttano infatti la tecnologia a corrente continua (DC), per la quale sono richiesti molti più componenti all'interno degli apparecchi rispetto ai dispositivi funzionanti a corrente alternata (AC) e per questo presentano dei costi ben maggiori. Un caricatore da 50 kW, come è stato visto, ha un costo di acquisto che si aggira intorno ai 25'000 €, mentre un caricatore da 22 kW è acquistabile a circa 2'300 € (il valore preso come riferimento si riferisce al modello molto comune *JuiceBox* da 22 kW di Enel[21]). Per i dati riguardanti i costi d'acquisto dei caricatori sono stati utilizzati i prezzi relativi alle colonnine per la ricarica tramite cavo, in quanto non esiste ancora un mercato relativo ai caricatori per il Battery Swap. Le due tipologie di caricatori presentano sicuramente delle differenze per quanto riguarda le connessioni con l'accumulatore e la forma, ma condividono gran parte della componentistica, alla quale è associata la maggior parte dei costi e, pertanto, si possono considerare valori simili. Oltre al costo cambiano notevolmente i tempi di ricarica, che passano dalle 4 ore per singola batteria con caricatore da 50 kW, a 9 ore con caricatore da 22 kW (considerando sempre ricariche all'80%). Un tempo di ricarica molto più duraturo presenta sicuramente degli svantaggi ma permette di preservare più a lungo le condizioni delle batterie, che sono soggette a maggior degrado se sottoposte a ricariche più veloci. Oltre alla differenza appena citata, tutti i dati di input esposti in precedenza e che sono presentati di seguito valgono per entrambi gli scenari.

Il modello considera otto stazioni collocate lungo le autostrade nei pressi delle città di Torino, Milano, Bologna, Pescara, Roma, Salerno, R. Calabria e Taranto. Tali città sono state individuate tenendo conto delle distanze percorribili permesse dall'autonomia dalle batterie utilizzate e dalla normativa vigente sui riposi da parte degli autotrasportatori e in quanto centri urbani e logistici rilevanti sul territorio.

Ricavando i chilometri relativi ai vari percorsi tramite *Google Maps* e considerando una velocità media di 75 km/h (80 km/h è il limite imposto ai mezzi pesanti sulle autostrade italiane), sono stati poi stimati i tempi di percorrenza minimi e le batterie necessarie a effettuare tali viaggi, confrontando l'autonomia delle batterie con la lunghezza delle tratte. Nella tabella sottostante sono riassunti i risultati.

Tratta	Lunghezza	Durata minima di percorrenza	Consumo di batterie	Consumo appross. per eccesso
Torino - Bologna	306 km	4 h	2,45	3
Milano - Bologna	200 km	2:43 h	1,40	2
Bologna - Roma	356 km	4:35 h	2,85	3
Bologna - Pescara	370 km	4:30 h	2,96	3
Roma - Salerno	245 km	3 h	1,96	2
Salerno - R. Calabria	428 km	5:24 h	3,42	4
Pescara - Taranto	357 km	4:18 h	2,86	3

Tabella 2 - Dati di percorrenza e consumo di batterie relativi ad ogni tratta

In assenza di dati reali, per quanto riguarda i flussi che coinvolgono le varie stazioni e la relativa domanda è stato necessario un lavoro di stima. Considerando una flotta di 100 autoarticolati, in un primo momento è stato suddiviso il numero totale di camion nelle varie tratte di percorrenza, facendo delle stime con l'aiuto dei dati provenienti da AISCAT, relativi alle rilevazioni del traffico di mezzi pesanti sulla rete autostradale italiane nel secondo semestre del 2019, l'ultimo pre-pandemia (*Rif.* [16]). Nella tabella sottostante è riportata la suddivisione adottata.

Tratta	N° di camion che percorrono la tratta
Torino - Bologna - Roma	18
Torino - Bologna - Pescara	16
Milano - Bologna - Roma	20
Milano - Bologna - Pescara	18
Roma - Salerno - R. Calabria	18
Pescara - Taranto	10

Tabella 3 - Suddivisione degli autoarticolati per tratta autostradale

Come punto di partenza per ottenere una sequenza di flussi giornalieri, suddivisi per fascia oraria, sono stati ipotizzati gli orari di arrivo dei camion presso le stazioni finali e il numero di camion coinvolti per ogni fascia oraria. Andando poi a ritroso sono stati tracciati i viaggi relativi a ogni tratta e ad ogni direzione di percorrenza, considerando tempi di 9-10 ore, in base alla tratta presa in considerazione, (9 ore è il tempo massimo in viaggio previsto dalla normativa sui riposi degli autotrasportatori, al quale è stata aggiunta 1 ora di pausa considerando lo swapping e il riposo dell'autista, che deve essere di almeno 45 minuti). Per i veicoli che arrivano al pomeriggio sono stati ipotizzati viaggi effettuati in un solo turno, mentre per i camion con arrivo al mattino e che, dunque, viaggiano di notte è stato suddiviso il viaggio in due parti con una pausa di 4 ore (anche questa scelta è coerente con la normativa vigente).

Come logica operativa, si è scelto che ogni veicolo sostituisca le batterie prima di partire per un nuovo viaggio.

Di seguito è riportata come esempio l'analisi dei flussi relativi alla tratta Torino - Bologna - Roma. Si inizia tracciando i viaggi diretti verso sud.

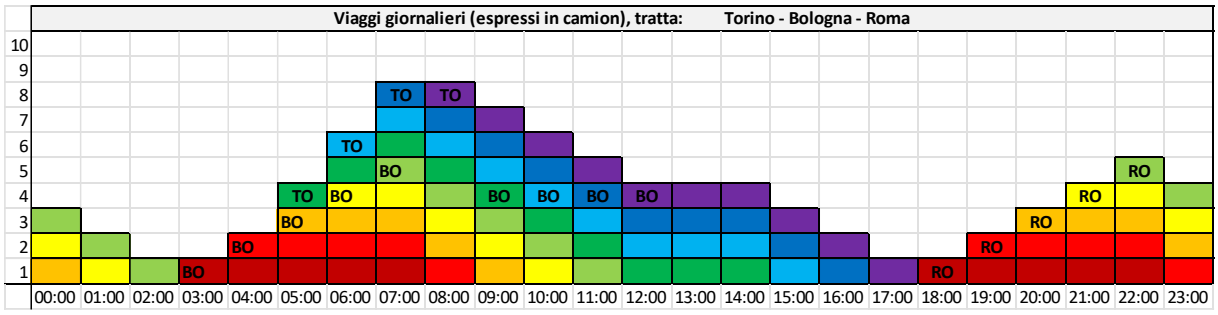


Figura 19 - Rappresentazione dei viaggi e degli intervalli di scambio batterie relativi alla tratta Torino - Bologna - Roma, direzione Roma

I viaggi dei camion assumono un colore diverso in base alla fascia oraria di arrivo e ogni livello orizzontale rappresenta un veicolo. Per tutti i viaggi sono stati individuati gli intervalli nei quali avvengono le sostituzioni delle batterie (rappresentati all'interno delle celle dalla sigla della località nelle quali avvengono, nella fascia oraria corrispondente alla sosta di ogni viaggio). Tali intervalli dedicati allo scambio, sono poi riportati nella sequenza temporale di ogni stazione coinvolta. Di seguito sono mostrati gli intervalli nei quali è richiesta una sostituzione e il numero di veicoli che ne fanno richiesta per le BSS di Torino e Bologna, relativi ai viaggi appena analizzati. Ad ogni rettangolo corrisponde un autoarticolato.

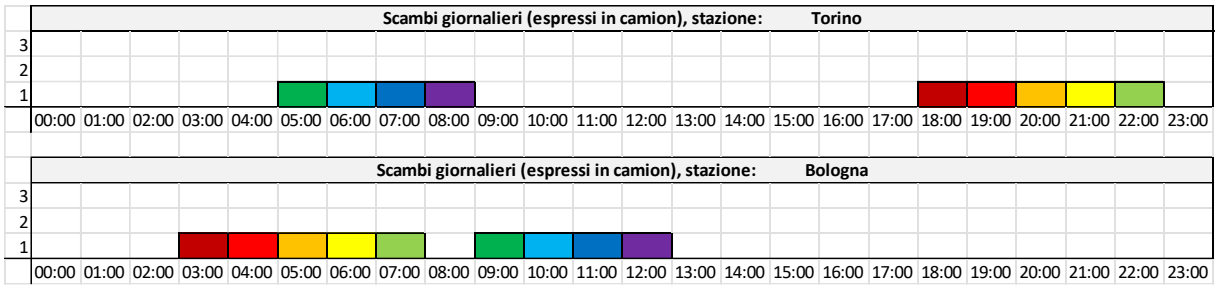


Figura 20 - Richieste di sostituzione per le BSS di Torino e Bologna, relativamente ai viaggi della tratta Torino - Bologna - Roma, percorsa in direzione Roma

Tale analisi è ripetuta per la direzione opposta della stessa tratta (nell'esempio riportato, la tratta Torino - Bologna - Roma, percorsa, questa volta, in direzione Torino).

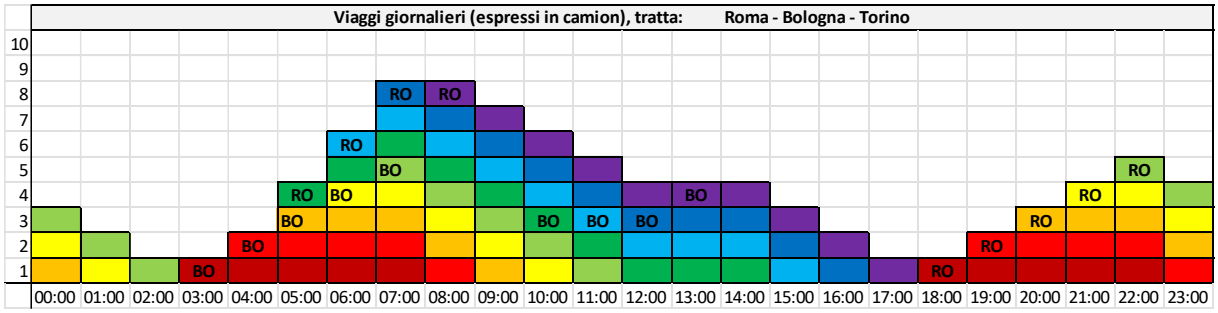


Figura 21 - Rappresentazione dei viaggi e degli intervalli di scambio batterie relativi alla tratta Torino - Bologna - Roma, direzione Torino

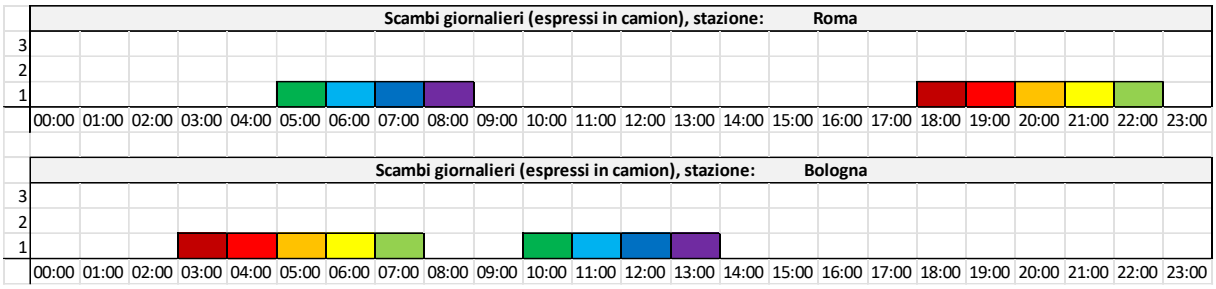


Figura 22 - Richieste di sostituzione per le BSS di Torino e Bologna, relativamente ai viaggi della tratta Torino - Bologna - Roma, percorsa in direzione Torino

Mettendo insieme le sequenze di richieste per ogni BSS, relative ad entrambe le direzioni, e utilizzando i dati sul consumo di batterie approssimati per eccesso (si veda pag. 30), si ottengono le batterie richieste e rilasciate in ogni stazione per una determinata tratta. Di seguito è riportata la domanda totale e l'offerta totale (che in questo caso coincidono, poiché le due sezioni della tratta richiedono entrambe il consumo di 3 batterie) relativa alla tratta Torino - Bologna - Roma.

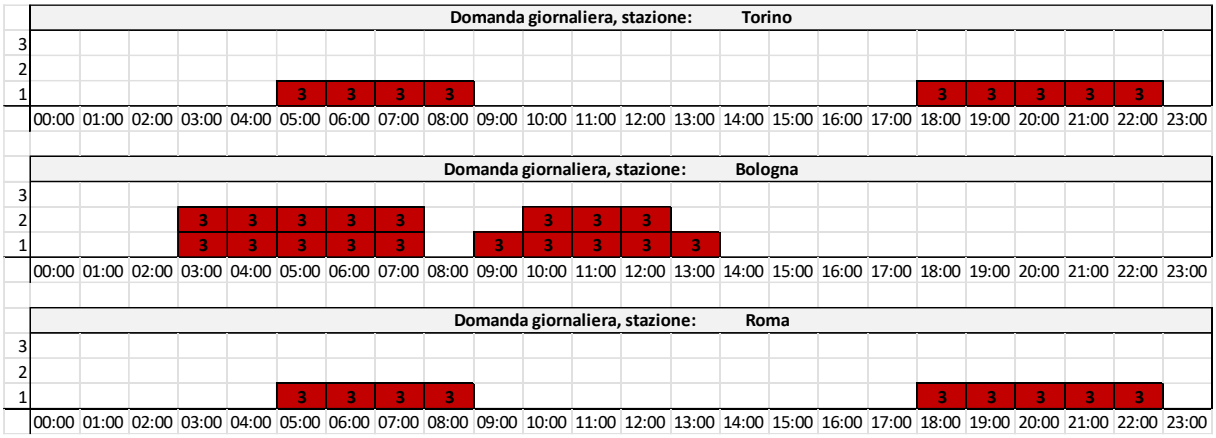


Figura 23 - Domanda totale relativa alla tratta Torino - Bologna - Roma

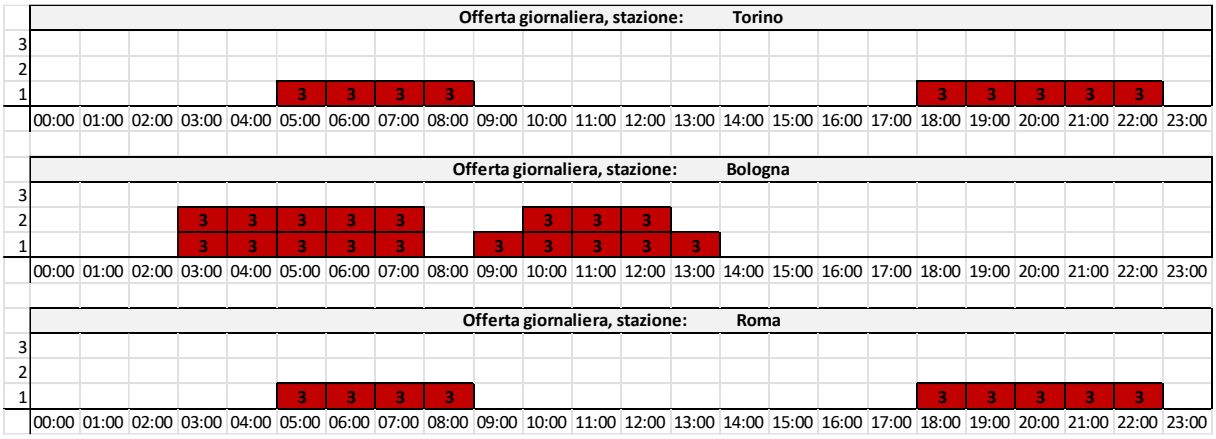


Figura 24 - Offerta totale relativa alla tratta Torino - Bologna - Roma

Infine, per ottenere la distribuzione della domanda e dell'offerta totali di ogni stazione si effettua la stessa analisi per tutte le tratte e si mettono insieme i risultati. Nell'allegato denominato *Stima dei flussi* è presente l'analisi completa relativa ad ogni percorso, mentre nella rappresentazione sottostante sono riportati i risultati finali. Ad ogni colore corrisponde la domanda proveniente da una certa tratta:

- bordeaux: tratta Torino - Bologna - Roma;
- blu: tratta Torino - Bologna - Pescara;
- arancione: tratta Milano - Bologna - Roma;
- viola: tratta Milano - Bologna - Pescara;
- verde: tratta Pescara - Taranto;
- giallo: tratta Roma - Salerno - R. Calabria.

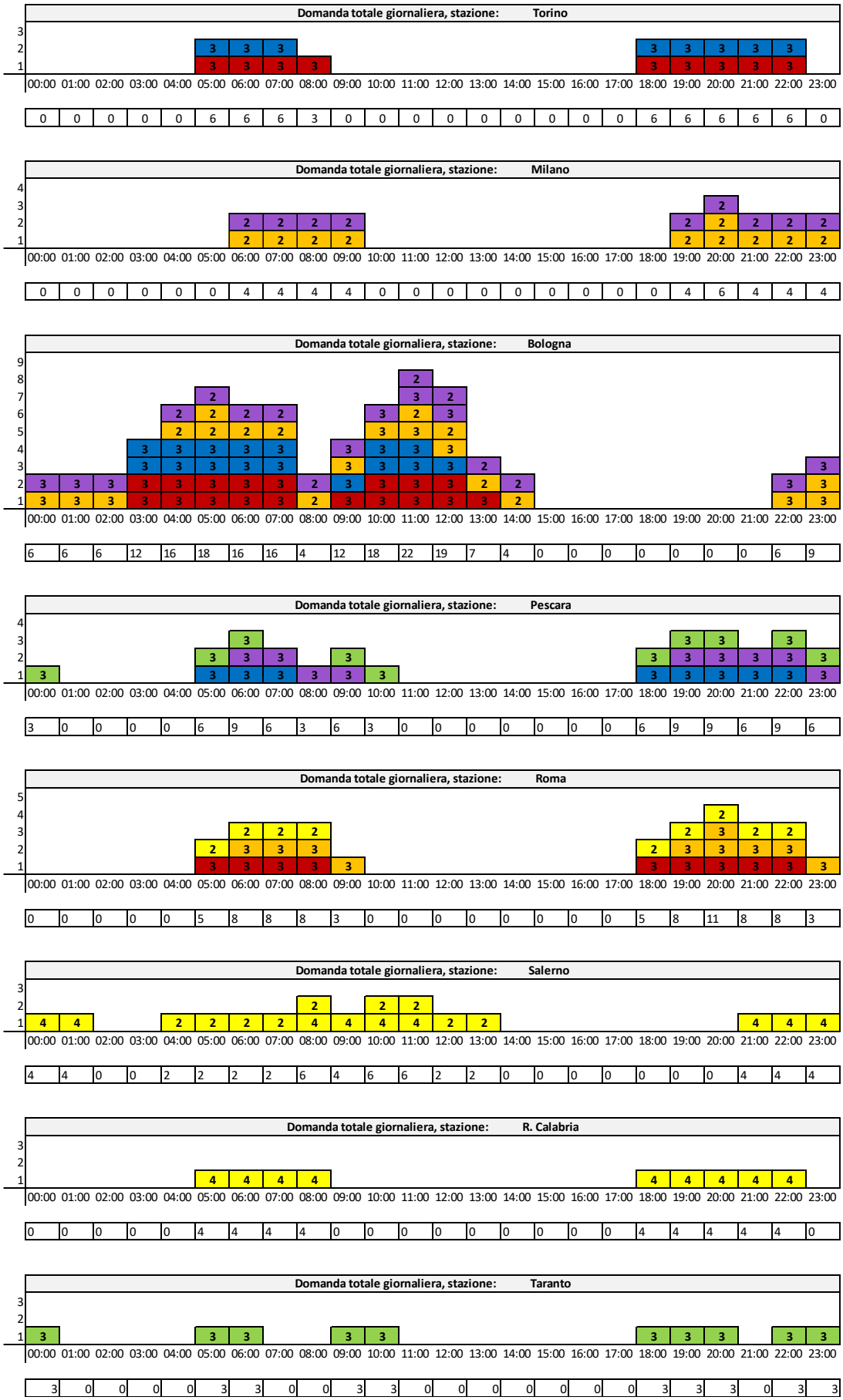


Figura 25 - Domanda totale giornaliera per ogni stazione della rete

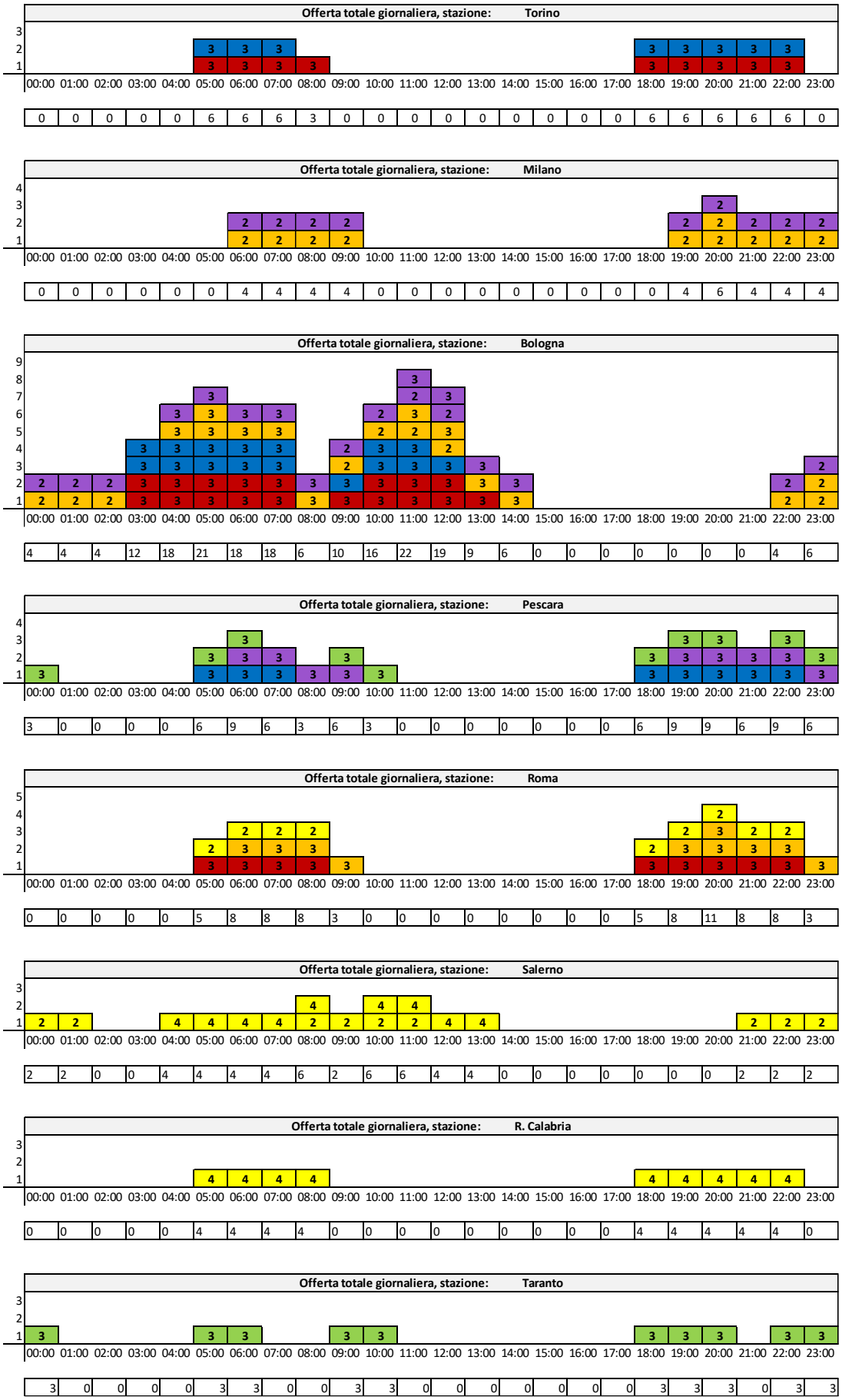


Figura 26 - Offerta totale giornaliera per ogni stazione della rete

Da tali risultati si ottengono infine le seguenti tabelle, rappresentanti la nuova domanda e la nuova offerta di batterie per ogni BSS e per ogni intervallo di tempo.

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
TO	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0
MI	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
BO	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9
PE	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
RO	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
SA	4	4	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
RC	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
TA	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3

Tabella 4 - Nuova domanda di batterie per ogni BSS e ogni intervallo di tempo

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
TO	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0
MI	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
BO	4	4	4	12	18	21	18	18	6	10	16	22	19	9	6	0	0	0	0	0	0	0	4	6
PE	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
RO	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
SA	2	2	0	0	4	4	4	4	6	2	6	6	4	4	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
RC	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
TA	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3

Tabella 5 - Nuova offerta di batterie per ogni BSS e ogni intervallo di tempo

Si può facilmente notare come per le stazioni di testa (Torino, Milano, Roma, Reggio Calabria, Pescara e Taranto) la domanda e l'offerta di batterie coincidano, mentre per le BSS intermedie (Bologna e Salerno) vi siano delle variazioni. Il motivo è che per le prime il percorso in arrivo e in partenza è lo stesso e, dunque, è richiesto un consumo identico di batterie, mentre le stazioni intermedie suddividono la tratta in due sezioni differenti che richiedono un consumo diverso di batterie. Questo fa sì che i veicoli ne scarichino un certo numero e ne richiedano un quantitativo diverso per affrontare la sezione di tratta successiva.

Poiché il sistema inizia ad operare a partire da una situazione in cui è fermo e non vi sono camion che si muovono lungo la rete né sostituzioni di batterie, è necessario fare una distinzione per i flussi che avvengono al primo giorno. Durante il primo giorno, infatti, vengono effettuati i viaggi che partono e si concludono nell'arco della giornata e quelli che partono durante il primo giorno e si concludono il giorno successivo. Non sono invece da considerare i viaggi che arrivano al mattino, poiché è impossibile che siano partiti la sera precedente, in quanto il sistema non era operativo. Non devono neanche essere considerati gli scambi prima della partenza iniziale, poiché nel momento iniziale si assume che i mezzi abbiano già a bordo delle batterie cariche e che siano dunque pronti ad affrontare la prima tratta. Dall'analisi esposta precedentemente, si possono facilmente escludere tali scambi e ottenere la nuova domanda e la nuova offerta durante il primo giorno di attività, che vengono riportate qui sotto.

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9
PE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
RO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SA	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
RC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3

Tabella 6 - Nuova domanda di batterie durante il primo giorno di attività

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BO	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	16	22	19	9	6	0	0	0	0	0	0	0	4	6
PE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
RO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SA	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	6	4	4	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
RC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3

Tabella 7 - Nuova offerta di batterie durante il primo giorno di attività

Da tali dati è possibile ricavare le matrici finali rappresentanti la domanda e l'offerta, da fornire in input al modello di ottimizzazione su Matlab. Per l'ottimizzazione è stato preso in considerazione un orizzonte temporale di sette giorni, in modo da rappresentare una settimana di attività. Per flussi regolarmente ripetuti nel tempo come quelli considerati, in realtà, i risultati non variano per tempi maggiori o uguali a quattro giorni. Per ottenere la matrice vengono quindi posti in sequenza, per ogni BSS, il vettore rappresentante il primo giorno e sei volte il vettore della domanda o dell'offerta per i giorni successivi al primo (si veda il paragrafo 5.3).

5. Il modello di ottimizzazione

Il presente capitolo ha come argomento il modello di ottimizzazione proposto, analizzandolo nelle sue varie fasi e, infine, discutendone i risultati.

5.1 Impostazione del modello di ottimizzazione e assunzioni

Si è preferito suddividere il tempo in intervalli regolari piuttosto che considerare gli istanti puntuali. Tale soluzione permette di gestire molto più facilmente i molteplici eventi presi in considerazione, trattando ogni periodo come una sorta di "black box", della quale sono utilizzati i dati all'inizio e alla fine del frangente, dove la fine di un intervallo coincide con l'inizio di quello successivo.

Non è scopo del modello di ottimizzazione il problema del posizionamento ottimo delle stazioni. La posizione delle BSS è già stabilita ed è legata ai dati di input relativi ai flussi medi dei mezzi su ogni tratta e per ogni periodo di tempo. Tali informazioni, congiuntamente ai fabbisogni di batterie per ogni tratta, forniscono la domanda di interesse di ogni stazione nei vari intervalli di tempo. Riguardo alle stazioni, non sono stati considerati vincoli sul dimensionamento che limitassero il numero di batterie o di caricatori per motivi economici o di spazio e non sono stati considerati limiti di capacità relativi all'attività di scambio. Tale operazione richiede infatti pochi minuti ed una sua modellizzazione è stata ritenuta secondaria.

La logica scelta per gestire la coda dei veicoli e la coda relativa alla ricarica delle batterie è la logica FIFO (First In First Out), che prevede che venga servito il primo "oggetto" in ordine d'arrivo. Questa scelta risulta realistica per il servizio dei mezzi in arrivo, in quanto avviene normalmente la stessa cosa per il rifornimento di carburante. Per quanto riguarda la ricarica delle batterie, la regola FIFO è stata affiancata alla logica di ricarica immediata, ovvero ogni batteria appena scaricata è messa in carica subito o appena vi sia un caricatore libero disponibile. Tale decisione, oltre a rendere la modellizzazione più semplice, è dettata dalla preferenza per la massimizzazione dell'uso delle batterie, piuttosto che per la gestione dilazionata delle ricariche, legata ai costi più o meno vantaggiosi dell'energia. Lo scopo principale del modello è infatti fornire un primo dimensionamento, piuttosto che indagare nel dettaglio la gestione delle ricariche. Un'ulteriore motivazione è legata al contesto di applicazione. A differenza dell'utilizzo in ambito cittadino, maggiormente studiato, come i servizi di car sharing, la rete di stazioni in questione si colloca sulle principali arterie autostradali italiane ed è atta al servizio di mezzi pesanti durante la percorrenza delle proprie tratte lavorative. Per tale motivo è molto importante prediligere la massimizzazione della probabilità di servire in tempo la domanda, poiché il contesto è relativo ai trasporti e poiché le alternative possibili su una tratta autostradale non esistono. Sempre per quest'ultimo motivo, è stato ipotizzato che la domanda non soddisfatta immediatamente attenda la disponibilità di batterie e non venga persa, come invece potrebbe accadere in una rete urbana, nella quale un cliente può scegliere di recarsi presso un'altra stazione o di ricaricare il veicolo elettrico in altro modo.

Il modello prevede che ogni autoarticolato ospiti più batterie a bordo, frammentando, dunque, il fabbisogno energetico dei mezzi. Ogni batteria può, però, assumere unicamente gli stati di "carica" o "scarica", dove le batterie prelevate dai camion sono da considerarsi scariche. Tali batterie assumeranno lo stato di "cariche" solamente al termine dei T_r periodi previsti per la ricarica.

Per concludere, il livello di servizio è stato calcolato non sui veicoli in arrivo, ma più generalmente sul numero di batterie fornite sul totale richiesto, poiché ogni camion potrebbe lasciare un numero variabile di accumulatori.

5.2 Spiegazione del modello di ottimizzazione

Funzione obiettivo

Per quanto riguarda la funzione obiettivo, è stata utilizzata una funzione di costo, che minimizzasse i costi di acquisto e manutenzione di batterie e caricatori, tenendo conto dei cicli di vita differenti delle due risorse. Una formula che si presta perfettamente a tale scopo è la formula del Costo Annuo Equivalente (CAE). Tale metodo considera il costo non solo come una spesa, ma come un investimento, i cui flussi di cassa hanno valore diverso in funzione del tempo e permette di confrontare due investimenti dalla durata differente. Il risultato è una sorta di rateizzazione fittizia, che risulta equivalente all'acquisto perpetrato nel tempo, a intervalli regolari pari ai rispettivi cicli di vita, delle due risorse. Il CAE relativo alle batterie e quello relativo ai caricatori, sono sommati per ottenere un costo annuo equivalente totale.

$$CAE = C \cdot \frac{r \cdot (1+r)^L}{(1+r)^L - 1}$$

La funzione da minimizzare sarà dunque la seguente.

$$CAE_{tot} = B_{tot} \cdot CAE_B + Ch_{tot} \cdot CAE_{Ch} \tag{1}$$

I costi annui equivalenti per singola batteria e per singolo caricatore sono rispettivamente:

$$CAE_B = \left(C_B \cdot \frac{r \cdot (1+r)^{L_B}}{(1+r)^{L_B} - 1} + u_B \right) \tag{2}$$

$$CAE_{Ch} = \left(C_{CH} \cdot \frac{r \cdot (1+r)^{L_{Ch}}}{(1+r)^{L_{Ch}} - 1} + u_{Ch} \right) \tag{3}$$

Dove C_B e C_{Ch} sono i costi d'acquisto unitari di batterie e caricatori, L_B e L_{Ch} sono i cicli di vita di batterie e caricatori e u_B e u_{Ch} sono i costi di manutenzione annuali.

B_{tot} e Ch_{tot} invece rappresentano rispettivamente il totale delle batterie e dei caricatori allocati nelle varie BSS della rete, ovvero la somma dei valori ottimi ottenuti per ogni stazione:

$$B_{tot} = \sum_{i=1}^{N} B^i \tag{4}$$

$$Ch_{tot} = \sum_{i=1}^{N} Ch^i \tag{5}$$

Modellizzazione della domanda e del suo soddisfacimento

La domanda di batterie per la stazione i in un intervallo di tempo t è data dalla somma tra la nuova domanda arrivata in tale intervallo, $D_n^i(t)$, e la domanda inevasa nell'intervallo precedente, $D_o^i(t-1)$.

$$D^i(t) = D_n^i(t) + D_o^i(t-1) \qquad \forall i,t \qquad (6)$$

La domanda sopraggiunta nella stazione i in un intervallo di tempo t, ovvero la nuova domanda, è ottenuta sommando i flussi in uscita dalla stazione in tale intervallo moltiplicati per le rispettive batterie necessarie a percorrere le tratte.

$$D_n^j(t) = \sum_{k=1}^{N} (Fl^{jk}(t) \cdot B_n^{jk}) \qquad \forall j,t \qquad (7)$$

In modo simile, le batterie scariche lasciate nella stazione i in un intervallo di tempo t, ovvero la nuova offerta, è ottenuta sommando i flussi in entrata alla stazione in tale intervallo moltiplicati per le rispettive batterie necessarie a percorrere le tratte.

$$O_n^j(t) = \sum_{i=1}^{N} (Fl^{ij}(t) \cdot B_n^{ij}) \qquad \forall j,t \qquad (8)$$

Le batterie scambiate in una stazione nell'intervallo di tempo t sono pari alle batterie cariche disponibili, qualora la domanda in quell'intervallo di tempo sia maggiore, mentre sono pari alla domanda, qualora questa sia minore delle batterie cariche disponibili. Va infatti rispettato il vincolo di capacità, per il quale non si possono scambiare più batterie di quante ve ne siano disponibili ($B_s^i(t) \leq B_c^i(t)$). Allo stesso tempo le batterie scambiate non possono eccedere la domanda ($B_s^i(t) \leq D^i(t)$) e si vuole massimizzare il numero di batterie scambiate in un intervallo, per soddisfare più domanda possibile. Tali condizioni fanno sì che il numero di batterie da scambiare in un intervallo sia semplicemente pari al valore minore tra le batterie cariche disponibili in i all'inizio di quel periodo e la domanda totale di quel periodo in i.

$$B_s^i(t) = min(B_c^i(t), D^i(t))$$

Tale vincolo risulta essere, però, non lineare. Per evitare che ciò si verifichi, si può sostituire la precedente equazione con un sistema di sei vincoli, ottenendo un significato equivalente.

Per modellizzare tali vincoli è necessario servirsi di una variabile binaria fittizia y e di una costante M, soprannominata comunemente in ricerca operativa "Big M". Tale costante assume il valore di un numero positivo molto grande, o comunque maggiore dei possibili valori delle variabili in questione.

$$D^i(t) - B_c^i(t) \leq M \cdot y^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (9)$$

$$B_c^i(t) - D^i(t) \leq M \cdot \left(1 - y^i(t)\right) \qquad \forall i,t \qquad (10)$$

$$B_s^i(t) \leq B_c^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (11)$$

$$B_s^i(t) \leq D^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (12)$$

$$B_s^i(t) \geq B_c^i(t) - M \cdot (1 - y^i(t)) \qquad \forall i,t \qquad (13)$$

$$B_s^i(t) \geq D^i(t) - M \cdot y^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (14)$$

Di questi vincoli, i primi due definiscono il funzionamento di y, mentre gli altri quattro, combinati ai precedenti, fanno sì che $B_s^i(t) = \min(B_c^i(t), D^i(t))$.

Per finire, la domanda inevasa nell'intervallo t è data dalla domanda all'inizio di tale intervallo meno le batterie effettivamente sostituite nell'intervallo di tempo

$$D_o^i(t) = D^i(t) - B_s^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (15)$$

Modellizzazione della gestione delle batterie nella BSS

Come è stato già detto, la messa in carica delle batterie segue una logica FIFO e, dunque, ogni batteria scaricata da un mezzo seguirà quelle lasciate in precedenza nel susseguirsi delle fasi di ricarica e successivo prelievo.

Gli stati che può assumere una batteria sono i seguenti:

- scarica: e dunque in attesa di essere caricata ($B_w^i(t)$);
- in ricarica: tale gruppo di batterie si suddivide ulteriormente in base al periodo in cui i vari accumulatori sono stati messi in carica e quindi in base allo stato di carica ($B_r^i(t)$, dove t è il periodo in cui è stata messa a caricare);
- carica: e dunque disponibile ad essere sostituita ($B_c^i(t)$);
- scambiata: batteria carica prelevata per essere montata su un camion al tempo t ($B_s^i(t)$).

Di seguito è proposto uno schema che permette di comprendere meglio la successione delle fasi e, insieme alle spiegazioni dei vincoli, il funzionamento della BSS. La figura mostra l'evoluzione della gestione delle batterie in una stazione di testa, nella quale batterie lasciate e prelevate coincidono sempre. Per le stazioni intermedie, dove le due quantità possono variare valgono considerazioni molto simili, con la differenza, appunto, che il numero di batterie in attesa di ricarica in un intervallo può essere diverso dalla domanda in tale intervallo.

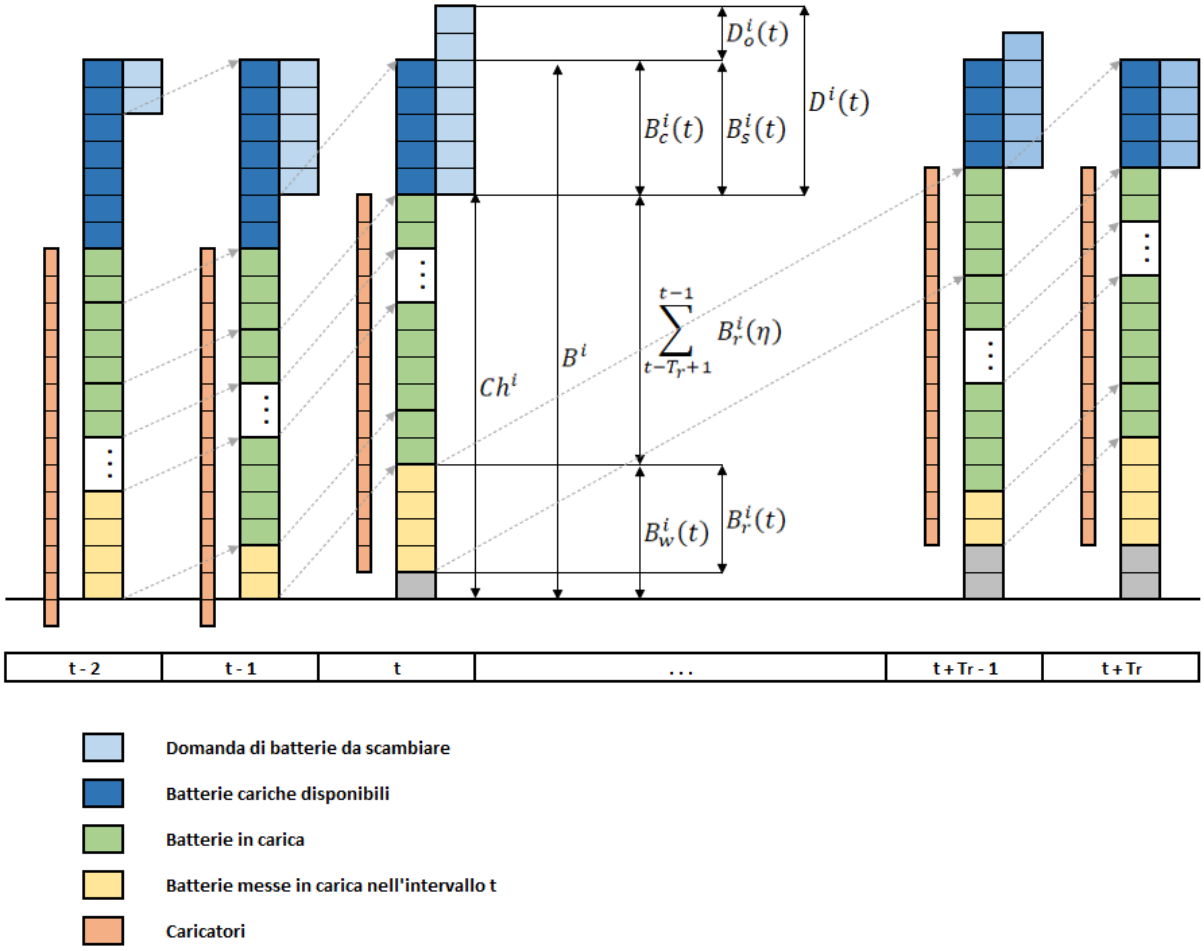


Figura 27 - Schema della modellizzazione del funzionamento di una BSS.

Le batterie cariche disponibili all'inizio dell'intervallo t sono date dalle batterie cariche all'inizio dell'intervallo di tempo precedente, meno quelle sostituite nell'intervallo di tempo precedente (e dunque non più disponibili), più quelle che hanno finito di caricarsi nell'intervallo presente, ovvero le batterie messe in carica all'intervallo $t - T_r$.

$$B_c^i(t) = B_c^i(t-1) - B_s^i(t-1) + B_r^i(t-T_r) \qquad \forall i,t \qquad (16)$$

Le batterie in attesa di ricarica all'inizio dell'intervallo di tempo t sono ottenute sottraendo a quelle in attesa all'inizio dell'intervallo precedente le batterie messe in carica nell'intervallo precedente e sommando le batterie scariche rimosse dai camion in arrivo nel corso del periodo precedente. Come si può osservare dallo schema mostrato precedentemente, la totalità o una parte di queste batterie in attesa potrà essere ricaricata, qualora vi siano caricatori liberi a inizio periodo.

$$B_w^i(t) = B_w^i(t-1) - B_r^i(t-1) + O_n^i(t-1) \qquad \forall i,t \qquad (17)$$

I caricatori liberi all'inizio del periodo t nella stazione i sono pari ai caricatori totali in tale stazione meno i caricatori occupati dalle batterie messe in carica nei periodi precedenti e non ancora completamente cariche.

$$Ch_l^i(\mathrm{t}) = Ch^i - \sum_{t-T_r+1}^{t-1} B_r^i(\eta) \qquad \forall i,t \qquad (18)$$

Le batterie ricaricate in una stazione nell'intervallo di tempo t sono pari alle batterie in attesa di ricarica, qualora siano in numero minore rispetto ai caricatori liberi, mentre sono pari ai caricatori disponibili, qualora questi siano meno delle batterie scariche in attesa. Va infatti rispettato il vincolo di capacità, per il quale non si possono caricare più batterie di quanti siano i caricatori ($B_r^i(t) \leq Ch_l^i(\mathrm{t})$). Allo stesso tempo non avrebbe senso mettere in carica più batterie di quante siano quelle scariche ($B_r^i(t) \leq B_w^i(t)$) e si vuole massimizzare il numero di batterie messe in carica in un intervallo, in modo da avere più probabilità di soddisfare la domanda nei periodi successivi. Tali condizioni fanno sì che il numero di batterie da mettere in carica in un intervallo sia semplicemente pari al valore minore tra le batterie in attesa di ricarica in i all'inizio del periodo e i caricatori liberi in quel momento.

$$B_r^i(t) = \min(B_w^i(t), Ch_l^i(\mathrm{t}))$$

Tale vincolo risulta essere, però, non lineare. Per evitare che ciò si verifichi, si può procedere in modo del tutto simile a quanto fatto in precedenza, sostituendo la precedente equazione con un sistema di sei vincoli per ottenere un significato equivalente.

Anche in questo caso ci si serve di una variabile binaria fittizia z e della costante "Big M".

$$B_w^i(t) - Ch_l^i(\mathrm{t}) \leq M \cdot z^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (19)$$

$$Ch_l^i(\mathrm{t}) - B_w^i(t) \leq M \cdot \left(1 - z^i(t)\right) \qquad \forall i,t \qquad (20)$$

$$B_r^i(t) \leq Ch_l^i(\mathrm{t}) \qquad \forall i,t \qquad (21)$$

$$B_r^i(t) \leq B_w^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (22)$$

$$B_r^i(t) \geq Ch_l^i(\mathrm{t}) - M \cdot \left(1 - z^i(t)\right) \qquad \forall i,t \qquad (23)$$

$$B_r^i(t) \geq B_w^i(t) - M \cdot z^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (24)$$

Di questi vincoli, i primi due definiscono il funzionamento di z, mentre gli altri quattro, combinati ai precedenti, fanno sì che $B_r^i(t) = \min(B_w^i(t), Ch_l^i(\mathrm{t}))$.

Per concludere, si introduce un vincolo di livello di servizio. Il livello di servizio, nella gestione delle scorte, rappresenta la probabilità attesa di non incorrere in una rottura di stock ed è un indice che mostra la capacità di soddisfare la domanda. In questo caso, si impone che il livello di servizio in ogni intervallo di tempo sia maggiore o uguale a una certa soglia ed è calcolato come percentuale di domanda soddisfatta in ogni intervallo ($D^i(t) - D_o^i(t)$) sul totale della domanda. Inoltre, tale vincolo è ciò che fa sì che le batterie e i caricatori allocati in ogni stazione siano in numero maggiore di zero. Senza di esso, infatti, tutti gli altri vincoli sarebbero soddisfatti anche con quantità nulle ed il costo sarebbe effettivamente il minimo possibile (costo nullo).

$$LS^i = \frac{\sum_{t=0}^{T} D^i(t) - \sum_{t=1}^{T} D_o^i(t)}{\sum_{t=0}^{T} D^i(t)} \cdot 100 \geq LS_{min} \qquad \forall i, t \qquad (25)$$

Di seguito viene riportato per maggiore chiarezza l'elenco di variabili e parametri utilizzati ed il modello di ottimizzazione nella sua interezza.

Variabili e parametri (in ordine di apparizione nel modello):

$T = cost$ → Intervalli di tempo considerati

$N = cost$ → Numero di nodi (stazioni) presenti nel grafo del sistema

$CAE_{tot} \in \mathbb{R}^+$ → Costo annuo equivalente totale di investimento per batterie e caricatori

$CAE_B \in \mathbb{R}^+$ → Costo annuo equivalente di investimento per singola batteria

$CAE_{Ch} \in \mathbb{R}^+$ → Costo annuo equivalente di investimento per singolo caricatore

$B_{tot} \in \mathbb{N}$ → Batterie totali presenti nel sistema

$Ch_{tot} \in \mathbb{N}$ → Caricatori totali presenti nel sistema

$C_B = cost$ → Costo d'acquisto una singola batteria

$C_{Ch} = cost$ → Costo d'acquisto un singolo caricatore

$L_B = cost$ → Vita utile di una batteria

$L_{Ch} = cost$ → Vita utile di un caricatore

$u_B = cost$ → Costo annuale di manutenzione di una batteria

$u_{Ch} = cost$ → Costo annuale di manutenzione di un caricatore

$r = cost$ → Tasso di sconto dell'investimento

$D_n^i(t) = cost$ → Nuova domanda di batterie da sostituire nella stazione i nell'intervallo di tempo t

$O_n^i(t) = cost$ → Nuova offerta di batterie da sostituire nella stazione i nell'intervallo di tempo t

$Fl^{ij}(\mathrm{t}) = cost$ → Flusso di veicoli in arrivo nel periodo t nella stazione j, provenienti dalla stazione i

$B_n^{ij} = cost$ → Batterie necessarie a coprire la tratta i- j

$D^i(t) \in \mathbb{N}$ → Domanda di batterie da sostituire nella stazione i nell'intervallo di tempo t

$D_o^i(t) \in \mathbb{N}$ → Domanda inevasa nella stazione i nell'intervallo di tempo t

$B_c^i(t) \in \mathbb{N}$ → Batterie cariche (e dunque disponibili) nella stazione i all'inizio del periodo t

$M = cost$ → Big M, numero molto grande rispetto ai valori in questione

$y^i(t) \in [0,1]$ → Variabile binaria fittizia che assume valore 1 quando $B_c^i(t) < D^i(t)$, 0 altrimenti

$B_s^i(t) \in \mathbb{N}$ → Batterie sostituite nella stazione *i* nell'intervallo di tempo t

$T_r = cost$ → Tempo di ricarica (espresso in intervalli di tempo) di una singola batteria

$Ch_l^i(\mathrm{t}) \in \mathbb{N}$ → Caricatori liberi nella stazione *i* all'inizio dell'intervallo di tempo t

$B_w^i(t) \in \mathrm{N}$ → Batterie scariche (e dunque in attesa di ricarica) nella stazione *i* all'inizio del periodo *t*

$z^i(t) \in [0,1]$ → Variabile binaria fittizia che assume valore 1 quando $Ch_l^i(\mathrm{t}) < B_w^i(t)$, 0 altrimenti

$B_r^i(t) \in \mathrm{N}$ → Batterie andate in ricarica nella stazione *i* nell'intervallo di tempo *t*

Modello:

$f.o.$

$$min \quad CAE_{tot} = B_{tot} \cdot CAE_B + Ch_{tot} \cdot CAE_{Ch} \tag{1}$$

$$CAE_B = \left(C_B \cdot \frac{r \cdot (1+r)^{L_B}}{(1+r)^{L_B} - 1} + u_B \right) \tag{2}$$

$$CAE_{Ch} = \left(C_{CH} \cdot \frac{r \cdot (1+r)^{L_{Ch}}}{(1+r)^{L_{Ch}} - 1} + u_{Ch} \right) \tag{3}$$

$$B_{tot} = \sum_{i=1}^{N} B^i \tag{4}$$

$$Ch_{tot} = \sum_{i=1}^{N} Ch^i \tag{5}$$

$vincoli$

$$D^i(t) = D_n^i(t) + D_o^i(t-1) \qquad \forall i,t \tag{6}$$

$$D_n^j(t) = \sum_{k=1}^{N} (Fl^{jk}(t) \cdot B_n^{jk}) \qquad \forall j,t \tag{7}$$

$$O_n^j(t) = \sum_{i=1}^{N} (Fl^{ij}(t) \cdot B_n^{ij}) \qquad \forall j,t \tag{8}$$

$$D^i(t) - B_c^i(t) \leq M \cdot y^i(t) \qquad \forall i,t \tag{9}$$

$$B_c^i(t) - D^i(t) \leq M \cdot \left(1 - y^i(t)\right) \qquad \forall i,t \tag{10}$$

$$B_s^i(t) \leq B_c^i(t) \qquad \forall i,t \tag{11}$$

$$B_s^i(t) \leq D^i(t) \qquad \forall i,t \tag{12}$$

$$B_s^i(t) \geq B_c^i(t) - M \cdot (1 - y^i(t)) \qquad \forall i,t \qquad (13)$$

$$B_s^i(t) \geq D^i(t) - M \cdot y^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (14)$$

$$D_o^i(t) = D^i(t) - B_s^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (15)$$

$$B_c^i(t) = B_c^i(t-1) - B_s^i(t-1) + B_r^i(t-T_r) \qquad \forall i,t \qquad (16)$$

$$B_w^i(t) = B_w^i(t-1) - B_r^i(t-1) + O_n^i(t-1) \qquad \forall i,t \qquad (17)$$

$$Ch_l^i(\mathrm{t}) = Ch^i - \sum_{t-T_r+1}^{t-1} B_r^i(\eta) \qquad \forall i,t \qquad (18)$$

$$B_w^i(t) - Ch_l^i(\mathrm{t}) \leq M \cdot z^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (19)$$

$$Ch_l^i(\mathrm{t}) - B_w^i(t) \leq M \cdot \left(1 - z^i(t)\right) \qquad \forall i,t \qquad (20)$$

$$B_r^i(t) \leq Ch_l^i(\mathrm{t}) \qquad \forall i,t \qquad (21)$$

$$B_r^i(t) \leq B_w^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (22)$$

$$B_r^i(t) \geq Ch_l^i(\mathrm{t}) - M \cdot \left(1 - z^i(t)\right) \qquad \forall i,t \qquad (23)$$

$$B_r^i(t) \geq B_w^i(t) - M \cdot z^i(t) \qquad \forall i,t \qquad (24)$$

$$LS^i = \frac{\sum_{t=0}^{T} D^i(t) - \sum_{t=1}^{T} D_o^i(t)}{\sum_{t=0}^{T} D^i(t)} \cdot 100\% \geq LS_{min} \qquad \forall i,t \qquad (25)$$

5.3 Risoluzione del modello di ottimizzazione

Per la risoluzione del modello di ottimizzazione è stato utilizzato il software *MATLAB*. Quest'ultimo è una piattaforma di programmazione e calcolo numerico, utilizzata per l'analisi di dati, lo sviluppo di algoritmi e la creazione di modelli. Insieme al software di base è possibile installare moltissimi toolbox aggiuntivi per attività più specifiche. Tra questi vi è l'*Optimization Toolbox,* tramite il quale è possibile definire il proprio problema di ottimizzazione mediante l'uso di funzioni e matrici oppure specificando espressioni variabili che riflettano il problema in questione. Citando il sito di *MathWorks*[24]: "Optimization Toolbox offre funzioni al fine di trovare parametri in grado di minimizzare o massimizzare gli obiettivi e allo stesso tempo soddisfare i vincoli. Il toolbox include risolutori per la programmazione lineare (LP), la programmazione lineare mista intera (MILP), la programmazione quadratica (QP), la programmazione a cono di secondo ordine (SOCP), la programmazione non lineare (NLP), i minimi quadrati lineari vincolati, i minimi quadrati non lineari e le equazioni non lineari."

Figura 28 - Logo di MATLAB
Fonte: sito MathWorks[24]

Rispetto al modello matematico esposto in precedenza, il modello implementato su MATLAB presenta alcune variazioni legate al linguaggio di programmazione e all'uso di funzioni proprie dell'ambiente di lavoro, ma soprattutto delle variazioni dovute alla gestione e all'applicazione dei vincoli. In seguito, è mostrato nel dettaglio il modello e l'algoritmo di gestione dei vincoli, nel quale i commenti esplicativi ai vari passaggi compaiono in verde e in seguito al simbolo di percentuale "%". Le matrici di nuova domanda e offerta di batterie (Dn e On) sono state ricavate nel modo descritto al fondo del paragrafo 4.1.

```
bssproblem = optimproblem;
% Denominazione del problema di ottimizzazione

% Definizione dei parametri del modello
N = 8;
% Numero di nodi (BSS) considerati
T = 168;
% Numero di periodi di tempo da 1h considerati (pari a 7 giorni)

Dn = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0
0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6
6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0
0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0
0 6 6 6 6 6 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0
0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4
0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0
0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4
6 4 4 4;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 12 18 22 19 7 4 0 0 0 0 0 0 0 6 9 6 6 6 12 16 18 16 16 4 12 18
22 19 7 4 0 0 0 0 0 0 0 6 9 6 6 6 12 16 18 16 16 4 12 18 22 19 7 4 0 0 0 0 0 0 0 6
9 6 6 6 12 16 18 16 16 4 12 18 22 19 7 4 0 0 0 0 0 0 0 6 9 6 6 6 12 16 18 16 16 4
12 18 22 19 7 4 0 0 0 0 0 0 0 6 9 6 6 6 12 16 18 16 16 4 12 18 22 19 7 4 0 0 0 0 0
0 0 6 9 6 6 6 12 16 18 16 16 4 12 18 22 19 7 4 0 0 0 0 0 0 0 6 9;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0
0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6
3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0
0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9
9 6 9 6;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0
0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8
3 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0
```

```
0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0
5 8 11 8 8 3;
0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 6 6 2 2 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 2 2 2 2 6 4 6 6 2 2 0 0 0
0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 2 2 2 2 6 4 6 6 2 2 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 2 2 2 2 6 4
6 6 2 2 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 2 2 2 2 6 4 6 6 2 2 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0
0 2 2 2 2 6 4 6 6 2 2 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 2 2 2 2 6 4 6 6 2 2 0 0 0 0 0 0
0 4 4 4;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0
0 4 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0
0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0
0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4
4 4 4 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0
0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3
3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0
0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3
3 0 3 3];
;
% Matrice di domanda, dove ogni valore è la domanda della stazione i nel periodo t


On = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0
0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6
6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0
0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 6 6 6 6 0 0 0 0 0 0 6 6 6 3 0 0 0 0 0 0 0 0
0 6 6 6 6 6 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0
0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0
0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4
6 4 4 4;
0 0 0 0 0 0 0 0 3 10 16 22 19 9 6 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 12 18 21 18 18 6 10 16
22 19 9 6 0 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 12 18 21 18 18 6 10 16 22 19 9 6 0 0 0 0 0 0 0 4
6 4 4 4 12 18 21 18 18 6 10 16 22 19 9 6 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 12 18 21 18 18 6
10 16 22 19 9 6 0 0 0 0 0 0 0 4 6 4 4 4 12 18 21 18 18 6 10 16 22 19 9 6 0 0 0 0 0
0 0 4 6 4 4 4 12 18 21 18 18 6 10 16 22 19 9 6 0 0 0 0 0 0 0 4 6;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0
0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6
3 0 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0
0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9 9 6 9 6 3 0 0 0 0 6 9 6 3 6 3 0 0 0 0 0 0 0 6 9
9 6 9 6;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0
0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8
3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0
0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 11 8 8 3 0 0 0 0 0 5 8 8 8 3 0 0 0 0 0 0 0 0
5 8 11 8 8 3;
0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 6 6 4 4 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2 0 0 4 4 4 4 6 2 6 6 4 4 0 0 0
0 0 0 0 2 2 2 2 2 0 0 4 4 4 4 6 2 6 6 4 4 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2 0 0 4 4 4 4 6 2
6 6 4 4 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2 0 0 4 4 4 4 6 2 6 6 4 4 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2 0
0 4 4 4 4 6 2 6 6 4 4 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2 0 0 4 4 4 4 6 2 6 6 4 4 0 0 0 0 0 0
0 2 2 2;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0
0 4 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4
0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0
0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 4 4 4 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 4
4 4 4 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0
0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3
3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0
```

```
0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 0 3 3 3 0 0 0 0 3 3 0 0 3 3 0 0 0 0 0 0 0 3 3
3 0 3 3];
% Matrice di offerta, dove ogni valore è l'offerta della stazione i nel periodo t


Tr = 4;
% Definizione tempo di ricarica
M = 10000;
% Definizione Big M, costante fittizia usata per la linearizzazione di vincoli
LSmin = 95;
% Definizione del livello di servizio minimo

CaB = 22000;
% Definizione costo d'acquisto di una batteria
CaCh = 25000;
% Definizione costo d'acquisto di un caricatore
CmB = 140;
% Definizione costo di manutenzione di una batteria
CmCh = 70;
% Definizione costo di manutenzione di un caricatore
LcB = 8;
% Definizione vita utile di una batteria
LcCh = 15;
% Definizione vita utile di un caricatore
r = 0.06;
% Definizione tasso di sconto dell'investimento


% Definizione delle variabili di ottimizzazione
Btot = optimvar('Btot',N,'Type','integer','LowerBound',0);
% Batterie totali nella rete
Chtot = optimvar('Chtot',N,'Type','integer','LowerBound',0);
% Caricatori totali nella rete
D = optimvar('D',N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Domanda nella stazione i nell'intervallo t
Do = optimvar('Do', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Domanda inevasa nella stazione i nell'intervallo t
Bc = optimvar('Bc', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Batterie cariche presenti nella stazione i nell'intervallo t
Bs = optimvar('Bs', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Batterie scambiate nella stazione i nell'intervallo t
Br = optimvar('Br', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
```

```
% Batterie messe in carica nella stazione i nell'intervallo t
Bw = optimvar('Bw', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Batterie scariche in attesa di ricarica nella stazione i nell'intervallo t
Chl = optimvar('Chl', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Caricatori liberi presenti nella stazione i nell'intervallo t
Bch = optimvar('Bch', N,T,'Type','integer','LowerBound',0);
% Batterie già in carica presenti nella stazione i all'inizio dell'intervallo t
y = optimvar('y', N,T,'Type','integer','LowerBound',0,'UpperBound',1);
% Variabile binaria fittizia usata per la linearizzazione del primo vincolo di
minimo
z = optimvar('z', N,T,'Type','integer','LowerBound',0,'UpperBound',1);
% Variabile binaria fittizia usata per la linearizzazione del secondo vincolo di
minimo



% Definizione della funzione obiettivo
CaeB =  (CaB * r * (1+r)^LcB)/((1+r)^LcB - 1) + CmB;
% Definizione costo annuo equivalente di una batteria
CaeCh = (CaCh * r * (1+r)^LcCh)/((1+r)^LcCh - 1) + CmCh;
% Definizione costo annuo equivalente di un caricatore
Cae = sum(Btot)*CaeB + sum(Chtot)*CaeCh;
% Definizione f.o., ovvero il costo annuo equivalente totale della rete

bssproblem.Objective = Cae;
% Assegnazione della funzione obiettivo al problema di ottimizzazione

% Definizione dei vincoli con relative dimensioni
consD = optimconstr(N,T);
consBs1 = optimconstr(N,T);
consBs2 = optimconstr(N,T);
consBs3 = optimconstr(N,T);
consBs4 = optimconstr(N,T);
consBs5 = optimconstr(N,T);
consBs6 = optimconstr(N,T);
consDo = optimconstr(N,T);
consBc = optimconstr(N,T);
consBw = optimconstr(N,T);
consChl = optimconstr(N,T);
consBr1 = optimconstr(N,T);
consBr2 = optimconstr(N,T);
```

```
consBr3 = optimconstr(N,T);
consBr4 = optimconstr(N,T);
consBr5 = optimconstr(N,T);
consBr6 = optimconstr(N,T);
consLS = optimconstr(N,T);
consBch = optimconstr(N,T);

% Algoritmo di gestione dei vincoli
for i = 1:N
    for t = 1:T
        Bch1 = 0;
        % Impostazione della variabile temporanea Bch1 a zero
        if t == 1
        % Vincoli valevoli solo per il primo periodo
           consD(i,t) = D(i,t) == Dn(i,t);
           % Vincolo che definisce la domanda nel primo periodo
           consBc(i,t) = Bc(i,t) == Btot(i);
           % Vincolo che definisce le batterie cariche nel primo periodo
           consBw(i,t) = Bw(i,t) == Btot(i) - Bc(i,t);
           % Vincolo che definisce le batterie scariche nel primo periodo
           consChl(i,t) = Chl(i,t) == Chtot(i);
           % Vincolo che definisce i caricatori liberi nel primo periodo
        else
            if t >= 2 && t <= Tr
            % Vincoli valevoli dal secondo periodo al periodo pari al tempo di
            ricarica
                consBc(i,t) = Bc(i,t) == Bc(i,t-1) - Bs(i,t-1);
                % Vincolo che definisce le batterie cariche in tali periodi
                ta = t;
                % Variabile fittizia per memorizzare il periodo t corrente
                for t = 1:t-1
                    Bch1 = Bch1 + Br(i,t);
                    % Definizione delle batterie in carica per i periodi fino a Tr
                end
                t = ta;
                % Riassegnazione del valore del periodo corrente a t
            else
                consBc(i,t) = Bc(i,t) == Bc(i,t-1) - Bs(i,t-1) + Br(i,t-Tr);
                % Vincolo che definisce le batterie cariche nei periodi successivi
                a Tr
```

```
        ta = t;
        % Variabile fittizia per memorizzare il periodo t corrente
        for t = t-Tr+1:t-1
            Bch1 = Bch1 + Br(i,t);
            % Definizione delle batterie in carica per i periodi
            successivi a Tr
        end
        t = ta;
        % Riassegnazione del valore del periodo corrente a t
    end
    consD(i,t) = D(i,t) == Dn(i,t) + Do(i,t-1);
    % Vincolo che definisce la domanda per i periodi successivi al primo
    consBch(i,t) = Bch(i,t) == Bch1;
    % Vincolo che associa alla variabile Bch il valore delle batterie in
    carica salvato nella variabile temporanea Bch1
    consBw(i,t) = Bw(i,t) == Btot(i) - Bc(i,t) - Bch(i,t);
    % Vincolo che definisce le batterie scariche per i periodi successivi
    al primo
    consChl(i,t) = Chl(i,t) == Chtot(i) - Bch(i,t);
    % Vincolo che definisce i caricatori liberi per i periodi successivi
    al primo
end
consDo(i,t) = Do(i,t) == D(i,t) - Bs(i,t);
% Vincolo che definisce la domanda inevasa per ogni periodo
consBs1(i,t) = D(i,t) <= Bc(i,t) + M*y(i,t);
% Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
scambiate in ogni periodo (Bs)
consBs2(i,t) = Bc(i,t) <= D(i,t) + M*(1-y(i,t));
% Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
scambiate in ogni periodo (Bs)
consBs3(i,t) = Bs(i,t) <= D(i,t);
% Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
scambiate in ogni periodo (Bs)
consBs4(i,t) = Bs(i,t) <= Bc(i,t);
% Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
scambiate in ogni periodo (Bs)
consBs5(i,t) = Bs(i,t) >= Bc(i,t) - M*(1-y(i,t));
% Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
scambiate in ogni periodo (Bs)
consBs6(i,t) = Bs(i,t) >= D(i,t) - M*y(i,t);
% Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
scambiate in ogni periodo (Bs)
consBr1(i,t) = Bw(i,t) <= Chl(i,t) + M*z(i,t);
```

```
        % Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
        messe in carica in ogni periodo (Br)
        consBr2(i,t) = Chl(i,t) <= Bw(i,t) + M*(1-z(i,t));
        % Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
        messe in carica in ogni periodo (Br)
        consBr3(i,t) = Br(i,t) <= Bw(i,t);
        % Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
        messe in carica in ogni periodo (Br)
        consBr4(i,t) = Br(i,t) <= Chl(i,t);
        % Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
        messe in carica in ogni periodo (Br)
        consBr5(i,t) = Br(i,t) >= Chl(i,t) - M*(1-z(i,t));
        % Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
        messe in carica in ogni periodo (Br)
        consBr6(i,t) = Br(i,t) >= Bw(i,t) - M*z(i,t);
        % Vincolo fittizio per linearizzare il vincolo che definisce le batterie
        messe in carica in ogni periodoV
        consLS(i,t) = Do(i,t) <= D(i,t)*(100-LSmin)/100;
        % Vincolo che impone il livello di servizio per ogni intervallo maggiore o
        uguale della soglia impostata (LSdato)
    end
end


% Assegnazione dei vincoli al problema di ottimizzazione
bssproblem.Constraints.consD = consD;
bssproblem.Constraints.consBs1 = consBs1;
bssproblem.Constraints.consBs2 = consBs2;
bssproblem.Constraints.consBs3 = consBs3;
bssproblem.Constraints.consBs4 = consBs4;
bssproblem.Constraints.consBs5 = consBs5;
bssproblem.Constraints.consBs6 = consBs6;
bssproblem.Constraints.consDo = consDo;
bssproblem.Constraints.consBc = consBc;
bssproblem.Constraints.consBw = consBw;
bssproblem.Constraints.consChl = consChl;
bssproblem.Constraints.consBr1 = consBr1;
bssproblem.Constraints.consBr2 = consBr2;
bssproblem.Constraints.consBr3 = consBr3;
bssproblem.Constraints.consBr4 = consBr4;
bssproblem.Constraints.consBr5 = consBr5;
bssproblem.Constraints.consBr6 = consBr6;
```

```
bssproblem.Constraints.consLS = consLS;
bssproblem.Constraints.consBch = consBch;


% Risoluzione del modello
options = optimoptions('intlinprog','MaxTime',432000);
% Opzione di estensione del tempo massimo di calcolo
[sol,fval] = solve(bssproblem,'Options',options);
% funzione Matlab per risolvere un problema di ottimizzazione


% Calcolo del livello di servizio in ogni intervallo per ogni BSS
for i = 1:N
    for t = 1:T
        LS(i,t) = round((sol.D(i,t)-sol.Do(i,t))/sol.D(i,t)*100, 2);
    end
end

% Calcolo del livello di servizio medio per ogni BSS
for i = 1:N
    sumLS(i) = 0;
    sumt(i) = 0;
    for t = 1:T
        if sol.D(i,t) == 0
           t = t+1;
        else
           sumLS(i) = sumLS(i) + LS(i,t);
           sumt(i) = sumt(i) + 1;
        end
    end
    LSmedio(i) = sumLS(i)/sumt(i);
end


% Calcolo di valori utili relativi alla soluzione
for i = 1:N
    for t = 1:T
        Bincarica(i,t) = round(sol.Bch(i,t) + sol.Br(i,t));
        % Calcolo batterie contemporaneamente in carica in ogni periodo in ogni
        stazione
        Bnonscariche(i,t) = round(sol.Bc(i,t) +  Bincarica(i,t));
        % Calcolo batterie non scariche (ovvero somma delle batterie cariche e in
        carica) in ogni periodo in ogni stazione
        Btotverifica(i,t) = round(sol.Bc(i,t) +  sol.Bch(i,t) + sol.Bw(i,t));
        % Verifica delle batterie totali in una stazione in ogni istante
    end
end


%  Arrotondamento dei risultati interi per una migliore visualizzazione
sol.Btot = round(sol.Btot);
```

```
sol.Chtot = round(sol.Chtot);
sol.D = round(sol.D);
sol.Do = round(sol.Do);
sol.Bc = round(sol.Bc);
sol.Bs = round(sol.Bs);
sol.Br = round(sol.Br);
sol.Bw = round(sol.Bw);
sol.Chl = round(sol.Chl);
sol.Bch = round(sol.Bch);
sol.y = round(sol.y);
sol.z = round(sol.z);
```

In un primo momento è stato definito il problema di ottimizzazione e sono stati inizializzati i valori dei parametri utilizzati, in seguito sono state definite le variabili e successivamente dichiarati i vincoli. Nella parte intermedia è presente il modello di ottimizzazione vero e proprio, con l'applicazione dei vincoli.

Come si può osservare nella sezione del codice chiamata "Algoritmo di gestione dei vincoli", poiché il modello utilizza vincoli relativi a una successione di intervalli di tempo per ottenere risultati in ogni istante e poiché il sistema parte da uno stato di inattività, è necessario modellizzare i primi istanti di tempo in maniera diversa da quelli successivi. In tale aspetto il codice si differenzia leggermente dal modello matematico, che invece è stato pensato per avere una valenza generale, senza considerare un possibile periodo di transitorio iniziale. In particolare, nel codice sono stati utilizzati un "ciclo for" generale che prende in considerazione tutte le stazioni e un altro "ciclo for" generale che analizza tutti gli intervalli di tempo per ogni stazione. All'interno di quest'ultimo sono state fatte delle distinzioni (tramite l'uso di if) per il primo istante di tempo e per gli intervalli di tempo dal secondo periodo al periodo pari a T_r (tempo di ricarica). Al tempo zero, infatti, le batterie presenti nella BSS sono tutte cariche, le batterie in carica sono dunque pari a zero, così come quelle scariche, i caricatori sono tutti liberi e la domanda sarà uguale necessariamente alla domanda nuova, poiché non vi è domanda insoddisfatta al tempo precedente. Nei periodi dal secondo fino a quello pari a T_r, il funzionamento della stazione è regolare, ma è necessario utilizzare indici diversi per calcolare le batterie in carica in un intervallo, poiché non si può andare a ritroso di T_r intervalli o si assegnerebbe all'indice i un valore negativo o nullo. È stato poi modellizzato il calcolo delle batterie in carica per gli intervalli successivi a T_r. I vincoli seguenti a queste distinzioni, valgono invece per tutti gli intervalli di tempo, poiché non interessati dal periodo di transitorio.

In seguito alla parte di codice relativa alla modellizzazione dei vincoli sono stati modellizzati degli indicatori per ottenere informazioni utili sull'andamento delle stazioni, come il livello di servizio in ogni istante, il livello di servizio medio di una BSS, le batterie in carica in ogni periodo (considerando anche quelle messe in carica nel periodo considerato), le batterie non scariche in ogni intervallo e le batterie totali in ogni intervallo (per verificare che rimangano costanti per tutto l'orizzonte temporale considerato).

5.4 Risultati del modello di ottimizzazione

Il modello di ottimizzazione implementato su Matlab restituisce come risultati principali il costo annuo equivalente minimo, che costituisce la funzione obiettivo, e le variabili decisionali da cui dipende direttamente, ovvero il numero di batterie e di caricatori da allocare in ogni stazione affinché la domanda venga soddisfatta con il livello di servizio impostato. Oltre a questi risultati, fornisce il valore di tutte le variabili legate agli stati delle batterie in ogni stazione e in ogni istante, come il numero di batterie cariche, di batterie scariche, di batterie messe in carica, di batterie scambiate o di richieste non soddisfatte.

5.4.1 Risultati dell'ottimizzazione relativi allo scenario 1

La tabella sottostante schematizza i risultati principali riguardanti il dimensionamento delle stazioni e i costi che ne derivano, utilizzando caricatori di potenza pari a 50 kW.

Batterie camion	281

	Torino	**Milano**	**Bologna**	**Pescara**	**Roma**	**Salerno**	**R. Calabria**	**Taranto**	**TOT**
Batterie BSS	30	22	86	39	40	28	20	12	277

	Torino	**Milano**	**Bologna**	**Pescara**	**Roma**	**Salerno**	**R. Calabria**	**Taranto**	**TOT**
Caricatori	9	7	63	14	13	14	6	6	132

CAE batterie camion	1.034.867 €
CAE batterie BSS	1.020.136 €
CAE caricatori	349.021 €
CAE Totale	2.404.024 €

Costo batterie camion	6.182.000 €
Costo batterie BSS	6.094.000 €
Costo caricatori	3.300.000 €
Costo totale	15.576.000 €

Tabella 8 - Risultati principali dell'ottimizzazione nello scenario 1

La casella denominata "Batterie camion" mostra la quantità totale di batterie disposte a bordo dei veicoli ed è pari alla somma delle batterie necessarie a percorrere tutte le tratte considerate. Tale valore chiaramente non dipende dai risultati dell'ottimizzazione.

I risultati relativi alle batterie allocate nelle BSS mostrano che le batterie totali dislocate nella rete affinché il servizio funzioni sono quasi pari a quelle presenti a bordo dei mezzi. È facile notare come la stazione di Bologna richieda un numero ben maggiore di batterie e caricatori rispetto alle altre BSS. Le motivazioni sono che da questa stazione passano i camion che percorrono le quattro tratte principali e che, essendo una stazione intermedia, accoglie i flussi provenienti da entrambe le direzioni, a differenza delle stazioni di partenza e di arrivo. Molti degli scambi di batterie inoltre avvengono nelle stesse fasce orarie, contribuendo a rendere più elevato il numero di batterie e caricatori necessari. Un altro risultato che salta subito all'occhio sono i bassi valori riscontrati per la BSS di Milano, nonostante sia coinvolta da

flussi importanti di veicoli. Ciò avviene poiché Milano è una stazione di testa (ed accoglie, dunque, solo flussi monodirezionali e non bidirezionali come per le stazioni intermedie) e poiché la tratta Milano - Bologna è la più breve tra tutte, richiedendo un consumo di sole 2 batterie.

Disponendo le stazioni in ordine decrescente di batterie allocate si ottiene che Bologna è la stazione più grande, seguita da Roma, Pescara, Torino, Salerno, Milano, Reggio Calabria e Taranto. Per quanto riguarda il numero di caricatori invece si ottiene il seguente ordine: Bologna, Pescara e Salerno, Roma, Torino, Milano, Reggio Calabria e Taranto (queste ultime con la stessa quantità). È facile notare che l'ordine non è lo stesso e che il numero di caricatori necessari non è proporzionale a quello delle batterie richieste. Il motivo è che i risultati dipendono, oltre che dal numero assoluto di batterie domandate in ogni intervallo, dalla sequenza di richiesta e di offerta. Poiché il costo annuo equivalente dei caricatori è minore di quello delle batterie (per via della durata maggiore del ciclo di vita) l'ottimizzatore favorirà l'uso dei caricatori rispetto alla soluzione di aumentare il numero di batterie allocate. Per ricevere batterie cariche nel momento del bisogno da parte dei caricatori, però, è necessario che siano state messe in carica un numero di periodi precedenti almeno pari al tempo di ricarica, che coincide con il lead time del processo. Se ciò non avviene poiché non sono arrivati camion in quegli intervalli (o non hanno lasciato un numero sufficiente di batterie) o la stazione non è attiva (come avviene nei primi periodi di transitorio seguenti all'attivazione della rete), la domanda deve essere soddisfatta aumentando il numero di batterie allocate inizialmente. Le sequenze di batterie richieste e rilasciate nel tempo, determinano quindi un numero minimo di batterie necessarie nella singola stazione, al di sotto del quale non è possibile garantire il servizio in modo adeguato e che non dipende dai costi di caricatori e batterie. Le dinamiche appena descritte determinano il rapporto tra batterie e caricatori necessari.

A conferma di quanto appena affermato, si possono confrontare i risultati relativi alle stazioni di Torino e Salerno, per le quali i risultati mostrano quantità di batterie allocate paragonabili (30 a Torino e 28 a Salerno). Nonostante siano assegnate più batterie alla BSS di Torino, la domanda totale giornaliera è maggiore per la BSS di Salerno. Nella stazione di Torino, infatti, sono richieste 51 batterie durante la giornata, mentre a Salerno 54, ma la distribuzione della domanda è molto diversa nelle due BSS, come si può vedere dalla figura sottostante.

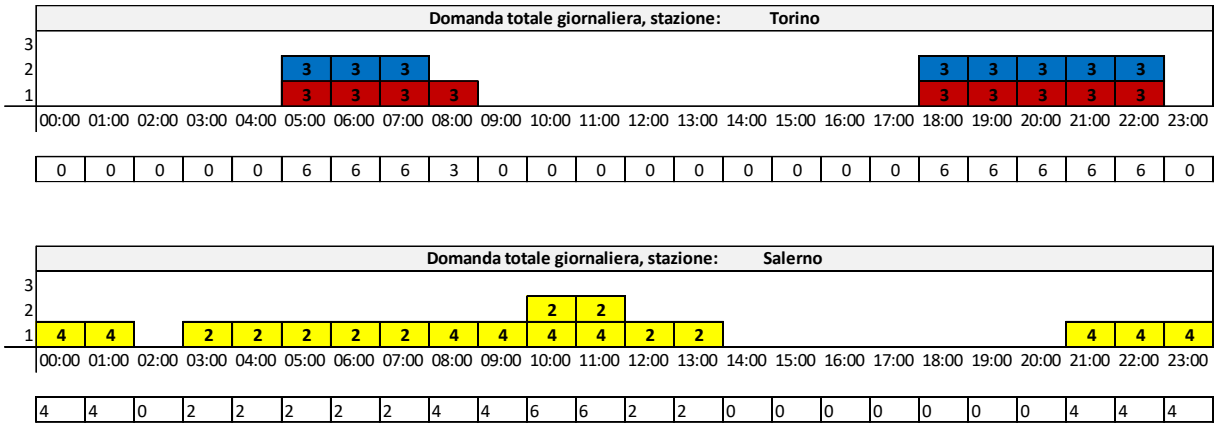


Figura 29 - Confronto delle domande nelle BSS di Milano e Salerno

La migliore ripartizione delle richieste della stazione di Salerno, fa sì che la domanda venga soddisfatta in modo differente, ricorrendo maggiormente all'uso di caricatori piuttosto che di batterie. La stazione di Milano presenta una domanda più concentrata e necessita, dunque, di più batterie in proporzione.

L'*Appendice A* mostra nel dettaglio tutti gli altri i risultati, fornendo i valori di tutte le variabili legate agli stati delle batterie e dei caricatori in ogni stazione e in ogni istante. Per motivi di spazio sono stati riportati solo i valori dei primi tre giorni, ma questi bastano ad avere un quadro complessivo della situazione, in quanto i valori dal terzo giorno in poi si ripetono ciclicamente ogni giorno. Come si può notare, la possibilità di scambiare un numero variabile di batterie e di ospitare a bordo solo la quantità necessaria a compiere il viaggio successivo ha un effetto solo sulle BSS intermedie, facendo variare il numero di batterie totali presenti in una stazione. Ciò avviene poiché, come è stato già spiegato, il numero di batterie necessarie a percorrere la prima sezione di tratta è diversa da quelle necessarie a percorrere la parte successiva e, dunque, si crea una variazione temporanea. La regolarità dei flussi nel tempo permette, però, di avere comunque una rete bilanciata, che non necessità di un intervento esterno per ristabilire le quantità allocate inizialmente in ogni BSS. Nelle stazioni di testa, invece, la quantità rimane sempre costante perché il numero di batterie lasciate e prelevate coincide.

5.4.2 Risultati dell'ottimizzazione relativi allo scenario 2

La tabella sottostante schematizza i risultati principali riguardanti il dimensionamento delle stazioni e i costi che ne derivano, utilizzando caricatori di potenza pari a 22 kW.

Batterie camion	281

	Torino	**Milano**	**Bologna**	**Pescara**	**Roma**	**Salerno**	**R. Calabria**	**Taranto**	**TOT**
Batterie	30	22	161	48	43	44	20	18	386

	Torino	**Milano**	**Bologna**	**Pescara**	**Roma**	**Salerno**	**R. Calabria**	**Taranto**	**TOT**
Caricatori	23	17	71	33	34	20	16	12	226

	Scenario 1	**Scenario 2**	**Variazione**
CAE batterie camion	1.034.867 €	1.034.868 €	0,00%
CAE batterie BSS	1.020.136 €	1.421.561 €	+39,35%
CAE caricatori	349.021 €	69.339 €	-80,13%
CAE Totale	2.404.024 €	2.525.768 €	+5,06%

Costo batterie camion	6.182.000 €	6.182.001 €	0,00%
Costo batterie BSS	6.094.000 €	8.492.000 €	+39,35%
Costo caricatori	3.300.000 €	519.800 €	-84,25%
Costo totale	15.576.000 €	15.193.801 €	-2,45%

Tabella 9 - Risultati principali dell'ottimizzazione nello scenario 2

Il numero di batterie a bordo dei camion rimane lo stesso, poiché non dipende dall'ottimizzazione. Sia le quantità di batterie che di caricatori sono nettamente superiori rispetto alla soluzione con caricatori da 50 kW, infatti, le batterie passano da 277 a 386 unità (+39,35%) e i caricatori da 132 a 226 (+71,21%). L'impossibilità di utilizzare le batterie in carica per un tempo molto più lungo richiede, infatti, che ne siano allocate in maggior numero, così come per i caricatori, che restano occupati maggiormente. È interessante notare come l'ordine delle BSS in base alle batterie e ai caricatori disponibili cambi rispetto

alla soluzione con i caricatori da 50 kW, segno che, a parità di distribuzione della domanda, la durata della ricarica può impattare in modo proporzionalmente diverso nelle varie stazioni, seppur le considerazioni generali fatte nel paragrafo precedente su come la ripartizione delle richieste influenzi i risultati finali rimangano valide. In generale, si verifica un aumento delle quantità in ogni BSS, ma a Torino e Milano, è possibile sopperire all'aumento dei tempi di ricarica utilizzando solo più caricatori e mantenendo lo stesso numero di batterie. L'incremento maggiore, come ci si poteva aspettare, riguarda la stazione di Bologna, dove evidentemente la grande complessità e consistenza dei flussi non è compatibile con lead time troppo lunghi.

Da un punto di vista economico le soluzioni sono paragonabili nel totale, seppur la ripartizione dei costi vari moltissimo. I costi fortemente inferiori dei caricatori permettono di bilanciare la necessità di acquistare più batterie, nonostante anche il numero di caricatori sia molto maggiore. In particolare, il costo annuo equivalente e il costo d'acquisto delle batterie destinate alle BSS aumentano entrambi del 39,35%, mentre gli stessi valori relativi ai caricatori variano rispettivamente del -80,13% e del -84,25%. Guardando al totale, il costo annuo equivalente aumenta del 5,06%, mentre il costo d'acquisto iniziale diminuisce del 2,45%. La differenza nei valori dei CAE è dovuta alla natura dell'indicatore. Il costo annuo equivalente tiene conto, nella ripartizione in rate equivalenti, della vita utile dell'oggetto considerato e della conseguente necessità di riacquisto al termine di quest'ultima, motivo per il quale tale indicatore è stato preferito nell'utilizzo nel modello di ottimizzazione. Poiché nello scenario 2 una batteria costa molto di più di un caricatore e ha una vita più breve, l'aumento della quantità di batterie impatta di più dell'incremento dei caricatori, generando un leggero aumento del CAE totale. Oltre ai costi analizzati, andrebbero considerati altri costi che non sono oggetto del presente studio, come quelli di costruzione delle stazioni e di installazione e allacciamento alla reta dei caricatori, che sarebbero nettamente superiori nello scenario 2, poiché sarebbe necessario ospitare quantità molto maggiori di caricatori e di batterie, oltre alla necessità di disporre di spazi ben più estesi per le stazioni, fattore non marginale nell'ambito di un'applicazione autostradale. Allo stesso tempo, l'uso di potenze di ricarica minori permette di preservare più a lungo le batterie dal degrado, ottenendo dei costi leggermente più bassi legati alla necessità di riacquisto. Poiché lo scopo principale del lavoro è fornire un modello di ottimizzazione per il dimensionamento e non un dettagliato studio economico sull'utilizzo della tecnologia Battery Swap, il confronto tra i due scenari è più utile ad osservare come reagisce il modello alla variazione di alcuni parametri che a fare un confronto puramente economico. In seguito a tale considerazione si può comunque affermare che la soluzione dello scenario 1 sembrerebbe leggermente più vantaggiosa, poiché caratterizzata da un costo annuo equivalente minore e per via delle valutazioni appena citate riguardo ai costi non analizzati. Tempi di ricarica minori dovrebbero permettere, inoltre, di adattarsi meglio a possibili variazioni nella domanda, sia per quanto riguarda i valori medi a lungo termine, che nel gestire gli effetti della variabilità nel breve termine. Quest'ultimo aspetto è analizzato meglio in seguito, nel paragrafo relativo ai risultati della simulazione.

Anche per questo scenario è possibile consultare, nell'*Appendice B,* i risultati dettagliati relativi all'evolversi delle variabili che modellizzano gli stati delle batterie e dei caricatori in ogni stazione e in ogni BSS.

6. Il modello di simulazione

Nel presente capitolo è proposto il modello di simulazione appositamente realizzato per verificare il corretto funzionamento della rete di Battery Swap e per validare i risultati ottenuti nella fase di ottimizzazione.

Per la realizzazione del modello è stato utilizzato il software *FlexSim,* un ambiente di lavoro che permette di modellizzare sistemi anche molto complessi in modo realistico, tramite rappresentazione tridimensionale, e di simulare svariate attività. FlexSim è utile per analizzare i comportamenti del sistema sia in modo puramente visivo, sia tramite statistiche, e permette di testare diversi scenari in modo rapido ed efficace. Gli oggetti 3D e gli altri elementi che il software fornisce per la modellizzazione si adattano bene alla rappresentazione di contesti lavorativi quali produzione manifatturiera, logistica, gestione dei magazzini, trasporti e sanità.

Figura 30 - Logo FlexSim.
Fonte: sito FlexSim[25]

6.1 Impostazioni del modello di simulazione e assunzioni

Poiché il modello di simulazione ha lo scopo di rappresentare realisticamente il funzionamento del servizio, in modo da verificarne l'efficacia e testare i risultati dell'ottimizzazione, sono stati utilizzati gli strumenti messi a disposizione da FlexSim per modellizzare aspetti che non erano stati presi in considerazione per la rappresentazione matematica tramite il modello di programmazione lineare intera. In particolare, il modello di simulazione si distingue da quello di ottimizzazione per i seguenti aspetti.

- Gli avvenimenti sono modellizzati come eventi puntuali nel tempo e non più in intervalli di tempo regolari, considerati come "black-box".
- Sono sostituite anche batterie parzialmente scariche, la cui ricarica impiega, dunque, un tempo minore e legato allo stato di carica al momento della rimozione. In particolare, il consumo delle batterie avviene in serie, ovvero prima di consumare una nuova batteria deve essere utilizzata interamente la precedente. Ogni veicolo, perciò, lascia una parte di batterie completamente scariche ed una batteria parzialmente scarica.
- La domanda per le stazioni può variare nel tempo, in quanto un ritardo nel soddisfare la richiesta di batterie di un camion contribuisce a generare un ritardo nella stazione successiva nella quale si recherà il veicolo, creando uno scostamento dalla domanda attesa di tale stazione. Il modello di ottimizzazione, a differenza, restituisce le quantità ottime di caricatori e di batterie prendendo in considerazione i flussi medi attesi e gestendo gli effetti dei back order nella stazione in cui si verificano (tramite la variabile D_o), ma non in quella nella quale si recherà successivamente il camion.

- Sono modellizzate le soste dovute alla ricarica e i riposi degli autisti, tenendo conto della normativa vigente. Di tale aspetto, per la precisione, si tiene conto in maniera più sommaria anche nel modello di ottimizzazione, poiché considerati nella stima dei flussi.
- Sono modellizzati i tempi di carico e scarico delle batterie.
- È stata inserita la variabilità nei processi. In particolare, il momento della partenza iniziale, i tempi di viaggio e le pause per il riposo degli autisti tengono conto di un possibile ritardo modellizzato stocasticamente.

Poiché allo scopo del lavoro è utile un punto di vista di livello più macroscopico, non è stato invece rappresentato dettagliatamente il processo di scambio batterie, con la relativa considerazione di dimensioni e forme fisiche delle stazioni, spazi per la sosta dei mezzi, macchinari per la rimozione ed il montaggio delle celle.

Per i dati utili alla modellizzazione, sono state utilizzate le informazioni già presentate in *Tabella 1*, *Tabella 2* e *Tabella 3*.

Come per il modello di ottimizzazione, è utilizzata la logica FIFO per servire i veicoli in arrivo e per mettere in carica le batterie. Queste ultime vengono caricate il prima possibile, poiché lo scopo prevalente è minimizzare la possibilità di stock out.

Anche in questo caso il sistema parte da fermo, con gli autoarticolati dotati di pacchi batteria carichi e disposti presso le stazioni di partenza, tutte le batterie cariche disponibili presso le rispettive BSS, e i caricatori liberi.

Per mantenere una coerenza con il modello di ottimizzazione, il livello di servizio è calcolato considerando come fallimento qualsiasi richiesta non immediatamente soddisfatta, indipendentemente dal tempo d'attesa prima che il cambio batteria sia effettuato e prendendo come riferimento la disponibilità delle singole batterie e non l'attesa dei veicoli in arrivo.

6.2 Spiegazione del modello di simulazione

Per la realizzazione di modelli complessi su FlexSim è possibile ricorrere ad uno o più process flow e ad un modello 3D, che, tramite l'uso di oggetti tridimensionali, permette di rappresentare il sistema in maniera realistica e visivamente efficace (*Figura 31*). Il process flow schematizza le logiche di funzionamento del sistema tramite dei moduli, ai quali corrispondono delle attività. I due modelli interagiscono tra loro attraverso i token, entità che "percorrono" il process flow e che rappresentano i singoli elementi mobili del sistema.

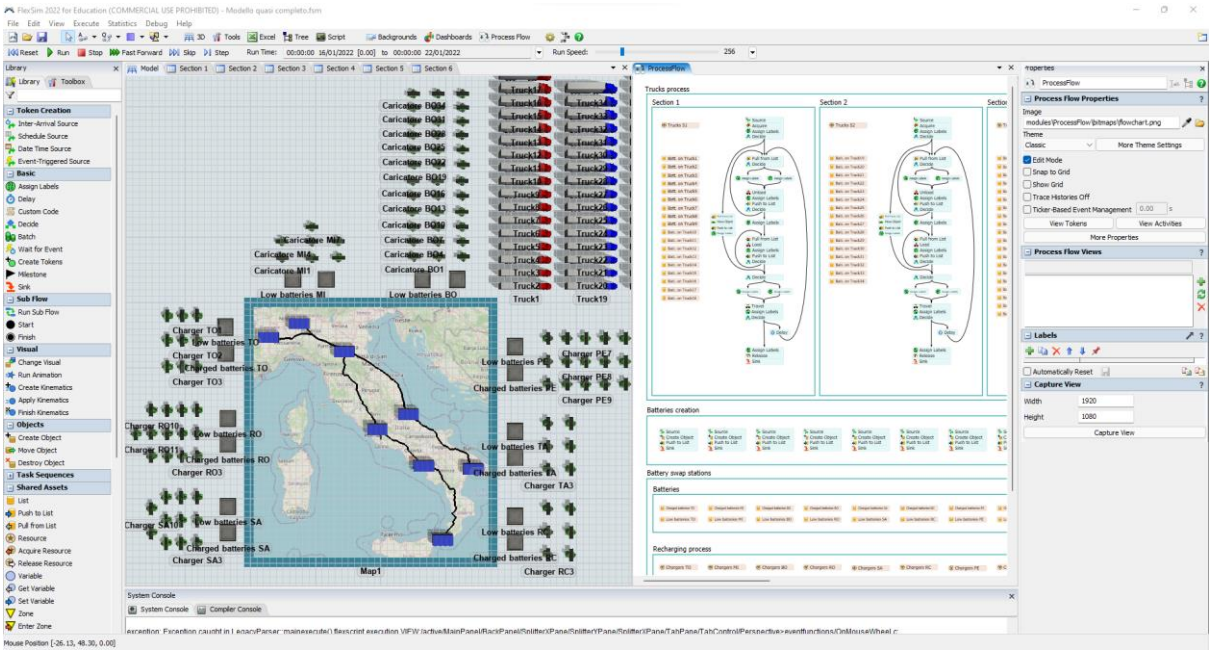


Figura 31 - Schermata dell'interfaccia di FlexSim

Quando un token giunge presso un modulo del process flow "attiva" l'azione ad esso corrispondente e, se tale attività è legata ad un evento nel modello 3D, è possibile visualizzarne gli effetti in tempo reale. Un esempio è riportato nella *Figura 32,* rappresentante una sezione del process flow e diversi token (costituiti dai pallini verdi). In particolare, vi sono dei token che rappresentano le batterie presenti a bordo dei camion (sulla sinistra) e un token che rappresenta il veicolo (sulla destra), il quale, spostandosi lungo il grafico, determina il verificarsi delle attività legate al camion corrispondente nel modello tridimensionale (nell'immagine lo scarico delle batterie esauste).

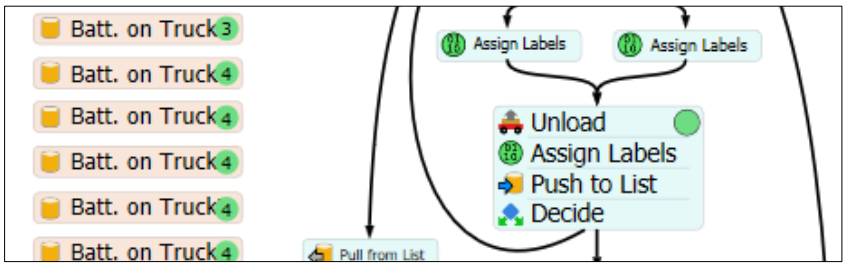


Figura 32 - Token all'interno del process flow

Il modello tridimensionale, visibile in *Figura 33*, è composto da una mappa dell'Italia, sulla quale sono state collocate le stazioni di swapping. Le BSS sono state collegate tra loro tramite le tratte autostradali realmente esistenti, utilizzando la funzionalità di FlexSim chiamata *GIS Navigator*, che riproduce percorsi reali. Ad ognuna di queste sezioni è stato associato un tempo di percorrenza, utilizzando i dati già mostrati in *Tabella 2* e applicando un delay che segue una certa distribuzione di probabilità.

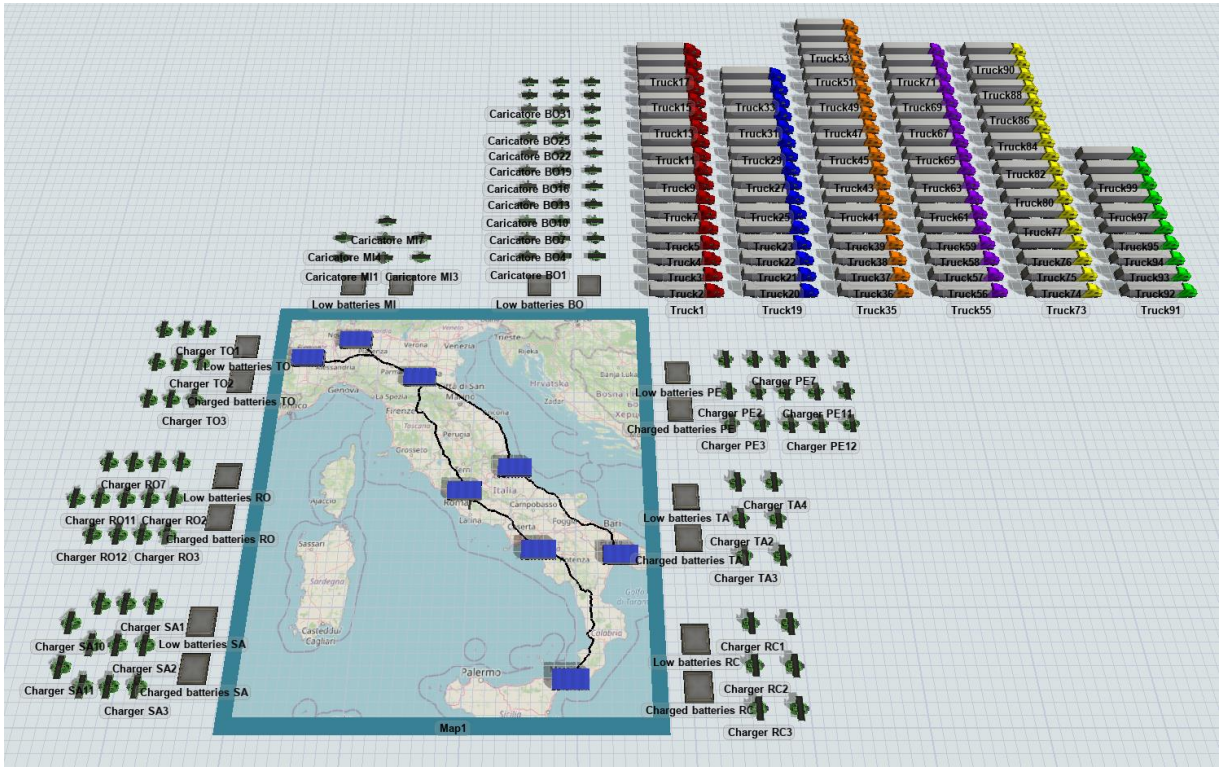


Figura 33 - Schermata del modello di simulazione 3D su FlexSim

Vicino alle stazioni sulla mappa sono riprodotti gli elementi essenziali di ogni BSS (*Figura 34*), ovvero una baia che accoglie le batterie cariche, una che accoglie quelle scariche e un numero di caricatori (rappresentati nel modello dai processori a nastro) variabile in base alla località e pari al valore ottenuto nella fase di ottimizzazione. Allo stesso modo, ad inizio simulazione, sono allocate ad ogni stazione un numero di batterie cariche pari al valore determinato dall'ottimizzatore (rappresentate dai parallelepipedi marroni). A simulazione in corso le batterie sono scaricate e prelevate dagli autoarticolati in base al proprio fabbisogno e sono messe in carica appena un caricatore risulta libero, scorrendo sul nastro per un tempo pari al tempo di ricarica necessario.

Figura 34 - Rappresentazione della BSS di Roma nel modello 3D di FlexSIm

Sono presenti, inoltre, i 100 camion che compongono la flotta analizzata, suddivisi in base alla tratta in cui operano (secondo i valori in *Tabella 3*) e rappresentati da diversi colori (*Figura 35*). A simulazione in corso tali mezzi si muovono lungo i percorsi tracciati sulla mappa e scaricano e caricano un numero di batterie pari a quelle utilizzate.

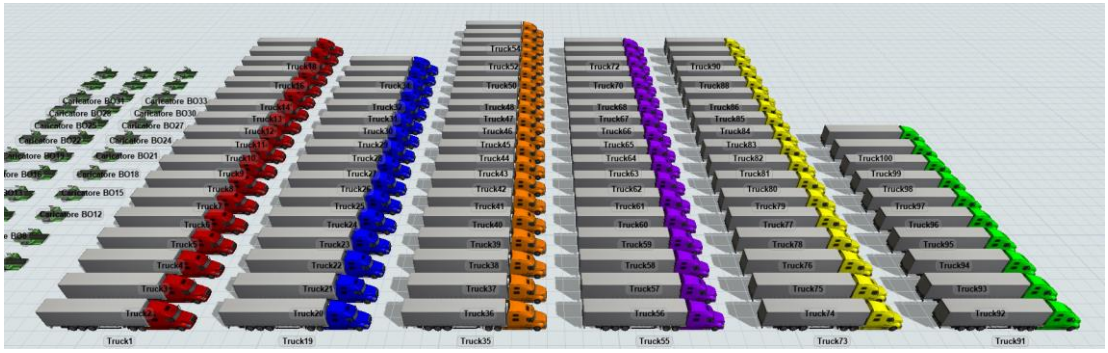


Figura 35 - Rappresentazione della flotta di autoarticolati nel modello 3D di FlexSim

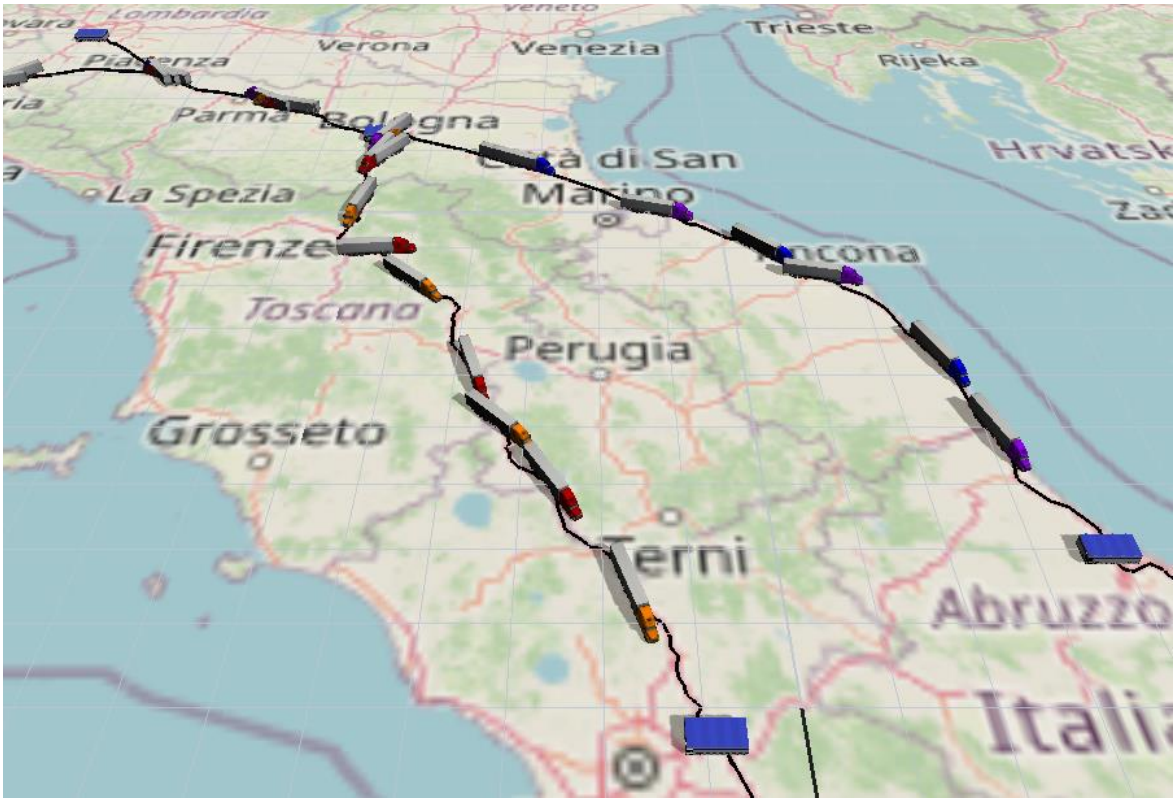


Figura 36 - Rappresentazione dei viaggi degli autoarticolati lungo le tratte autostradali nel modello 3D di FlexSim

Il process flow è composto da tre sezioni principali. La prima, chiamata "Truck process" (*Figura 37*) gestisce le operazioni svolte dagli autoarticolati, come i viaggi, il rilascio e il prelievo delle batterie e le soste per il riposo. Tale sezione è a sua volta composta da 8 sottoprocessi, uno per ogni tratta, poiché è utile alla comprensione e all'analisi del processo poter vedere cosa accade in ogni tratta e poiché i vari percorsi possono presentare delle piccole differenze per cui è più semplice modellizzarli separatamente.

La seconda, chiamata “Batteries creation” (*Figura 38*) gestisce la creazione dei token e degli oggetti 3D relativi ad ogni batteria e inizializza le varie stazioni e i camion appena viene avviata la simulazione. La terza sezione è chiamata “Battery Swap stations” (*Figura 39*) e gestisce il funzionamento di queste ultime, prelevando e sostituendo le batterie scariche con quelle cariche e mettendole in carica appena un caricatore risulta disponibile.

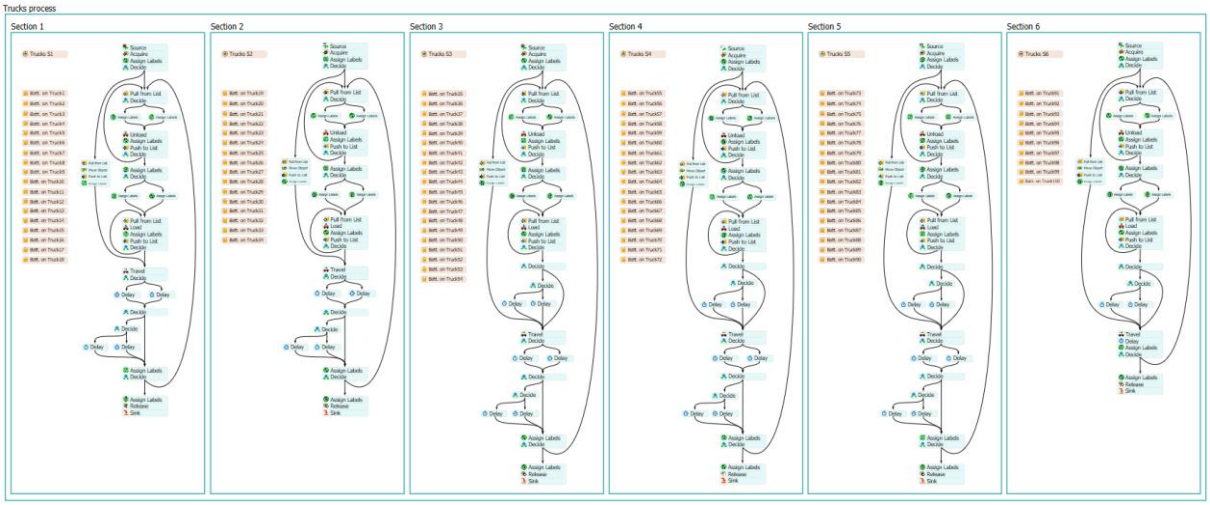


Figura 37 - Sezione "Truck process" presente nel process flow del modello di FlexSim

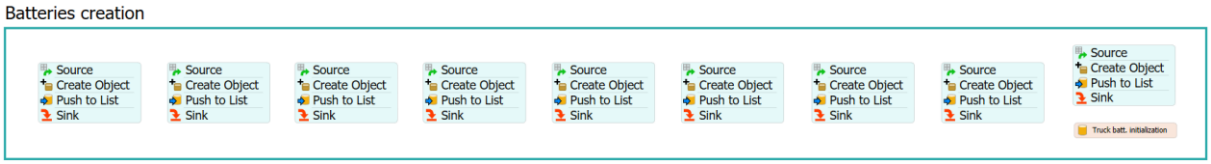


Figura 38 - Sezione "Batteries creation" presente nel process flow del modello di FlexSim

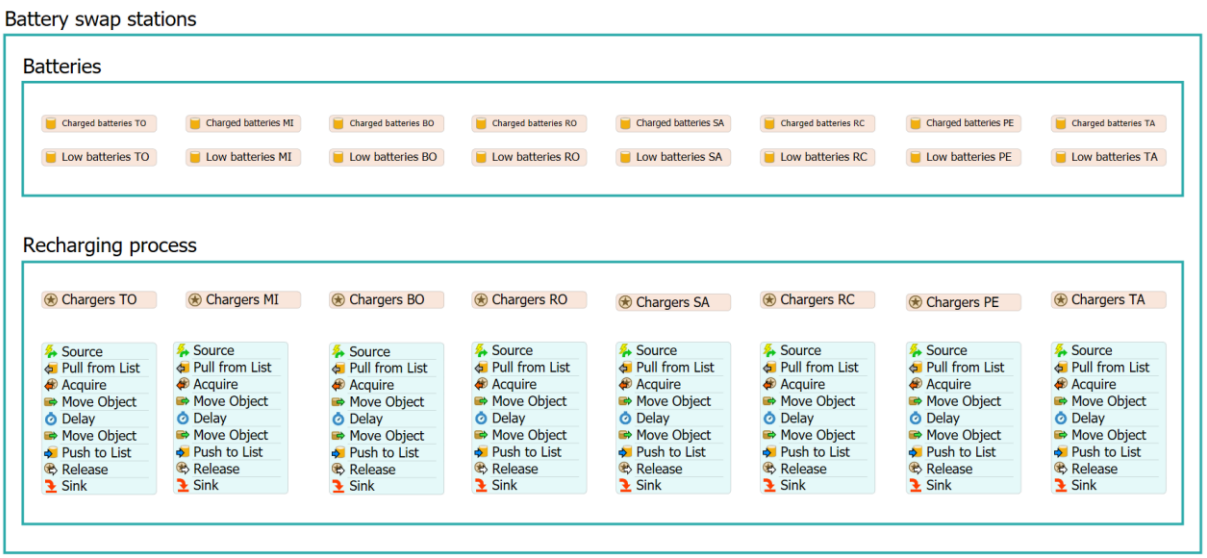


Figura 39 - Sezione "Battery Swap stations" presente nel process flow del modello di FlexSim

Di seguito si utilizza la sottosezione che modellizza la tratta Torino - Bologna - Roma (*Figura 40*) per spiegarne il funzionamento più nel dettaglio. I vari sotto processi, specifici di ogni tratta, possono presentare delle differenze minime, legate soprattutto alle pause intermedie. Poiché non si discostano significativamente dalla descrizione proposta, valgono considerazioni molto simili.

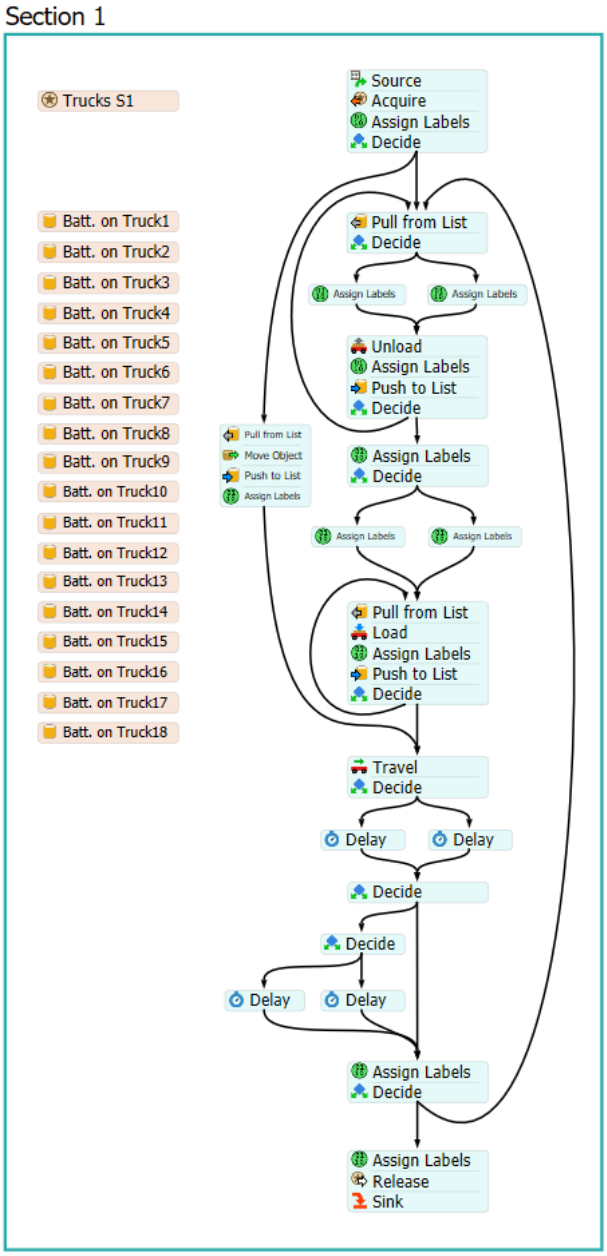


Figura 40 - Sottosezione che modellizza il funzionamento della singola tratta nel process flow del modello di FlexSim

Sul lato sinistro sono collocate le liste interessate dal sottoprocesso in questione. Le liste hanno una funzione molto simile a dei buffer per i token e possono essere utili a gestire le sincronizzazioni tra eventi o azioni. È possibile gestire l'entrata e l'uscita dei token dalle liste tramite moduli di "Push to list" o "Pull from list". In questo caso è presente una lista per ogni camion, nelle quali è possibile visualizzare in tempo reale il numero di batterie presenti a bordo (numero di token-batteria nella lista) e dalle quali vengono prelevate le batterie scariche e in seguito reinserite quelle cariche.

Nel primo blocco di moduli è modellizzata la predisposizione dei veicoli alla partenza. In particolare, il modulo “Source” genera i token corrispondenti ai veicoli secondo una tabella di scheduling che riproduce gli orari ottenuti nella fase di stima dei flussi (nel capitolo precedente). Il modulo “Acquire” acquisisce una risorsa truck, ovvero associa al token generato un camion nel modello 3D. Nel modulo “Assign label” sono assegnate al token delle etichette inizializzate, ovvero delle informazioni legate al token, utili in seguito per il funzionamento del modello. Tra queste vi sono la posizione di partenza del camion, che capacità ha, quante batterie ha a bordo. Poiché gli autoarticolati si trovano in una delle due destinazioni finali a giorni alterni, è stato necessario creare un codice specifico (riportato di seguito), che permette di associare al token la posizione in cui si trova il veicolo a inizio viaggio, in base alla localizzazione nel modello tridimensionale dell’oggetto “Truck” ad esso associato.

```
Object current = param(1);
treenode activity = param(2);
Token token = param(3);
Variant assignTo = param(4);
string labelName = param(5);
treenode processFlow = ownerobject(activity);

Object locTO = Model.find("GISNavigator/BSS Torino");
Object locTruck = token.truck;
Object truckPoint = getsdtvalue(locTruck.find(">variables/navigator/1+"),
"currentPoint");

if(truckPoint == locTO)
{
return 1;
}

else
{
return 3;
}
```

In seguito, il grafo si sdoppia poiché nel blocco di sinistra è modellizzato il trasferimento iniziale delle batterie per il primo viaggio, mentre nei blocchi a destra sono modellizzati i processi di scarico e carico delle batterie per i viaggi successivi al primo. Nel primo caso, infatti, il trasferimento è immediato, poiché all’inizio della simulazione ogni camion parte con già tutte le batterie cariche presenti a bordo e i token-batteria sono prelevati da una lista di inizializzazione dei camion (visibile in *Figura 38*).

Il processo di scarico delle batterie è costituito da un ciclo, dove ogni ripetizione corrisponde alla rimozione di una di esse. In particolare, i token-batteria sono prelevati della lista corrispondente al camion che sta effettuando lo swapping e mandati nella lista delle batterie scariche della stazione in cui si trova. Ad ogni token-batteria viene associata una label che rappresenta lo stato di carica e che viene utilizzata per determinare il tempo per cui deve stare in carica. Sono rimosse un numero di batterie (cicli effettuati) pari a quelle consumate per percorrere la tratta precedente. Come è stato spiegato, le prime batterie rimosse sono completamente scariche, mentre l’ultima batteria rimossa avrà una porzione di

carica rimanente. Tale operazione è svolta attraverso il modulo “Decide” e i due moduli “Assign labels” presenti nel loop, mentre i valori sono prelevati dall’ultima colonna delle tabelle relative ad ogni tratta, usate più volte nel corso del modello (*Figura 41*).

Model | Section 1 | Section 2 | Section 3 | Section 4 | Section 5

	Destinations	Pull lists	Batteries req.	Partial batt. req.
Row 1	Low batteries TO	Charged batteries TO	3	0.45
Row 2	Low batteries BO	Charged batteries BO	3	0.45
Row 3	Low batteries RO	Charged batteries RO	3	0.85
Row 4	Low batteries BO	Charged batteries BO	3	0.85

Figura 41 - Tabella relativa ad una singola tratta utilizzata nel modello di FlexSim

Prima che venga effettuato il processo di prelievo delle batterie cariche viene definita la nuova destinazione, poiché essa determina il numero di accumulatori necessari. Le destinazioni variano in base alla tratta considerata. Sono lette dalla tabella relativa alla tratta e vengono individuate tramite un sistema di labels, che si aggiornano una volta raggiunta una nuova località. In particolare, poiché sono percorse delle rotte cicliche, l’”Assign label” posto a destra aggiorna la destinazione, mentre quello a sinistra assegna nuovamente la prima destinazione, nel caso si sia raggiunta la 4 località al viaggio precedente.

Il secondo ciclo modellizza il processo di carico delle batterie. Anche in questo caso ogni iterazione rappresenta una batteria montata sull’autoarticolato. I token-batteria sono presi dalla lista delle batterie cariche della stazione in cui si trova il camion e sono inseriti nella lista delle batterie a bordo. Le attività di carico e di scarico impiegano un tempo fisso pari a 2 minuti per batteria.

L’ultimo blocco del process flow fa sì che il camion viaggi verso la successiva destinazione. In seguito, sono presenti alcuni delay. I primi due, posti in parallelo, modellizzano la variabilità del tempo di viaggio (quello di sinistra è relativo al primo segmento della tratta, quello di destra al secondo). Successivamente si distingue tramite il modulo “Decide” se il veicolo è giunto alla sua destinazione finale della giornata o a quella intermedia. Se la stazione di arrivo è quella finale, allora il token segue l’arco a destra, in seguito la risorsa “Truck” viene rilasciata e il token distrutto. Se invece il camion si trova nella BSS intermedia, il token segue l’arco a sinistra, attraverso il quale è modellizzato il riposo dell’autista. Quest’ultimo è pari a circa 45 minuti, nel caso sia un viaggio diurno, e pari a circa 4 ore, nel caso si tratti di un viaggio notturno. In seguito, il token ripercorre tutto il process flow, facendo giungere il veicolo alla destinazione finale della giornata.

L’intero processo si ripete ogni volta che una nuova partenza è programmata, tramite la creazione schedulata di un nuovo token, e ogni veicolo riprende il proprio viaggio circa 24 ore dopo la precedente partenza, acquisendo la stessa risorsa “Truck” della volta prima.

In particolare, per la modellizzazione della variabilità è stata scelta la funzione di probabilità lognormale, poiché è suggerita da FlexSim stesso per la rappresentazione di tempistiche relative alle attività di un processo e per via della sua forma simile ad una distribuzione normale schiacciata verso sinistra (*Figura 42*), che risulta particolarmente adatta alla modellizzazione di un periodo che non può essere inferiore ad un tempo minimo e al quale si aggiunge un ritardo che è sempre meno probabile all’aumentare della durata. In teoria delle probabilità, la distribuzione lognormale è la distribuzione di probabilità di una variabile aleatoria X il cui logaritmo $log\ X$ segue una distribuzione normale.

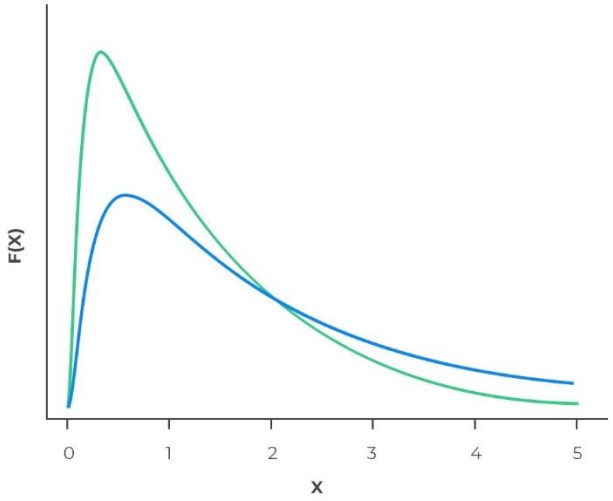


Figura 42 - Esempio di distribuzione lognormale

FlexSim permette di impostare come parametri della distribuzione, il valore minimo, la scala utilizzata e il fattore di forma (*Figura 43*). Per la rappresentazione del ritardo sui tempi di viaggio, il valore minimo impostato è pari a 0, poiché si tratta di un tempo da sommare ad un tempo fisso minimo. Come fattore di forma, che determina la deviazione standard, è stato utilizzato il valore 0.8, ottenendo una forma della distribuzione come quella mostrata nella figura sottostante. Mentre la scala è stata individuate in modo da ottenere come media il valore desiderato, pari al 5% del tempo di viaggio.

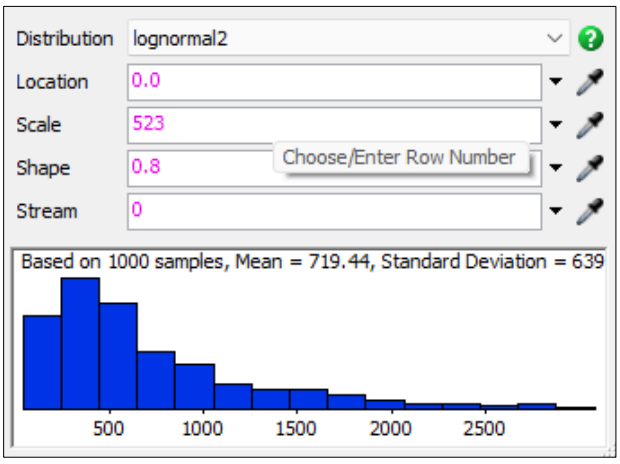


Figura 43 - Modellizzazione su FlexSim della funzione di distribuzione utilizzata per i moduli "delay"

Per i ritardi sui tempi di riposo, invece, i parametri sono stati impostati rispettivamente pari a 0, 218 (in modo da ottenere ritardo medio di 5 minuti) e un fattore di forma di 0.8. Un'ulteriore variabilità è stata inserita nel momento della partenza dalla prima stazione. I veicoli possono infatti partire in un momento casuale e uniformemente distribuito all'interno di un intervallo di 15 minuti seguente all'orario nel quale è programmata la partenza. Non è stato possibile utilizzare una distribuzione di probabilità più specifica poiché FlexSim non permette di fare diversamente nel modulo di "Source", ma data la necessità di

modellizzare semplicemente un breve ritardo della partenza, tale limite non impatta sulla qualità della simulazione.

Per finire, la sezione “Battery Swap stations” (in *Figura 44* la sottosezione dedicata alla modellizzazione della BSS di Roma) presenta due liste, “Charged batteries” e “Low Batteries”, nel quale sono allocati i token-batteria quando sono associati rispettivamente ad una batteria carica o ad una batteria scarica. Tali liste interagiscono con il process flow relativo alle azioni dei camion ogni qual volta uno di essi raggiunge una nuova destinazione e con la sezione relativa alla creazione delle batterie appena la simulazione viene avviata. In basso si trova, invece, il blocco che gestisce le ricariche per la stazione. Un nuovo token-caricatore viene generato ogni volta che una batteria viene scaricata da un mezzo, attraverso l’uso del modulo “Event-Triggered Source”, il quale si attiva appena cambia l’input della lista “Low batteries” della stazione in questione. In seguito, viene prelevato un token-batteria dalla lista, tramite modulo “Pull from list” e gli è associato una risorsa caricatore, attraverso il modulo “Acquire”. Dopo un periodo d’attesa pari al tempo necessario a ricaricare la batteria, il token-batteria viene inserito nella lista “Charged batteries” della stazione, la risorsa caricatore è rilasciata e il token- caricatore viene distrutto. I moduli “Move object” servono a spostare gli oggetti rappresentanti gli accumulatori del modello 3D dalla baia di deposito al caricatore e viceversa.

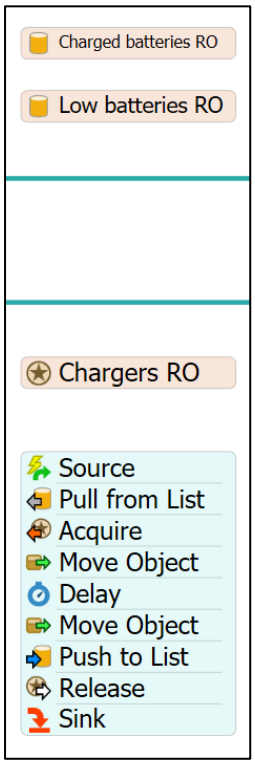


Figura 44 - Sottosezione che modellizza il funzionamento della singola BSS nel process flow del modello di FlexSim

6.3 Risoluzione del modello di simulazione

La risoluzione del modello prevede l’esecuzione della simulazione per un periodo di 168 ore (7 giorni) pari al periodo considerato nella fase di ottimizzazione. Gli sviluppi degli eventi si possono visualizzare in tempo reale sia nel modello tridimensionale che nel process flow così come le statistiche, aggiornate al verificarsi di ogni evento discreto. Oltre ai valori visualizzabili dalla sezione “Statistics” di tutti gli

elementi del modello che ne dispongono, sono state create delle dashboard, una per ogni stazione, in cui visualizzare i risultati più importanti, sia sotto forma di tabella che di grafico a linee, per monitorare l'evoluzione nel tempo. Tali risultati sono mostrati nell'*Appendice C,* per lo scenario 1, e *nell'Appendice D,* per quanto riguarda lo scenario 2.

In un primo momento sono state effettuate le simulazioni impostando le quantità di batterie e di caricatori determinati dall'ottimizzatore per verificare il funzionamento corretto della rete con tali valori. Successivamente, è stata valutata la robustezza dei risultati e il margine di riduzione delle batterie in ogni stazione. In seguito, è riportato il metodo sperimentale usato per individuare i valori minimi di batterie per ogni BSS con cui poter soddisfare almeno il 95% della domanda istantaneamente.

1. Partendo dai valori ricavati dall'ottimizzazione, si riduce di un'unità la quantità presente in ogni BSS e sono effettuate 5 repliche della simulazione. Tale passaggio è ripetuto fino a che in una delle stazioni non è registrato un livello di servizio inferiore in anche una sola delle ripetizioni.
2. Se in una delle stazioni è registrato un livello di servizio minore di quello desiderato, si aumenta la quantità di batterie in tale BSS di una unità prima di continuare con le ripetizioni. Da quel momento tale valore non sarà più ridotto, ma al massimo aumentato ulteriormente nel caso sia registrato nuovamente un livello di servizio non sufficiente.
3. Si prosegue, ripetendo il passaggio al punto 1 per tutte le stazioni che non hanno ancora registrato un livello di servizio minore della soglia minima.
4. Una volta determinate tutte le qualità ridotte si effettuano 20 ripetizioni di simulazione per verificare che effettivamente non si registrano livelli di servizio non adeguati.

È necessario considerare l'insieme della rete di servizio per valutarne la robustezza e non ogni singola stazione separatamente, poiché i risultati ottenuti nelle varie BSS non sono indipendenti. Infatti, se un veicolo viene servito con un certo ritardo in una stazione, giungerà dopo presso la stazione successiva, andando ad alterarne la domanda attesa.

6.4 Risultati del modello di simulazione

Per entrambi gli scenari sono stati registrati i risultati numerici di 20 ripetizioni della simulazione, utilizzando il dimensionamento delle stazioni determinato dall'ottimizzatore. In seguito all'individuazione delle quantità minime di batterie attraverso il metodo appena citato, sono poi state effettuate altre 20 ripetizioni.

I parametri considerati nel riassunto dei risultati riportati nell'elaborato principale si concentrano su misure relative alle richieste di batterie non soddisfatte, in quanto costituiscono l'indice più rilevante sull'efficacia e sulla qualità del servizio e permettono di valutare in modo immediato le quantità impostate. Per una maggior completezza è possibile visionare le dashboard presenti nel modello FlexSim (un esempio è riportato per entrambi gli scenari nelle appendici C e D), nelle quali sono mostrati i risultati relativi ad altre variabili, legate allo stato delle batterie in ogni stazione e alla loro evoluzione nel tempo.

6.4.1 Risultati della simulazione relativi allo scenario 1

I risultati qui riportati sono stati ottenuti utilizzando le quantità di batterie e caricatori ricavati dall'ottimizzazione.

Richieste inevase - Torino						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Richieste inevase - Milano						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Richieste inevase - Bologna						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Richieste inevase - Pescara						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Richieste inevase - Roma						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Richieste inevase - Taranto						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	4	2	582,18	1608,89	1115,79	97,48
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,20	0,10	29,11	80,44	55,79	99,87

Richieste inevase - Salerno						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Richieste inevase - Reggio Calabria						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Tabella 10- Risultati della simulazione relativi allo scenario 1

Come si può osservare, i livelli di servizio ottenuti dalle varie repliche della simulazione sono quasi sempre pari al 100% in tutte le stazioni e solo per la BSS di Taranto sono state registrate richieste non soddisfatte e comunque impattanti in modo molto marginale sul risultato finale. I livelli di servizio medi sono maggiori del 99,86% in tutte le stazioni, garantendo l'efficacia del servizio e confermando ampiamente i valori determinati dall'ottimizzazione.

Poiché la simulazione modellizza alcuni aspetti non considerati nell'ottimizzazione, come il verificarsi degli eventi puntualmente nel tempo e non all'interno di intervalli regolari, la distinzione del livello di carica parziale di alcune batterie, così come l'applicazione della variabilità agli eventi, i risultati potrebbero subire gli effetti di tali differenze. È utile, dunque, andare ad analizzare la robustezza dei risultati, per capire quanto si discostino i risultati della simulazione da quelli dell'ottimizzazione e se ci sia un margine di riduzione delle quantità di batterie allocate. Le quantità ridotte di batterie, ottenute tramite la metodologia descritta a pag. 69, risultano essere le seguenti:

	Torino	Milano	Bologna	Pescara	Roma	Salerno	R. Calabria	Taranto	TOT
Batterie	30	22	86	39	40	28	20	12	277
Batterie ridotte	23	16	66	33	34	24	16	12	224
Variazione	-23,33%	-27,27%	-23,26%	-15,38%	-15,00%	-14,29%	-20,00%	0,00%	-19,13%

CAE batterie BSS	1.020.135,60 €
CAE batterie ridotte BSS	824.947,20 €
Variaz. CAE batterie	-19,13%
Variaz. CAE totale	-8,12%

Costo batterie BSS	6.094.000 €
Costo batterie ridotte BSS	4.928.000 €
Variaz. costo batterie	-19,13%
Variaz. costo totale	-7,49%

Tabella 11 - Riduzione delle batterie per testare la robustezza dei risultati dell'ottimizzazione nello scenario 1

I valori ottenuti dimostrano una certa robustezza dei risultati, ma con riduzioni percentuali significativamente diverse tra le varie stazioni. Le riduzioni minori si verificano nelle BSS di Taranto, Salerno, Roma e Pescara, mentre le stazioni di Milano e Torino e Bologna permettono riduzioni più consistenti. Tali differenze sono dovute ancora una volta alla distribuzione delle domande, che risultano più regolari e soprattutto più concentrate nelle stazioni di Milano, Torino e Bologna, rispetto a quelle precedentemente citate. La BSS di Bologna ha una domanda meno regolare di Milano e Torino, ma è caratterizzata da picchi rilevanti. A parità di batterie richieste, una domanda più concentrata richiede infatti un numero di batterie maggiore rispetto ad una domanda più distribuita nel tempo. Questo risulta essere meno efficiente, ma offre un margine di sicurezza maggiore per tutti i periodi in cui non si verificano picchi di domanda. Come si può osservare, nella BSS di Taranto non sono possibili riduzioni, se si vuole mantenere lo standard imposto sul livello di servizio. Oltre al fatto che quella di Taranto è la BSS più piccola tra tutte e dunque meno predisposta a ulteriori diminuzioni delle proprie risorse, la motivazione principale è che la distribuzione delle richieste è costante come quantità, non presenta infatti neanche il minimo picco, ed è sparsa nel corso della giornata, oltre ad essere caratterizzata da bassi valori. Queste condizioni permettono un'ottimizzazione molto precisa, che lascia però meno margine di sicurezza in presenza di variabilità. Per questo motivo anche piccole riduzioni nella disponibilità di batterie possono creare un'incapacità di rispondere adeguatamente alle richieste. La riduzione sul totale delle batterie allocate nella rete di BSS è pari al -19,13%, così come la riduzione del CAE e del costo d'acquisto delle batterie, mentre sul totale si registrano variazioni rispettivamente del -8,12% e del -7,49%.

È necessario precisare che, nonostante siano state effettuate molte repliche della simulazione, l'introduzione di variabilità nel processo non permette di garantire che il livello di servizio sia sempre maggiore del 95%. Potrebbe infatti verificarsi un evento poco probabile che determina un'impossibilità di servire la domanda secondo gli standard normali, ma questo d'altronde avviene anche in un contesto reale. Per questo motivo si può scegliere di utilizzare un certo livello di scorte di sicurezza, mantenendo le quantità più elevate determinate dall'ottimizzatore o utilizzando dei valori intermedi tra questi ultimi e le quantità ridotte appena presentate.

Di seguito sono mostrati i risultati di 20 repliche della simulazione dopo aver impostato le quantità ridotte di batterie allocate nelle stazioni della rete di Battery Swap.

Richieste inevase - Torino						
Repliche	**Qtà tot**	**Qtà max**	**T min**	**T max**	**T medio**	**LS**
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	5	2	23,02	3194,93	1202,36	98,37%
3	2	1	788	2016,91	1402,28	99,35%
4	2	2	2980,26	3025,06	3002,66	99,35%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	1	1	96,27	96,27	96,27	99,67%
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
8	3	1	10,82	2429,98	1584,27	99,02%
9	2	1	9,16	23,68	16,42	99,35%
10	1	1	2788,36	2788,36	2788,36	99,67%
11	4	1	50,96	2576,06	1370,69	98,69%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	5	2	23,02	3194,93	1202,36	98,37%
15	2	1	787,65	2016,91	1402,28	99,35%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	2	1	141,91	174,98	158,45	99,35%
18	7	2	43,08	2678,27	1349,35	97,71%
19	3	2	64,66	200,24	148,81	99,02%
20	9	2	33,74	360,46	153,98	97,06%
Media	2,40	1,00	392,03	1238,85	793,93	99,22%

Richieste inevase - Milano						
Repliche	**Qtà tot**	**Qtà max**	**T min**	**T max**	**T medio**	**LS**
1	2	1	201,60	412,28	306,94	99,12%
2	3	1	1,75	49,76	22,53	98,68%
3	3	1	76,04	490,57	314,10	98,68%
4	5	1	57,41	197,67	114,99	97,81%
5	6	2	1,79	377,45	228,42	97,37%
6	4	2	39,55	237,24	115,34	98,25%
7	8	2	92,08	2959,51	885,49	96,49%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	2	1	33,84	729,90	381,87	99,12%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	1	1	60,50	60,50	60,50	99,56%
12	3	1	63,35	729,34	326,39	98,68%
13	2	1	201,60	412,28	306,94	99,12%
14	3	1	1,75	49,76	22,53	98,68%
15	3	1	76,04	490,57	314,10	98,68%
16	1	1	462,87	462,87	462,87	99,56%
17	5	2	131,72	569,18	282,86	97,81%
18	10	2	34,86	3120,92	779,42	95,61%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	4	1	59,37	374,78	202,81	98,25%
Media	3,25	1,10	79,81	586,23	256,41	98,57%

Richieste inevase - Bologna						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	25	2	17,49	504,29	199,03	98,12%
2	14	2	21,50	870,59	230,29	98,94%
3	33	2	4,15	1111,91	239,28	97,51%
4	35	2	3,60	728,83	250,32	97,37%
5	17	3	0,26	1461,28	396,57	98,72%
6	20	2	26,73	1282,81	329,21	98,50%
7	26	3	0,10	916,87	269,68	98,05%
8	12	3	2,73	790,83	224,24	99,10%
9	18	2	22,17	639,43	215,79	98,65%
10	24	3	14,33	455,63	224,73	98,20%
11	17	2	8,01	1381,93	397,74	98,72%
12	16	4	19,16	866,20	340,53	98,80%
13	25	2	17,49	504,29	199,03	98,12%
14	14	2	21,50	870,59	230,29	98,95%
15	33	2	4,15	1111,91	239,28	97,52%
16	17	2	3,38	648,08	230,54	98,72%
17	26	2	12,92	1047,50	336,70	98,05%
18	24	3	13,81	880,67	265,57	98,20%
19	28	3	2,43	1461,06	378,75	97,90%
20	13	2	25,84	852,97	264,68	99,02%
Media	21,85	2,40	12,09	919,38	273,11	98,36%

Richieste inevase - Pescara						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	5	1	588,42	2161,60	1211,76	99,00%
2	6	1	29,56	2026,51	1301,87	98,80%
3	7	1	16,11	4617,46	1442,29	98,60%
4	6	1	101,14	1411,99	782,33	98,80%
5	6	1	857,12	2263,08	1555,42	98,80%
6	5	1	170,74	2098,59	1484,13	99,00%
7	10	1	70,68	2311,30	895,21	98,00%
8	5	1	154,28	1951,31	1259,12	99,00%
9	5	1	1187,93	2789,74	2015,50	99,00%
10	6	1	921,87	2581,43	1653,71	98,80%
11	8	1	67,94	2237,78	1131,80	98,40%
12	16	2	32,52	3929,13	1124,52	96,81%
13	5	1	588,42	2161,60	1211,76	99,00%
14	6	1	29,56	2026,51	1301,87	98,80%
15	7	1	16,11	4617,46	1442,29	98,60%
16	6	1	464,24	2255,23	1087,37	98,80%
17	4	1	26,08	1992,80	933,62	99,20%
18	5	1	155,07	2163,38	991,77	99,00%
19	6	1	585,72	2749,60	1872,25	98,80%
20	6	1	255,74	1990,86	936,13	98,80%
Media	6,50	1,05	315,96	2516,87	1281,74	98,70%

Richieste inevase - Roma						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	10	1	179,12	3242,10	1059,81	97,78%
2	14	2	12,25	1455,09	549,70	96,89%
3	14	1	3,48	1295,54	598,56	96,89%
4	11	2	33,97	1205,69	661,15	97,56%
5	10	1	24,26	1454,19	665,11	97,78%
6	11	3	236,36	952,39	604,90	97,56%
7	6	1	102,43	2681,10	1289,63	98,67%
8	14	1	36,16	1446,07	652,50	96,89%
9	9	1	162,69	1002,61	660,59	98,00%
10	12	1	62,07	1204,73	643,59	97,33%
11	10	1	41,43	1962,07	930,67	97,78%
12	8	1	151,51	1430,58	680,54	98,22%
13	10	1	179,12	3242,10	1059,81	97,78%
14	14	1	12,25	1455,09	549,70	96,89%
15	14	1	3,48	1295,54	598,56	96,89%
16	11	2	25,44	2105,01	849,50	97,56%
17	15	2	22,40	1306,08	659,34	96,67%
18	13	2	115,39	4315,96	1092,15	97,11%
19	11	1	1,03	1312,89	729,83	97,56%
20	11	2	83,33	2507,12	1246,06	97,56%
Media	11,40	1,40	74,41	1843,60	789,09	97,47%

Richieste inevase - Taranto						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	4	2	650,70	826,49	736,33	97,95%
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	3	1	139,57	1208,62	833,91	98,46%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	0,35	0,15	39,51	101,76	78,51	99,82%

Richieste inevase - Salerno						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	2	1	120,00	1451,34	785,67	99,46%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	4	1	27,82	921,63	297,36	98,92%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	7	2	182,03	5030,67	1225,46	98,11%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	2	1	120,00	1451,34	785,67	99,46%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	6	1	328,57	1625,36	587,12	98,38%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	1,05	0,30	38,92	524,02	184,06	99,72%

Richieste inevase - Reggio Calabria						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	2	1	3,08	181,51	92,29	99,07%
4	1	1	210,94	210,94	210,94	99,54%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	3	1	1915,33	3179,52	2643,29	98,61%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	2	1	28,05	1875,96	952,01	99,07%
10	2	1	21,72	201,00	111,36	99,07%
11	3	1	47,39	165,18	108,10	98,61%
12	1	1	19,57	19,57	19,57	99,54%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	2	1	3,08	181,51	92,29	99,07%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	5	1	185,76	2883,28	1868,61	97,69%
18	1	1	314,65	314,65	314,65	99,54%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	2	1	208,16	1331,89	770,02	99,07%
Media	1,20	0,55	147,89	527,25	359,16	99,44%

Tabella 12 - Risultati della simulazione relativi allo scenario 1 con quantità di batterie ridotte

Come si può osservare, in questo caso i fallimenti nel soddisfare la domanda sono molto più frequenti e si verificano in tutte le BSS. Un aspetto particolare è il fatto che i livelli di servizio si mantengono comunque relativamente alti, nonostante la soglia minima fosse impostata pari al 95%. Questo è dovuto alla scelta di prendere come riferimento il livello di servizio di ogni periodo e non il valore medio tra i periodi, facendo sì che quest'ultimo si attestasse su valori più alti in media. Un altro motivo si può individuare nella dinamica con cui varia la capacità di soddisfare la domanda con livelli di servizio elevati, al variare del numero di batterie allocate. Sperimentalmente si è verificato che con le prime riduzioni le BSS mantenessero dei livelli di servizio molto elevati, ma, una volta raggiunto un determinato valore critico, le richieste non soddisfatte aumentassero notevolmente di frequenza, facendo calare nettamente il valore del livello di servizio. Poiché le quantità selezionate si collocano subito al di sopra dei valori critici di ogni stazione, le percentuali di soddisfazione della domanda si mantengono nettamente più elevate del 95%.

Confrontando i livelli di servizio medi delle varie BSS emerge come Bologna sia la stazione in cui si è registrato il valore minore. La motivazione e che tale stazione coinvolge i flussi più rilevanti e gestisce di gran lunga il numero maggiore di batterie e ciò fa sì che sia esposta a variabilità maggiori rispetto ad altre BSS, come si può facilmente notare dai back orders registrati in ogni replica. Nonostante, ciò il tempo medio di attesa è molto basso (minore di 5 minuti) e dunque risulta quasi trascurabile nello svolgimento comune delle attività. Le tempistiche più elevate si registrano invece nella stazione di Pescara, con un valore medio di 1281,74 s (poco più di 21 minuti).

6.4.2 Risultati della simulazione relativi allo scenario 2

Ripetendo le 20 simulazioni per lo scenario 2, con le quantità di batterie e caricatori determinate dall'ottimizzatore, non sono state registrate richieste di batterie non sodisfatte e perciò i livelli di servizio risultano essere tutti del 100%. Per tale motivo non sono stati riportati i risultati delle 20 repliche. Anche in questo caso, i risultati dell'ottimizzazione sono stati confermati dalla simulazione, validando il modello anche con l'uso di dati di input differenti e che hanno un effetto rilevante sulla gestione ottimale della rete.

In seguito, è stato seguito lo stesso procedimento già visto per lo scenario 1, andando a ridurre gradualmente il numero di batterie allocate in ogni stazione per valutarne la robustezza. I risultati ottenuti sono i seguenti.

	Torino	Milano	Bologna	Pescara	Roma	Salerno	R. Calabria	Taranto	TOT
Batterie	30	22	161	48	43	44	20	18	386
Batterie ridotte	28	19	124	48	43	40	19	18	339
Variazione	-6,67%	-13,64%	-22,98%	0,00%	0,00%	-9,09%	-5,00%	0,00%	-12,18%

CAE batterie BSS	1.421.560,80 €
CAE batterie ridotte BSS	1.248.469,20 €
Variaz. CAE batterie	-12,18%
Variaz. CAE totale	-6,85%

Costo batterie BSS	8.492.000 €
Costo batterie ridotte BSS	7.458.000 €
Variaz. costo batterie	-12,18%
Variaz. costo totale	-6,81%

Tabella 13 - Riduzione delle batterie per testare la robustezza dei risultati dell'ottimizzazione nello scenario 2

Come si può notare, le differenze con lo scenario 1 sono notevoli, poiché le variazioni possibili in ogni stazione sono nettamente inferiori di tutte quelle ottenute in precedenza. Ben tre delle BSS, Pescara, Roma e Taranto, non permettono di effettuare riduzioni delle quantità allocate, se si vuole mantenere un servizio adeguato, e solo nelle stazioni di Bologna e Milano sono state effettuate riduzioni consistenti. Di conseguenza, anche i risultati economici mostrano delle variazioni minori rispetto allo scenario 1, con una diminuzione del CAE e del costo di acquisto relativo alle batterie allocate presso le BSS pari al 12,18%, e delle variazioni nei valori totali degli stessi indicatori rispettivamente del -6,85% e del -6,81%.

Tali valori confermano ampiamente le ipotesi fatte in precedenza, secondo le quali dei tempi di ricarica elevati rendessero le stazioni molto più soggette agli effetti della variabilità, fornendo un servizio meno reattivo agli scostamenti di domanda a breve e lungo termine. Per questo motivo e per quelli elencati nel paragrafo 5.4.2 la soluzione definita nello scenario 1 risulta essere quella preferibile nel complesso.

Di seguito sono mostrati i risultati di 20 repliche della simulazione per lo scenario 2 con quantità di batterie ridotte.

Richieste inevase - Torino						
Repliche	**Qtà tot**	**Qtà max**	**T min**	**T max**	**T medio**	**LS**
1	5	1	28,37	345,17	182,80	98,37%
2	3	1	9,36	241,83	90,27	99,02%
3	4	1	33,08	284,55	103,82	98,69%
4	3	1	32,74	249,63	106,71	99,02%
5	4	2	63,01	411,44	305,98	98,69%
6	4	2	14,86	415,84	187,98	98,69%
7	5	1	35,24	3343,79	1929,36	98,37%
8	4	1	98,86	211,49	167,23	98,69%
9	2	1	106,25	122,25	114,25	99,35%
10	3	2	154,77	326,94	255,26	99,02%
11	7	2	13,02	307,75	163,79	97,71%
12	2	1	64,66	218,59	141,62	99,35%
13	2	1	5,91	590,05	297,98	99,35%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	5	1	10,04	299,62	122,50	98,37%
16	4	1	5,06	3006,83	1467,79	98,69%
17	4	1	6,11	204,48	75,52	98,69%
18	5	1	37,74	339,48	194,50	98,37%
19	6	1	38,89	458,53	148,77	98,04%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	3,60	1,10	37,90	568,91	302,81	98,82%

Richieste inevase - Milano						
Repliche	**Qtà tot**	**Qtà max**	**T min**	**T max**	**T medio**	**LS**
1	6	1	1361,01	1932,23	1741,59	97,37%
2	6	1	1359,18	2142,49	1692,27	97,37%
3	6	1	1348,58	1897,66	1698,35	97,37%
4	6	1	1327,35	1887,01	1605,35	97,37%
5	6	1	1317,89	1946,64	1587,43	97,37%
6	6	1	1325,03	1901,48	1660,85	97,37%
7	6	1	1423,16	1963,87	1783,54	97,37%
8	7	1	240,59	1878,52	1394,89	96,93%
9	7	2	1370,26	2211,15	1752,57	96,93%
10	6	1	1370,90	1749,09	1517,73	97,37%
11	6	1	1405,10	2011,84	1744,08	97,37%
12	5	2	1615,91	2144,42	1900,23	97,81%
13	6	1	1201,98	2221,95	1440,10	97,37%
14	6	1	1379,81	2476,66	1910,56	97,37%
15	6	1	1251,10	2244,04	1645,34	97,37%
16	6	2	1611,30	2259,54	1934,97	97,37%
17	6	1	1421,17	2444,45	1772,68	97,37%
18	8	1	48,18	1889,32	1231,94	96,49%
19	6	1	1278,08	2403,76	1742,85	97,37%
20	6	1	1462,86	2076,70	1800,40	97,37%
Media	6,15	1,15	1255,97	2084,14	1677,89	97,30%

Richieste inevase - Bologna						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	42	3	7,17	926,08	291,24	96,46%
2	11	2	25,75	326,82	154,15	99,17%
3	33	3	41,35	1154,89	401,02	97,52%
4	30	4	9,61	1594,97	422,93	97,75%
5	25	3	49,42	1055,39	274,74	98,12%
6	32	3	63,31	1685,87	337,73	97,60%
7	46	4	3,17	830,55	298,63	96,54%
8	46	3	14,29	1142,66	375,12	96,54%
9	40	3	19,86	1056,00	428,98	96,99%
10	27	3	18,10	1101,49	351,63	97,97%
11	32	4	8,10	696,11	232,73	97,60%
12	34	3	10,17	1675,14	375,99	97,45%
13	26	3	12,79	613,09	200,35	98,05%
14	33	4	88,45	727,08	316,82	97,52%
15	41	4	5,60	799,70	317,47	96,92%
16	43	3	6,43	1495,52	276,95	96,77%
17	32	4	21,93	1236,14	359,74	97,60%
18	27	3	1,24	925,28	222,05	97,97%
19	35	3	2,76	760,01	256,19	97,37%
20	37	4	2,00	936,00	365,22	97,22%
Media	33,60	3,30	20,58	1036,94	312,98	97,46%

Richieste inevase - Pescara						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00%

Richieste inevase - Roma						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00%

Richieste inevase - Taranto						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00%

Richieste inevase - Salerno						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	1	1	213,33	213,33	213,33	99,73%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
10	7	2	50,07	1296,00	600,16	98,11%
11	3	1	24,42	1083,27	508,66	99,19%
12	1	1	2079,07	2079,07	2079,07	99,73%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	1	1	158,26	158,26	158,26	99,73%
15	2	1	20,41	880,63	450,52	99,46%
16	2	1	688,78	908,50	798,64	99,46%
17	3	2	416,35	3130,41	2191,41	99,19%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	3	1	243,94	895,33	484,14	99,19%
20	3	1	336,91	1051,19	669,78	99,19%
Media	1,30	0,60	211,58	584,80	407,70	99,65%

Richieste inevase - Reggio Calabria						
Repliche	Qtà tot	Qtà max	T min	T max	T medio	LS
1	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
2	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
3	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
4	2	1	2241,38	3179,83	2710,60	99,07%
5	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
6	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
7	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
8	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
9	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
10	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
11	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
12	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
13	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
14	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
15	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
16	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
17	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
18	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
19	2	1	2180,36	2391,76	2286,06	99,07%
20	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00%
Media	0,20	0,10	221,09	278,58	249,83	99,91%

Tabella 14 - Risultati della simulazione relativi allo scenario 1 con quantità di batterie ridotte

Ovviamente gli episodi in cui non viene soddisfatta immediatamente la domanda aumentano notevolmente con le riduzioni effettuate. Nelle stazioni nelle quali non sono diminuite le quantità non sono state registrate mancate disponibilità. L'unica BSS nella quale si verificano ritardi consistenti è quella di Milano, caratterizzata anche da un livello di servizio leggermente minore e da una regolarità notevole dei risultati, quest'ultima caratteristica che accomuna i risultati delle varie stazioni nello scenario 2 rispetto allo scenario 1, nel quale i valori erano più dispersi. Per quanto riguarda i valori dei livelli di servizio valgono le considerazioni generali espresse per lo scenario 1.

7. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi fornisce un modello di ottimizzazione che utilizza la programmazione lineare intera per determinare il dimensionamento ottimo delle stazioni per il Battery Swap in termini di quantità di batterie e caricatori da allocare. Il contesto di applicazione costituisce una grande novità nell'ambito di ricerca in questione, poiché si riferisce all'uso di autoarticolati elettrici nello svolgimento delle proprie attività logistiche lungo una rete autostradale. Tale contesto non solo è rilevante per quanto riguarda l'evoluzione dei trasporti in termini di sostenibilità, aspetto nel quale i mezzi pesanti si trovano in grande ritardo tecnologico e commerciale rispetto alle automobili, ma anche per le notevoli differenze che lo distinguono dai contesti applicativi comunemente indagati in questo ambito di ricerca, come flotte di taxi o di car sharing elettrici o il semplice uso privato di vetture in un contesto urbano.

Lo scopo principale del lavoro non è fornire una dettagliata analisi di fattibilità economica o tecnologica, ma presentare un'analisi completa riguardante il dimensionamento ottimo delle BSS e gli effetti che le variazioni dei dati di input e la variabilità hanno su quest'ultimo. Il modello presentato permette di risolvere il problema in modo semplice e senza l'ausilio di strumenti complessi e di fornire in output, oltre alle quantità ottime, i valori assunti in ogni momento da diverse variabili legate agli stati assunti dalle batterie e dai caricatori. In questo modo è possibile ricavare informazioni utili sull'evoluzione delle stazioni in ogni intervallo di tempo. A scopo sperimentale sono stati valutati due scenari, caratterizzati da potenze dei caricatori di 50 kW e 22 kW, con costi d'acquisto differenti e tempi di ricarica rispettivamente di 4 e 9 ore. Tutti i risultati forniti dall'ottimizzazione sono stati analizzati per capire le dinamiche che determinano la scelta ottima e comprendere le cause delle differenze riscontrate nelle varie BSS e nei due scenari. Un modello di simulazione, appositamente sviluppato tramite l'applicazione FlexSim, ha permesso di testare i risultati ottenuti nella fase di ottimizzazione, integrando alcuni elementi aggiuntivi che rendono la rappresentazione più realistica e che sono stati trascurati nel modello di programmazione lineare, poiché l'avrebbero reso troppo complesso e difficile da risolvere. Le simulazioni effettuate hanno validato ampiamente i risultati ottenuti nell'ottimizzazione e hanno confermato diverse ipotesi formulate nel corso del lavoro, ad esempio riguardanti l'effetto della distribuzione della domanda o dei tempi di ricarica. In seguito, è stata valuta la robustezza dei valori ottimi, riducendo gradualmente in numero di batterie allocate in ogni BSS, ottenendo risultati in linea con le aspettative. Nel complesso la soluzione tecnologica relativa allo scenario 1 è da ritenersi preferibile tra le due opzioni, sia per quanto riguarda i risultati in termini economici che per una maggior capacità di rispondere agli effetti della variabilità.

Ulteriori sviluppi potrebbero essere apportati al presente lavoro, ad esempio, rendendo più complessa la rete su cui operano le stazioni di Battery Swap o inserendo all'interno del modello di ottimizzazione la possibilità di associare ad ogni batteria lo stato di carica percentuale oppure integrando al modello di gestione delle BSS un modello che gestisca i flussi dei veicoli lungo le tratte considerate, in modo da non utilizzare flussi medi, ma flussi che si evolvono nel tempo, così come avviene già per le attività nelle varie stazioni.

In conclusione, la tecnologia Battery Swap si pone come una buona alternativa alle soluzioni attualmente in commercio per quanto riguarda le autovetture, ma presenta dei vantaggi ben più rilevanti nell'applicazione ai mezzi pesanti di lunga percorrenza, permettendo di superare i maggiori ostacoli che fino ad ora ne hanno rallentato il progresso verso nuove forme di propulsione più sostenibile. Sicuramente un'analisi economica più approfondita in uno stesso contesto applicativo può delineare meglio le differenze di costi tra questa soluzione e la tecnologia di ricarica tramite colonnine,

dato che sia per il Battery Swap che per i camion elettrici non sono ancora disponibili informazioni standard di mercato, non essendovi ancora una vera e propria diffusione. Ma l'ostacolo principale sembra essere legato alla standardizzazione delle batterie e dei vani che le ospitano, caratteristica imprescindibile per una diffusione su larga scala e aspetto che costituisce un limite considerevole per le case produttrici. È evidente che una soluzione come il Battery Swap offre diverse possibilità di operare, coinvolgendo un gran numero di attori e permettendo modelli di business differenti, e per tale motivo proprio questo fattore potrebbe essere di cruciale importanza per definire il futuro di tale tecnologia.

Appendice A - Risultati dell'ottimizzazione relativa allo scenario 1

Batterie scambiate

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	6	9
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	4	4	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	3	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3

Batterie cariche

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	24	18	12	9	15	18	18	18	24	27	27	27	30	24	18	12	6	6	9	9	9	15	18	18	12	12	9	6	6	12	15	15	15	21	24	24	24	24	18	12	6	6
Milano	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	18	14	10	6	10	13	13	13	17	20	20	20	22	18	12	8	4	4	7	7	7	11	14	14	10	10	9	5	5	9	12	12	12	16	19	19	19	18	12	8	4
Bologna	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	74	56	34	18	21	33	55	70	80	89	89	89	89	83	74	68	62	60	54	42	28	16	12	26	35	29	19	18	21	33	52	70	80	89	89	89	89	83	74	68	62	60	54	42	28	16	12	26	35	29	19	18	21	33	52	70	80	89	89	89	89	83
Pescara	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	36	33	33	33	36	39	39	39	39	39	39	39	39	36	33	30	30	33	36	39	33	24	18	15	15	20	20	20	26	34	34	34	39	33	24	15	9	6	8	5	5	11	19	19	13	10	12	9	3	6	14	14	14	20	28	28	28	28	24	15	9	6
Roma	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	35	27	19	11	13	21	21	21	26	34	34	34	39	35	27	16	8	5	10	10	10	15	23	23	18	15	15	7	4	9	17	17	17	22	30	30	30	30	27	16	8	5
Salerno	28	28	28	28	28	28	28	28	28	24	20	14	8	8	8	14	18	20	22	28	28	28	24	20	16	12	10	12	14	14	14	12	10	8	8	6	2	4	6	10	12	16	20	24	26	28	24	20	16	12	10	12	14	14	14	12	10	8	8	6	2	4	6	10	12	16	20	24	26	28	24	20
R. Calabria	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	16	12	8	4	8	10	10	10	14	16	16	16	20	16	12	8	4	4	6	6	6	10	12	12	8	8	6	2	2	6	8	8	8	12	14	14	14	14	12	8	4	4
Taranto	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	6	6	6	9	12	12	12	12	12	12	12	12	9	6	3	3	6	9	9	6	6	6	6	6	6	6	6	9	12	12	12	12	9	6	3	3	3	3	0	0	3	6	6	3	3	6	6	3	3	6	6	9	12	12	12	9	6	3	3	3

Batterie messe in carica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	3	0	0	0	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	6	0	0	0	0	6	3	0	0	6
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	2	0	0	0	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	3	0	0	0	0	4	3	0	0
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	16	22	15	10	9	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	12	18	21	12	12	18	10	16	19	18	10	9	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	12	18	21	12	12	18	10	16	19	18	10	9	0	0	0	0	0	0	0	4
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	5	0	0	0	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	6	5	0	0	6	8	0	0	6
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	1	0	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	5	0	0	5	8	0	0	5
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	4	2	2	6	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	2	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	4	4	4	2	4	4	4	2	4	4	4	2	2	0	0	0	0	2	2
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	0	0	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3

Batterie in attesa di ricarica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	9	12	12	6	3	3	3	0	0	0	0	6	6	9	15	21	15	12	12	12	6	3	9	15	15	15	15	15	9	6	6	6	0	0	0	6	6	9	15	21
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	5	9	9	5	2	2	2	0	0	0	0	4	6	7	11	15	11	8	8	8	4	1	5	9	9	10	10	10	6	3	3	3	0	0	0	4	6	7	11
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	16	22	19	13	9	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	12	18	21	18	24	18	10	16	22	22	13	9	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	12	18	21	18	24	18	10	16	22	22	13	9	0	0	0	0	0	0	0	4
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	9	7	10	16	13	5	5	5	0	0	0	0	0	6	9	10	16	25	25	20	20	20	14	6	12	21	21	16	22	25	19	11	11	11	5	0	0	6	9	10	16	25
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	8	16	19	14	6	6	6	1	0	0	0	5	8	11	19	27	25	17	17	17	12	4	9	17	20	20	23	23	18	10	10	10	5	0	0	5	8	11	19	27
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	6	6	8	6	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	4	4	4	4	8	6	8	10	12	12	8	4	2	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	4	4	4	4	8	6	8	10	12	12	8	4	2	0	0	0	0	2	2
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	10	10	6	4	4	4	0	0	0	0	4	4	6	10	14	10	8	8	8	4	2	6	10	10	12	12	12	8	6	6	6	2	0	0	4	4	6	10	14
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	6	6	6	6	3	0	3	6	3	0	3	6	3	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	6

Caricatori liberi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	3	0	0	6	3	0	0	6	6	6	6	9	9	3	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	6	3	0	0	6	3	3	3	9	3	0	0	6
Milano	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	3	0	0	4	3	0	0	4	5	5	5	7	7	3	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	4	3	0	0	4	4	4	4	7	3	0	0
Bologna	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	60	50	34	15	10	16	29	44	54	63	63	63	63	63	59	53	49	49	51	43	29	12	12	18	21	23	19	18	10	16	26	44	54	63	63	63	63	63	59	53	49	49	51	43	29	12	12	18	21	23	19	18	10	16	26	44	54	63	63	63	63	63
Pescara	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	11	8	8	11	14	14	14	14	14	14	14	14	14	11	8	5	8	11	14	14	8	0	0	6	8	0	0	6	9	9	9	14	14	8	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	6	8	0	0	6	8	3	3	9	8	0	0	6
Roma	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	8	0	0	5	8	0	0	5	8	7	7	12	13	8	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	8	0	0	5	8	3	3	8	8	0	0	5
Salerno	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	12	10	4	2	2	6	4	6	8	14	14	14	14	12	10	8	8	8	10	12	10	6	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	6	10	12	14	14	12	10	8	8	8	10	12	10	6	2	4	4	4	2	4	4	4	2	4	6	10	12	14	14	12
R. Calabria	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	2	0	0	4	2	0	0	4	2	2	2	6	6	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4	2	0	0	4
Taranto	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	3	0	0	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	3	0	0	3	3	3	3	3	0	0	3	3	0	0	3	6	6	6	6	6	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	6	6	6	6	3	0	0	3

Domanda totale

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	6	9
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6	3	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	4	4	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3

Domanda inevasa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Batterie totali presenti nella stazione

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Milano	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Bologna	86	86	86	86	86	86	86	86	86	89	87	85	85	85	87	89	89	89	89	89	89	89	89	87	84	82	80	78	78	80	83	85	87	89	87	85	85	85	87	89	89	89	89	89	89	89	89	87	84	82	80	78	78	80	83	85	87	89	87	85	85	85	87	89	89	89	89	89	89	89	89	87
Pescara	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Roma	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Salerno	28	28	28	28	28	28	28	28	28	26	24	24	24	26	28	28	28	28	28	28	28	28	26	24	22	20	18	18	18	20	22	24	26	26	24	24	24	26	28	28	28	28	28	28	28	28	26	24	22	20	18	18	18	20	22	24	26	26	24	24	24	26	28	28	28	28	28	28	28	28	26	24
R. Calabria	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Taranto	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Appendice B - Risultati dell'ottimizzazione relativa allo scenario 2

Batterie scambiate

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	6	9	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	6	9
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	3

Batterie cariche

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	24	18	12	9	9	9	9	9	15	21	27	30	24	18	12	6	0	0	0	0	0	6	12	12	11	5	2	2	2	2	8	9	15	21	25	25	19	13	7	6	0
Milano	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	18	14	10	6	6	6	6	6	6	10	14	18	22	18	12	8	4	0	0	0	0	0	4	10	10	9	5	1	1	1	1	5	6	10	14	18	18	14	8	4	4
Bologna	161	161	161	161	161	161	161	161	161	149	131	109	90	83	79	79	79	82	92	108	130	149	144	135	129	123	120	118	103	85	69	57	59	51	37	19	12	23	38	38	42	48	52	56	60	72	84	94	88	86	86	78	66	52	48	50	59	51	37	19	8	5	5	17	35	48	52	56	60	68	66
Pescara	48	48	48	48	48	48	48	48	48	45	42	42	42	42	42	42	42	42	45	48	48	48	45	42	39	39	39	39	39	33	24	21	21	18	15	15	15	15	21	30	36	39	39	33	24	18	9	3	0	0	0	6	15	18	15	12	9	3	0	0	6	15	21	30	33	33	27	18	9	9	9
Roma	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	38	30	22	14	11	11	11	11	11	16	24	32	40	38	30	19	11	3	0	0	0	0	5	13	19	19	13	5	2	2	2	7	11	16	24	32	36	31	23	12	9	3
Salerno	44	44	44	44	44	44	44	44	44	40	36	30	24	22	20	20	20	20	22	24	30	36	36	32	28	24	20	22	24	22	20	20	20	16	14	10	4	2	4	8	12	14	16	18	20	20	16	16	16	16	14	16	18	18	16	14	16	14	14	10	4	2	4	6	6	10	14	18	20	20	16	16
R. Calabria	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	16	12	8	4	4	4	4	4	4	8	12	16	20	16	12	8	4	0	0	0	0	0	4	8	8	8	4	0	0	0	0	4	4	8	12	16	16	12	8	4	4	0
Taranto	18	18	18	18	18	18	18	18	18	15	12	12	12	12	12	12	12	15	18	18	18	18	15	12	9	9	9	9	9	6	3	6	9	9	6	6	6	6	9	9	12	12	12	12	9	9	6	3	0	0	0	3	6	6	3	6	6	3	0	0	3	6	9	9	12	12	9	6	3	6	6

Batterie messe in carica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	5	0	0	0	0	0	6	1	6	6	4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	6	6	6	5	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	4	1	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	4	6	3	4
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	16	22	19	1	0	0	0	3	10	1	0	0	4	6	4	4	4	12	18	19	0	4	6	4	4	4	12	18	19	0	4	6	4	4	4	12	18	13	4	4	4	8	4	4	12	18	13	4	4	4	8	4	4	12	18	13	4	4	4	8	4
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	3	0	0	0	0	6	9	0	0	0	0	6	9	3	6	9	0	0	0	0	6	9	3	6	9
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	2	0	0	0	0	5	4	5	8	8	4	0	0	0	5	2	0	0	0	0	5	8	11	8	2
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	6	4	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	2	2	2	0	0	4	4	4	2	2	2	2	0	0	4	4	4	2	2	2	2	0	0	4	4	4	2	0	0	4	4	2	0	4	4	4	2	0	0	4	2	0	4	4	4	2	0	0	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	4	0	4	4	4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	3	0	3	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	3

Batterie in attesa di ricarica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	7	7	7	7	7	1	6	6	6	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	6	6	6	6	7
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	5	5	5	5	5	5	1	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	4	6	4	5
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	16	22	19	9	14	14	14	14	11	1	0	0	4	6	4	4	4	12	18	21	20	38	40	44	56	74	89	86	74	55	55	51	45	41	37	33	25	13	4	4	4	12	22	39	53	59	47	44	56	74	89	90	92	88	76	58	45	41	37	33	29
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	12	15	15	15	15	9	6	9	6	6	12	15	15	15	9	0	0	0	0	6	9	9	12	15
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	9	9	9	9	4	5	8	8	8	7	7	7	7	2	0	0	0	0	5	8	11	8	8
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	6	4	4	4	4	4	4	2	0	0	2	0	4	2	2	0	0	4	4	4	4	8	8	12	16	20	24	20	16	12	10	8	6	4	6	8	6	4	2	0	0	4	4	6	10	12	10	12	16	20	24	20	18	18	14	10	6	4	6	8
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	0	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	6	6	6	3	0	3	3	3	0	3	6	6	3	3	3	3	0	3	3	3	6	6	3	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3

Caricatori liberi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	17	11	5	2	2	2	2	2	8	14	20	23	23	17	11	5	0	0	0	0	6	6	11	10	4	0	0	0	0	6	2	8	14	18	18	18	12	6	5	0
Milano	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	13	9	5	1	1	1	1	1	5	9	13	17	17	13	7	3	0	0	0	0	0	4	6	9	8	4	0	0	0	0	4	1	5	9	13	13	13	9	3	4
Bologna	71	71	71	71	71	71	71	71	71	68	58	42	20	1	0	0	0	3	10	16	37	56	57	53	47	43	42	48	37	19	0	4	6	4	4	4	12	18	19	0	4	6	4	4	4	12	18	19	6	6	8	8	4	4	12	18	13	4	4	4	8	4	4	12	18	13	4	4	4	8	4
Pescara	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	30	27	27	27	27	27	27	27	30	33	33	33	33	30	27	24	24	24	24	24	18	12	9	9	3	0	0	0	6	15	21	24	30	27	18	9	3	0	0	0	0	6	9	9	9	3	0	0	0	0	6	9	6	15	18	18	18	12	3	6	9
Roma	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	29	21	13	5	2	2	2	2	7	15	23	31	34	29	21	10	2	0	0	0	0	5	8	15	18	12	4	0	0	0	0	5	4	7	15	23	27	27	22	14	8	2
Salerno	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	16	10	4	0	0	0	0	2	2	6	12	16	14	12	10	8	8	10	10	6	4	2	2	2	2	0	0	4	4	4	2	2	2	2	0	0	4	4	4	4	2	0	0	4	2	0	4	4	4	2	0	0	4	2	0	4	4	4	2	0	0	4
R. Calabria	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	12	8	4	0	0	0	0	0	4	8	12	16	16	12	8	4	0	0	0	0	4	4	8	8	4	0	0	0	0	4	0	4	8	12	12	12	8	4	4	0
Taranto	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	6	6	6	6	6	6	6	9	12	12	12	12	9	6	3	3	3	3	3	3	0	3	3	6	3	0	0	0	3	3	6	6	9	9	6	3	3	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3	3	0	0	0	0	3	3	3	6	6	6	3	0	3	3

Domanda totale

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3

	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Torino	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0
Milano	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
Bologna	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9
Pescara	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
Roma	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
Salerno	4	4	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
Taranto	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3

	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	6	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0
Milano	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	4	4	4
Bologna	6	6	6	12	16	18	16	16	4	12	18	22	19	7	4	0	0	0	0	0	0	0	6	9
Pescara	3	0	0	0	0	6	9	6	3	6	3	0	0	0	0	0	0	0	6	9	9	6	9	6
Roma	0	0	0	0	0	5	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	11	8	8	3
Salerno	4	4	0	0	2	2	2	2	6	4	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
R. Calabria	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0
Taranto	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	3	3

Domanda inevasa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Milano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pescara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salerno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R. Calabria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taranto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Batterie totali presenti nella stazione

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Torino	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Milano	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Bologna	161	161	161	161	161	161	161	161	161	164	162	160	160	160	162	164	164	164	164	164	164	164	164	162
Pescara	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Roma	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Salerno	44	44	44	44	44	44	44	44	44	42	40	40	40	42	44	44	44	44	44	44	44	44	42	40
R. Calabria	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Taranto	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Torino	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Milano	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Bologna	159	157	155	153	153	155	158	160	162	164	162	160	160	160	162	164	164	164	164	164	164	164	164	162
Pescara	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Roma	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Salerno	38	36	34	34	34	36	38	40	42	42	40	40	40	42	44	44	44	44	44	44	44	44	42	40
R. Calabria	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Taranto	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Torino	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Milano	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Bologna	159	157	155	153	153	155	158	160	162	164	162	160	160	160	162	164	164	164	164	164	164	164	164	162
Pescara	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Roma	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Salerno	38	36	34	34	34	36	38	40	42	42	40	40	40	42	44	44	44	44	44	44	44	44	42	40
R. Calabria	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Taranto	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

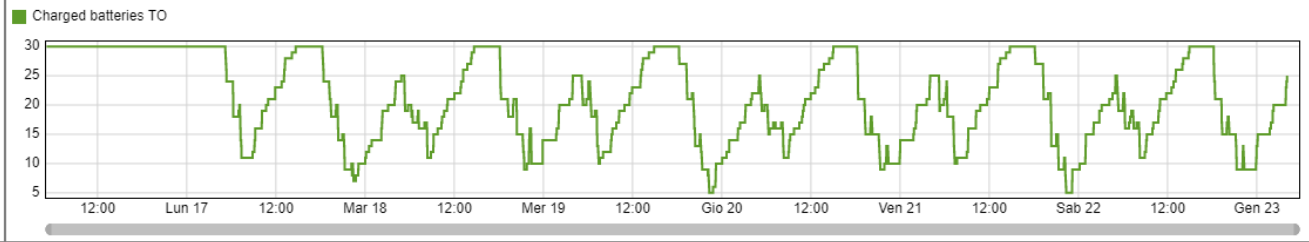
Appendice C - Risultati di una simulazione relativa allo scenario 1

Stazione di Torino

Charged batteries TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	Content	25	5	30	19.43

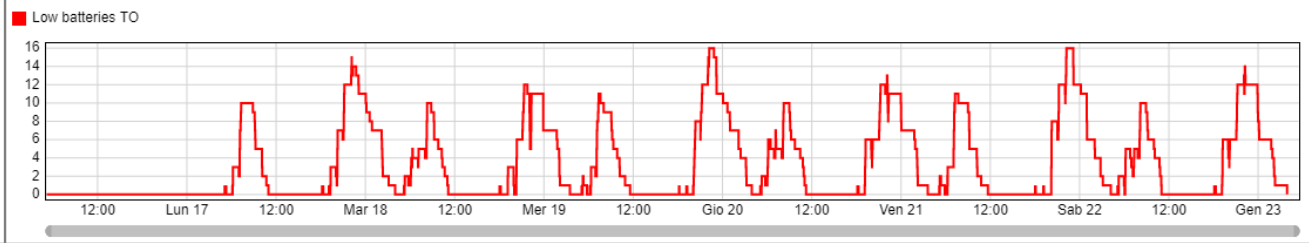
Charged batteries TO vs Time



Low batteries TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~3	ProcessFlow	Content	0	0	16	3.83

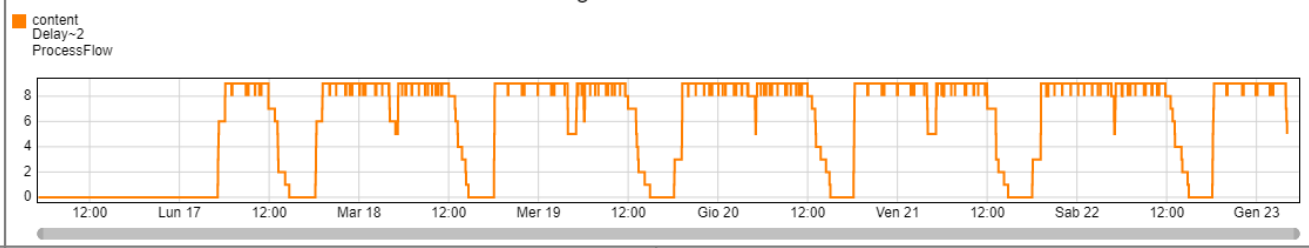
Low batteries TO vs Time



On charge batteries TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~2	ProcessFlow	Content	5	0	9	6.91

On charge batteries TO vs Time



Total back orders TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders TO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

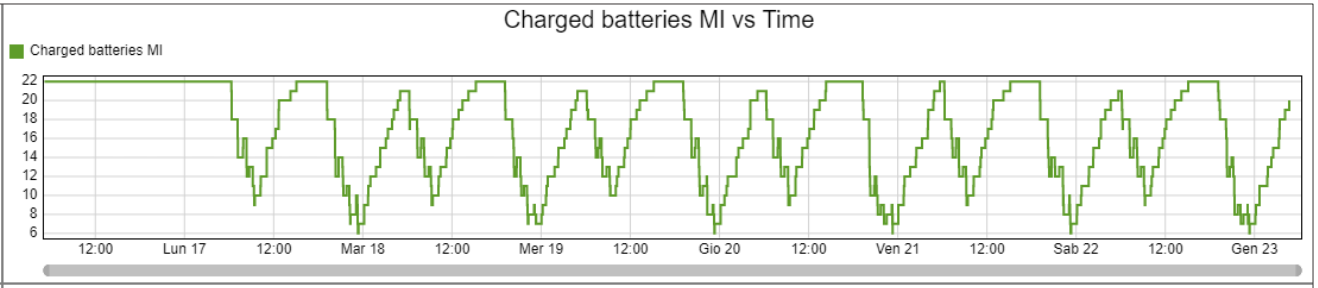
Staytime for back orders TO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Milano

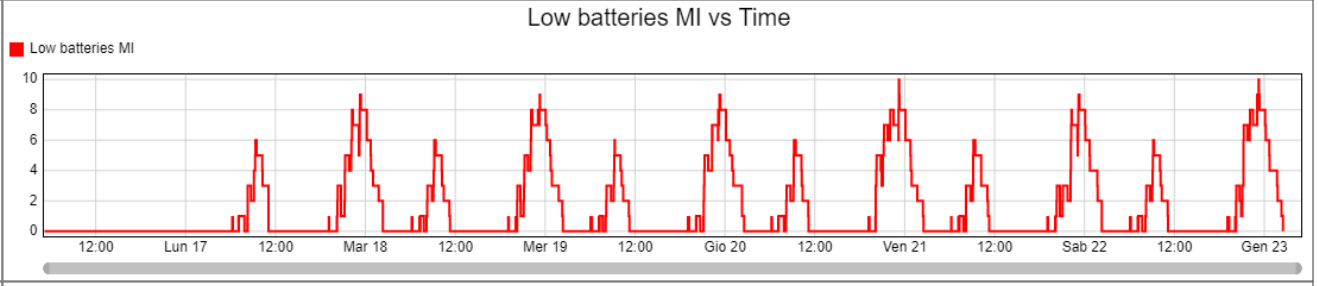
Charged batteries MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	Content	20	5	22	15.86



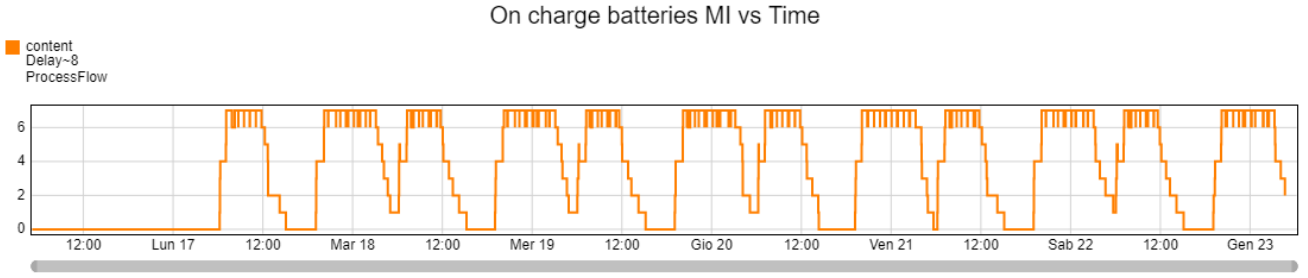
Low batteries MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~9	ProcessFlow	Content	0	0	10	1.74



On charge batteries MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~8	ProcessFlow	Content	2	0	7	4.46



Total back orders MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders MI

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders MI

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Bologna

Charged batteries BO

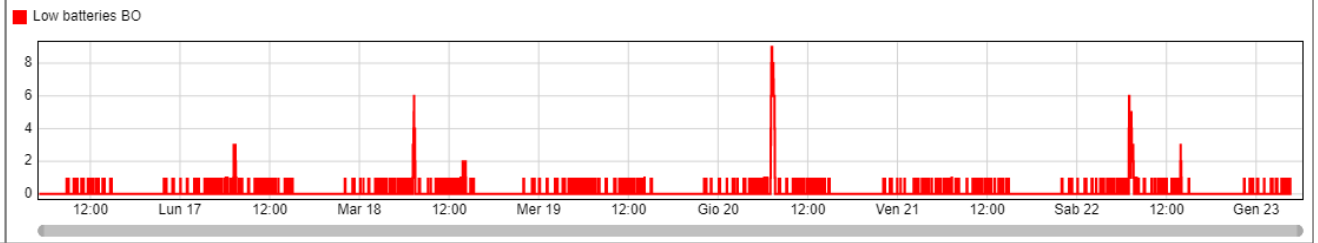
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	Content	38	12	86	54.61

Charged batteries BO vs Time

Low batteries BO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~2	ProcessFlow	Content	0	0	9	0.06

Low batteries BO vs Time



On charge batteries BO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay	ProcessFlow	Content	39	0	63	28.07

On charge batteries BO vs Time

Total back orders BO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders BO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders BO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Charged batteries PE

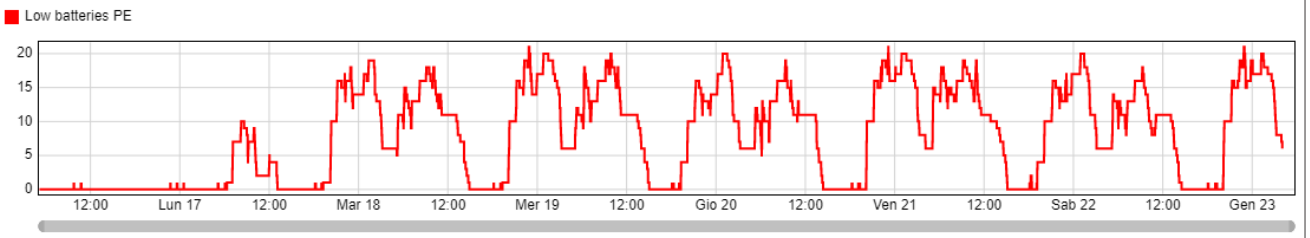
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	Content	19	4	39	19.39

Charged batteries PE vs Time

Low batteries PE

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~7	ProcessFlow	Content	6	0	21	9.33

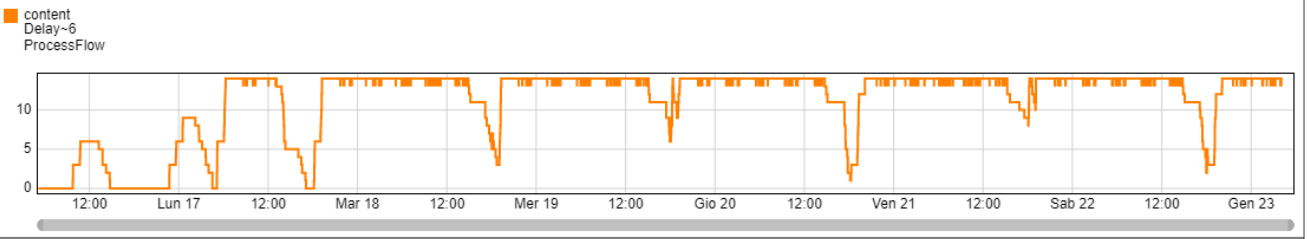
Low batteries PE vs Time



On charge batteries PE

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~6	ProcessFlow	Content	14	0	14	11.66

On charge batteries PE vs Time



Total back orders PE

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders PE

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders PE

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Roma

Charged batteries RO

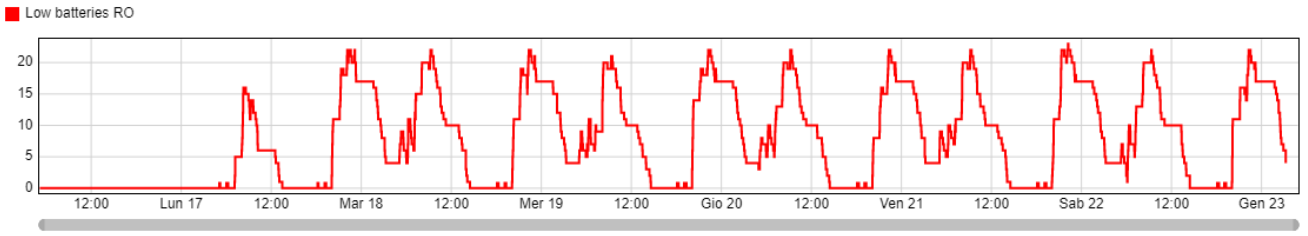
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	Content	23	5	40	19.60

Charged batteries RO vs Time

Low batteries RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~4	ProcessFlow	Content	4	0	23	8.96

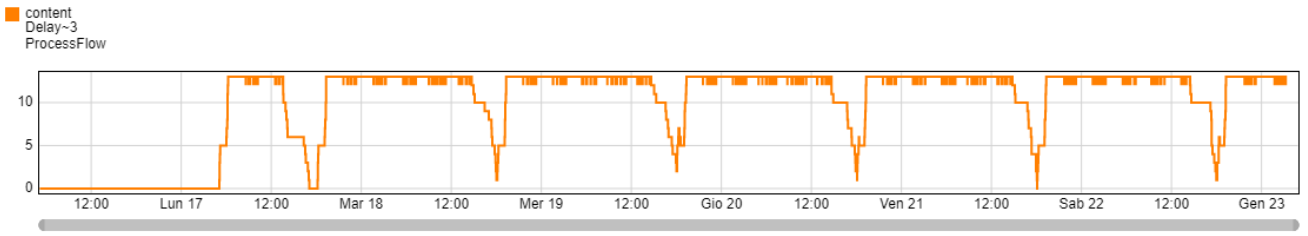
Low batteries RO vs Time



On charge batteries RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~3	ProcessFlow	Content	13	0	13	11.75

On charge batteries RO vs Time



Total back orders RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders RO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders RO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Salerno

Charged batteries SA

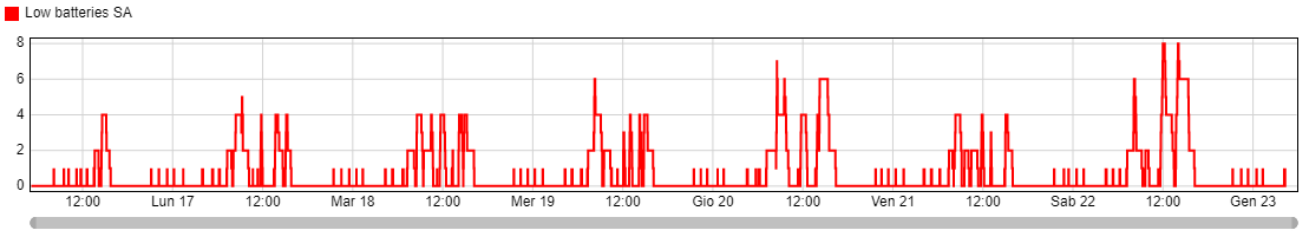
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	Content	14	2	28	14.86

Charged batteries SA vs Time

Low batteries SA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~5	ProcessFlow	Content	0	0	8	0.67

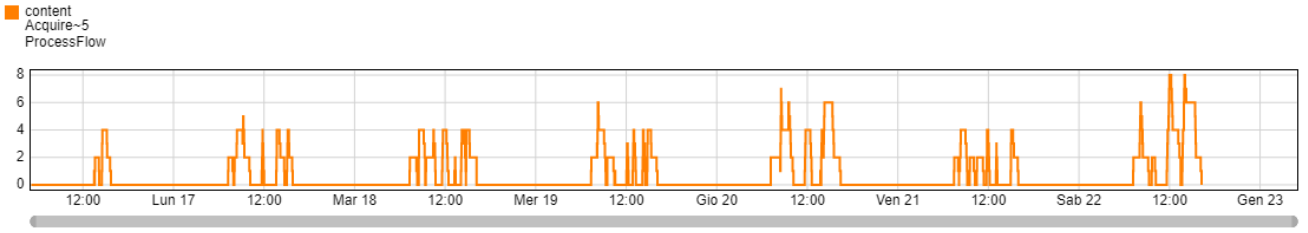
Low batteries SA vs Time



On charge batteries SA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~4	ProcessFlow	Content	6	0	14	8.65

On charge batteries SA vs Time



Total back orders SA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders SA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders SA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Charged batteries RC

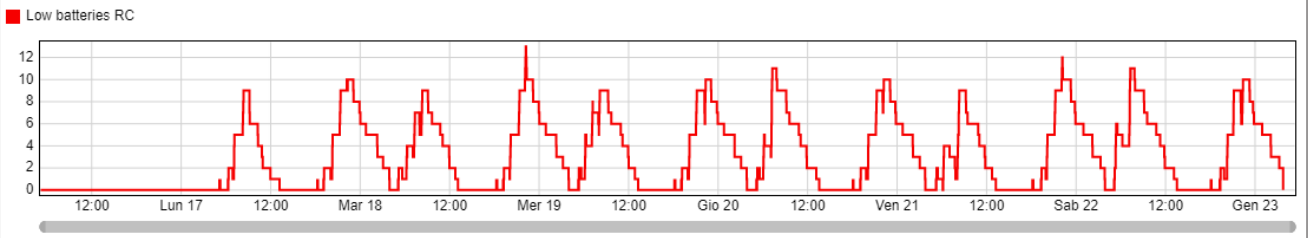
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	Content	16	2	20	11.50

Charged batteries RC vs Time

Low batteries RC

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~6	ProcessFlow	Content	0	0	13	3.58

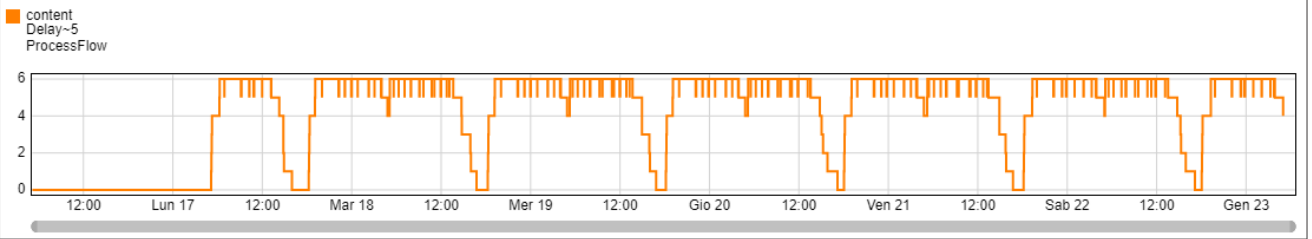
Low batteries RC vs Time



On charge batteries RC

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~5	ProcessFlow	Content	4	0	6	5.09

Back orders vs Time



Total back orders RC

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders RC

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

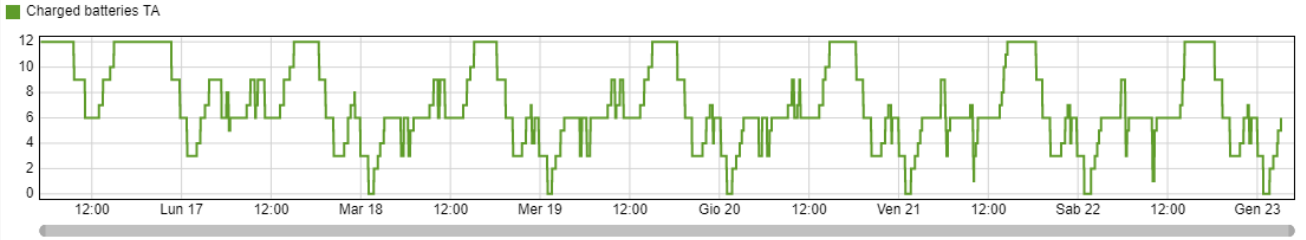
Staytime for back orders RC

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Charged batteries TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	Content	6	0	12	6.78

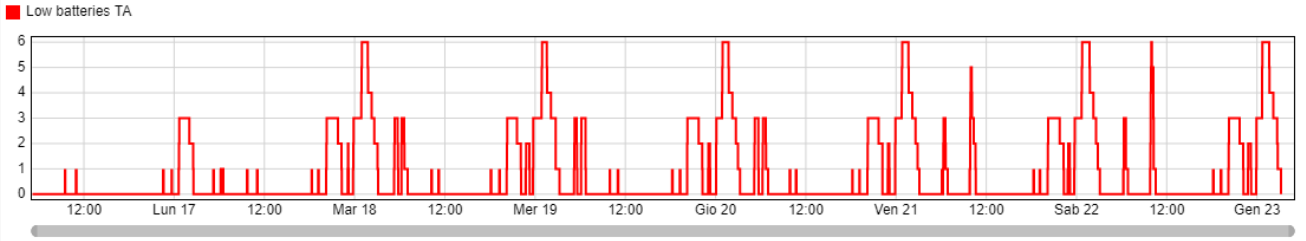
Charged batteries TA vs Time



Low batteries TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~8	ProcessFlow	Content	0	0	6	0.88

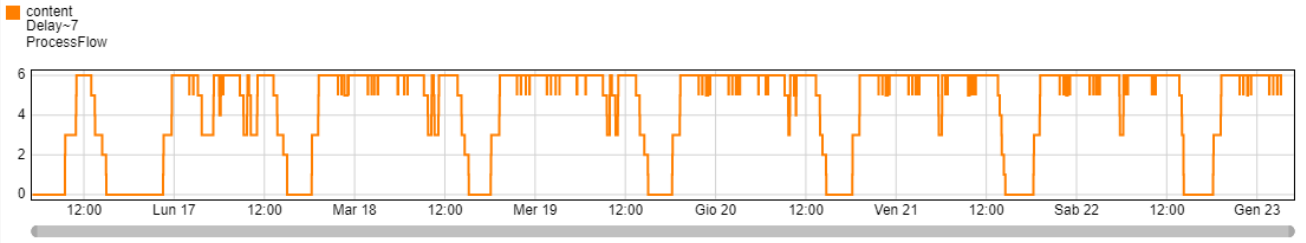
Low batteries TA vs Time



On charge batteries TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~7	ProcessFlow	Content	6	0	6	4.50

On charge batteries TA vs Time



Total back orders TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders TA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders TA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

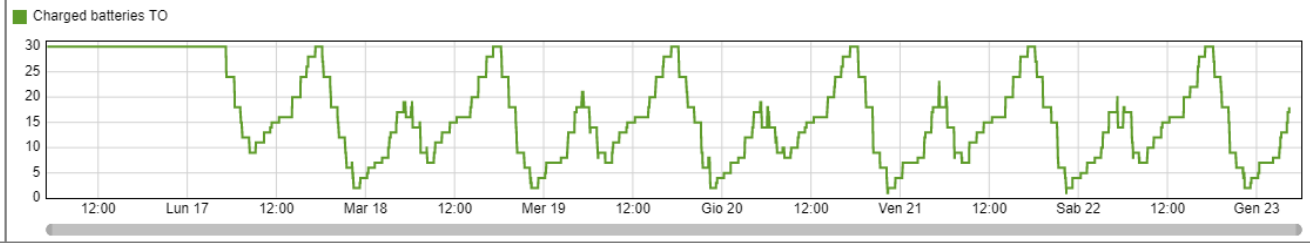
Appendice D - Risultati di una simulazione relativa allo scenario 2

Stazione di Torino

Charged batteries TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	Content	18	0	30	14.20

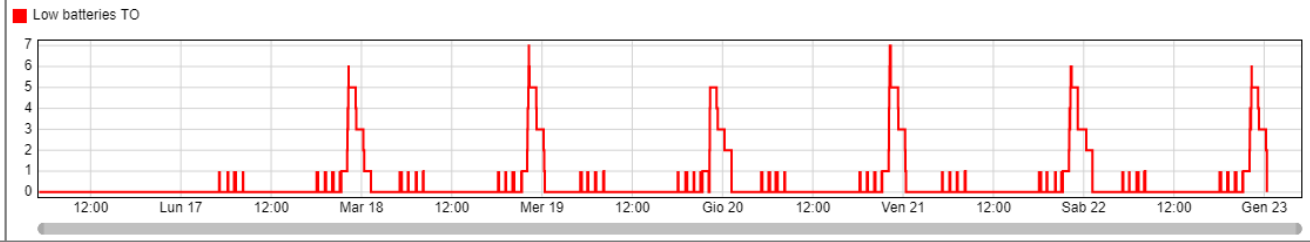
Charged batteries TO vs Time



Low batteries TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~3	ProcessFlow	Content	0	0	7	0.49

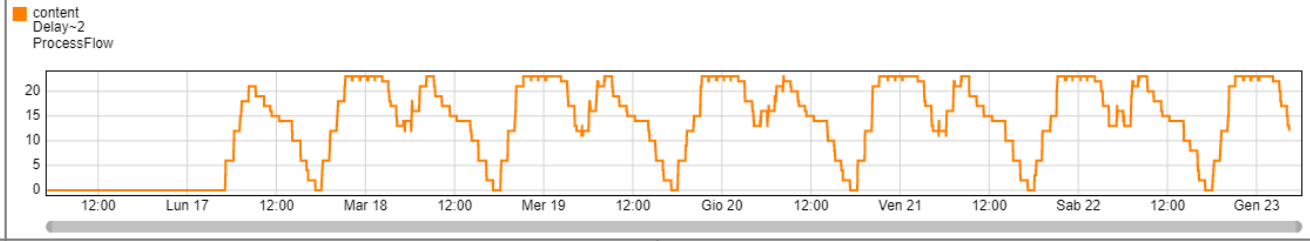
Low batteries TO vs Time



On charge batteries TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~2	ProcessFlow	Content	12	0	23	15.51

On charge batteries TO vs Time



Total back orders TO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders TO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders TO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TO	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Milano

Charged batteries MI

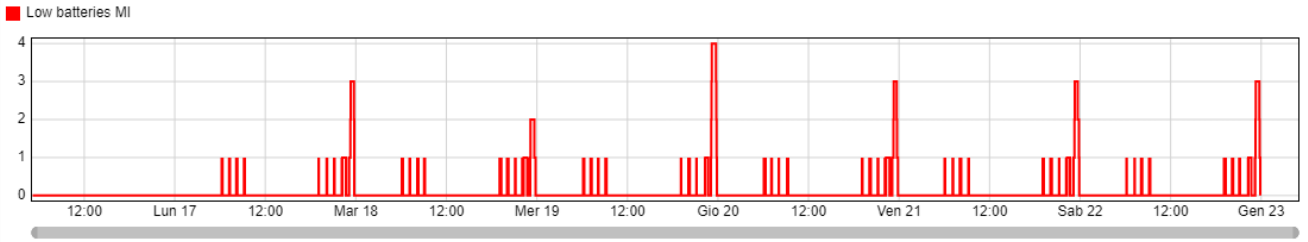
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	Content	13	1	22	12.00

Charged batteries MI vs Time

Low batteries MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~9	ProcessFlow	Content	0	0	4	0.10

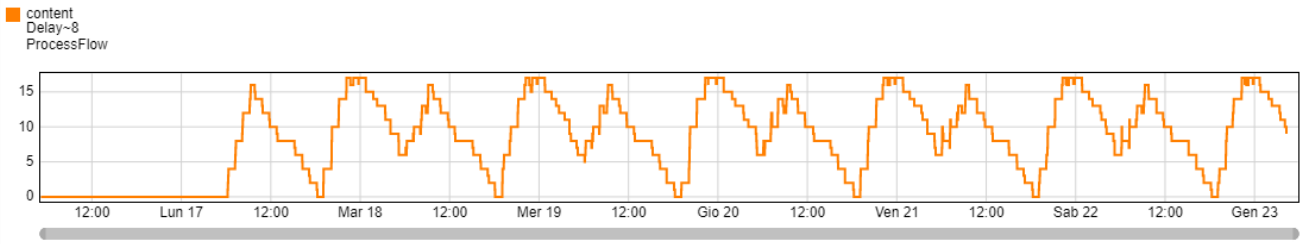
Low batteries MI vs Time



On charge batteries MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~8	ProcessFlow	Content	9	0	17	9.96

On charge batteries MI vs Time



Total back orders MI

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders MI

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders MI

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries MI	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Bologna

Charged batteries BO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	Content	83	32	161	77.90

Charged batteries BO vs Time

Low batteries BO

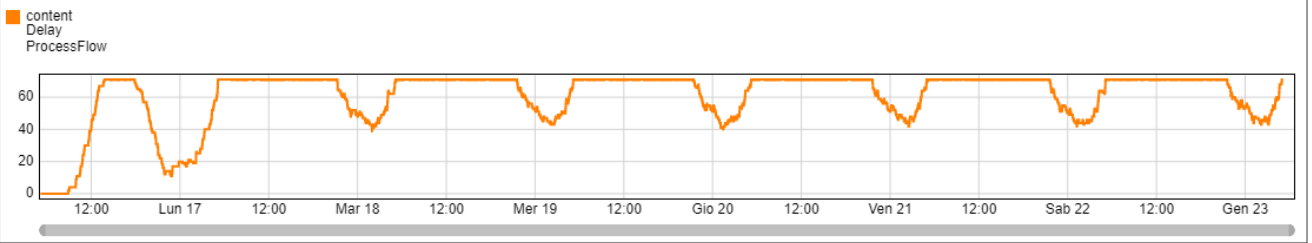
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~2	ProcessFlow	Content	0	0	57	18.10

Low batteries BO vs Time

On charge batteries BO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay	ProcessFlow	Content	70	0	71	62.29

On charge batteries BO vs Time



Total back orders BO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders BO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders BO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries BO	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Charged batteries PE

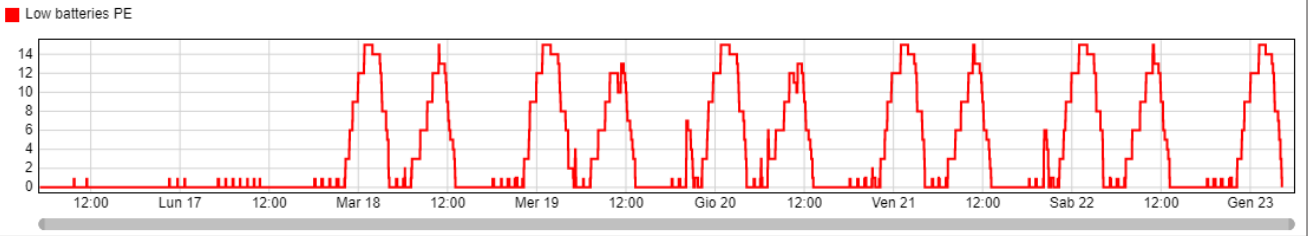
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	Content	17	0	48	18.29

Charged batteries PE vs Time

Low batteries PE

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~7	ProcessFlow	Content	0	0	15	4.88

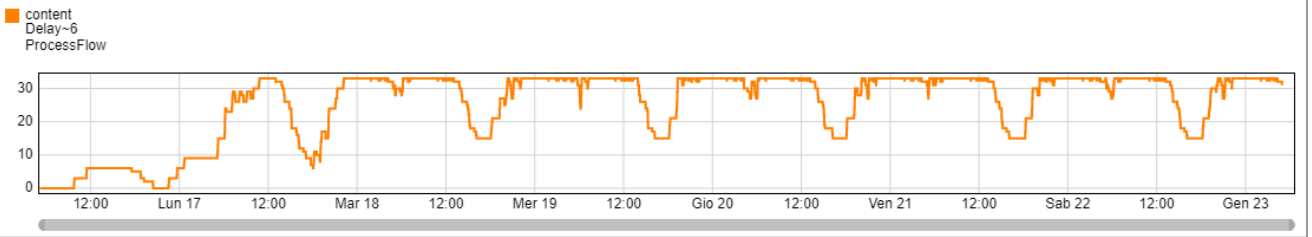
Low batteries PE vs Time



On charge batteries PE

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~6	ProcessFlow	Content	31	0	33	26.12

On charge batteries PE vs Time



Total back orders PE

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders PE

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders PE

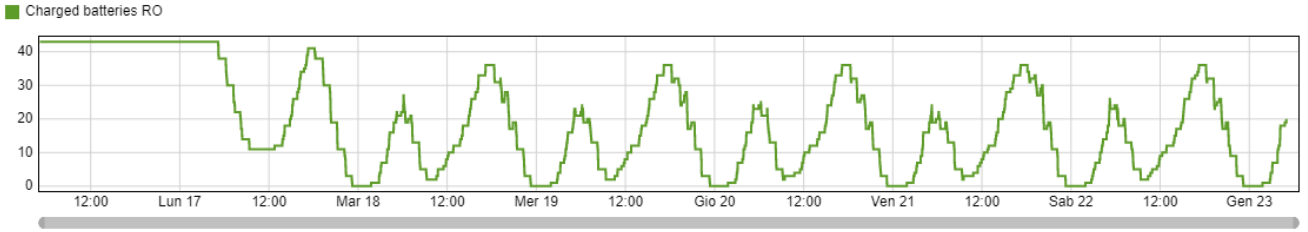
Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries PE	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Roma

Charged batteries RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	Content	20	0	43	14.35

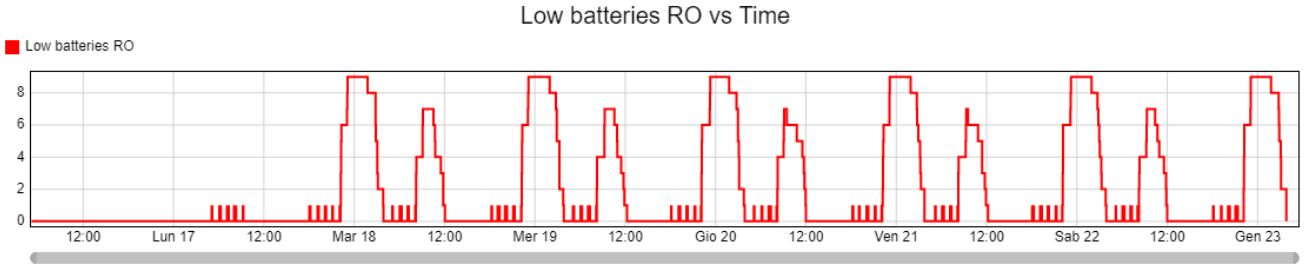
Charged batteries RO vs Time



Low batteries RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~4	ProcessFlow	Content	0	0	9	2.68

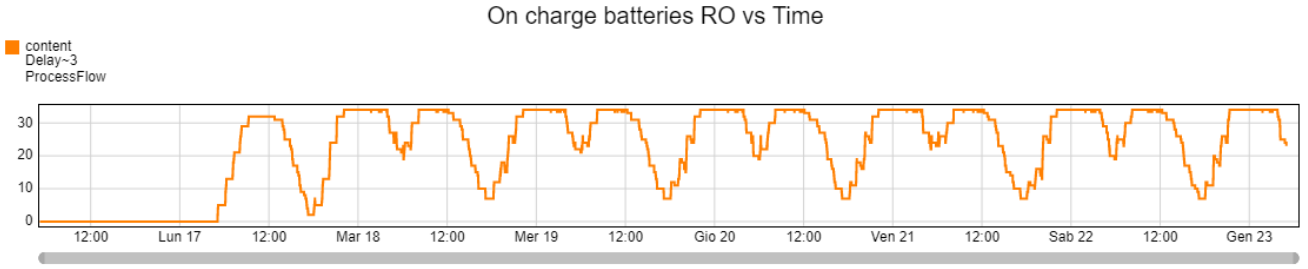
Low batteries RO vs Time



On charge batteries RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~3	ProcessFlow	Content	23	0	34	26.46

On charge batteries RO vs Time



Total back orders RO

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders RO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders RO

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RO	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Salerno

Charged batteries SA

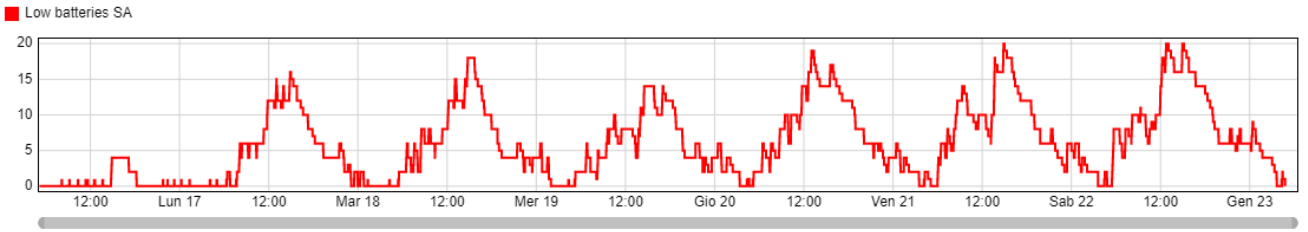
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	Content	16	2	44	14.98

Charged batteries SA vs Time

Low batteries SA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~5	ProcessFlow	Content	0	0	20	6.33

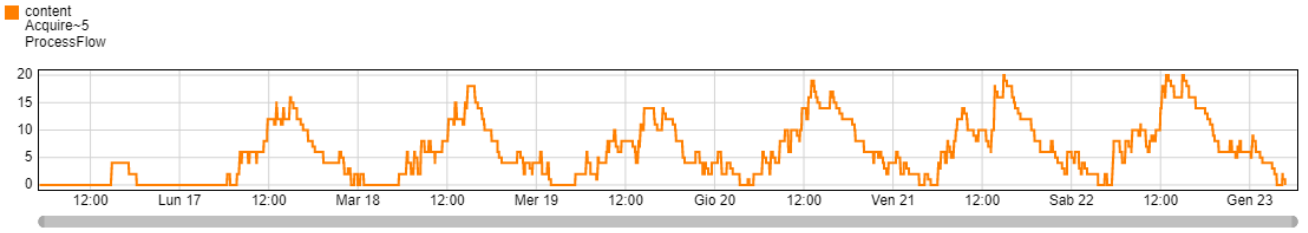
Low batteries SA vs Time



On charge batteries SA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~4	ProcessFlow	Content	20	0	20	18.99

On charge batteries SA vs Time



Total back orders SA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders SA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders SA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries SA	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Stazione di Reggio Calabria

Charged batteries RC

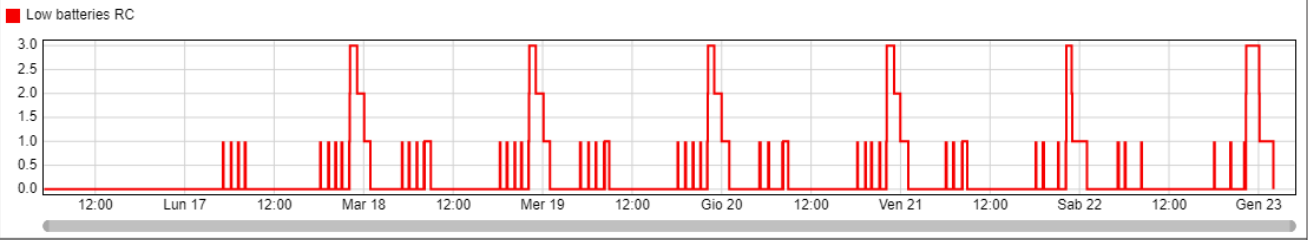
Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	Content	7	1	20	8.47

Charged batteries RC vs Time

Low batteries RC

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~6	ProcessFlow	Content	0	0	3	0.29

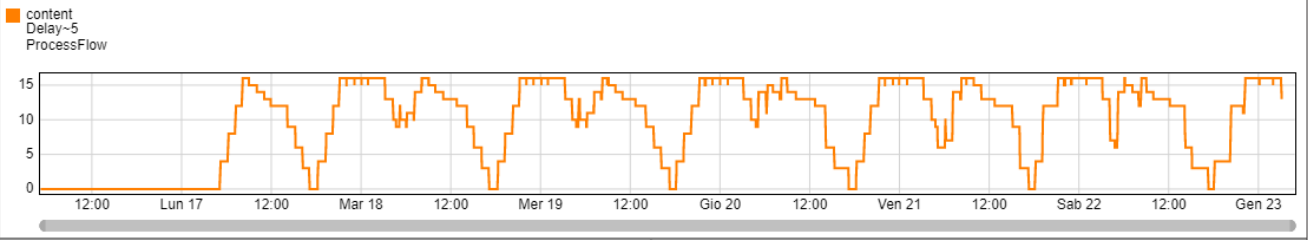
Low batteries RC vs Time



On charge batteries RC

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~5	ProcessFlow	Content	13	0	16	11.42

Back orders vs Time



Total back orders RC

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders RC

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

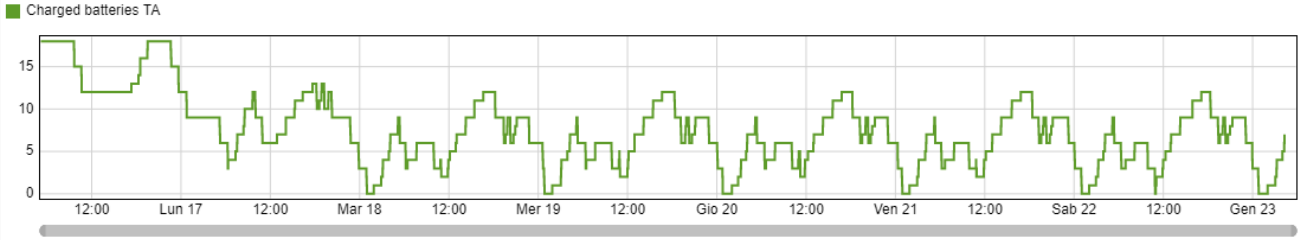
Staytime for back orders RC

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries RC	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Charged batteries TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	Content	7	0	18	7.13

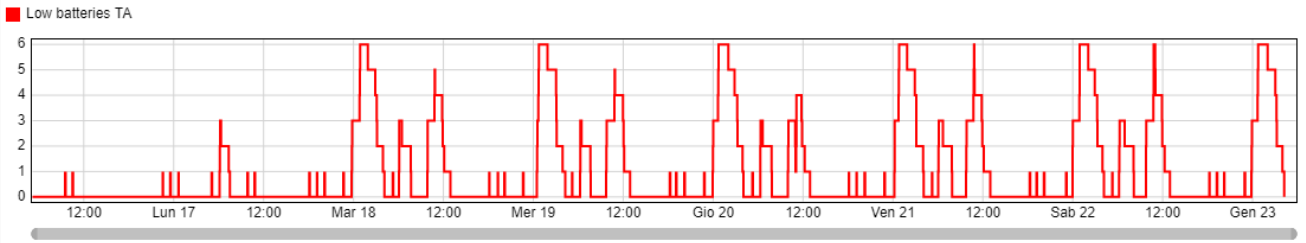
Charged batteries TA vs Time



Low batteries TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Acquire~8	ProcessFlow	Content	0	0	6	1.16

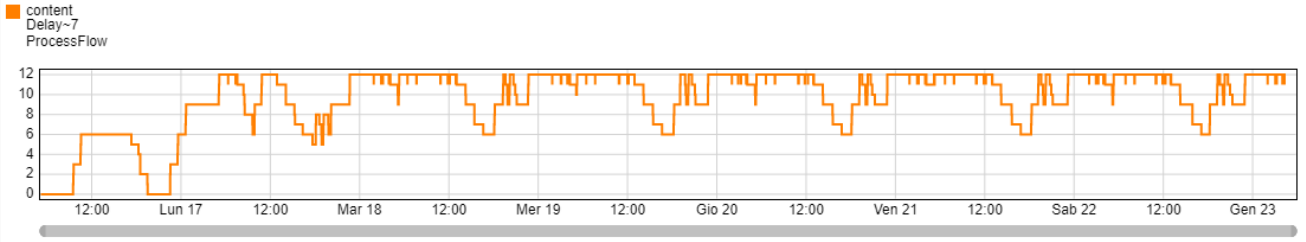
Low batteries TA vs Time



On charge batteries TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Delay~7	ProcessFlow	Content	11	0	12	9.93

On charge batteries TA vs Time



Total back orders TA

Activity	Instance	Statistic	Current	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	BackOrderInput	0	0	0	0

Average back orders TA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	BackOrderContent	0	0	0

Staytime for back orders TA

Activity	Instance	Statistic	Minimum	Maximum	Average
Charged batteries TA	ProcessFlow	BackOrderStaytime	0	0	0

Bibliografia

[1] Y. Feng and X. Lu, “Construction planning and operation of Battery Swapping stations for electric vehicles: A literature review,” *Energies*, vol. 14, no. 24. MDPI, Dec. 01, 2021.

[2] J. J. Jamian, M. W. Mustafa, H. Mokhlis, and M. A. Baharudin, “Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 592–601, 2014.

[3] J. Yang, F. Guo, and M. Zhang, “Optimal planning of swapping/charging station network with customer satisfaction,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 103, pp. 174–197, Jul. 2017.

[4] M. der Lin, P. Y. Liu, M. der Yang, and Y. H. Lin, “Optimized allocation of scooter Battery Swapping station under demand uncertainty,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, Aug. 2021.

[5] X. Zhang, L. Peng, Y. Cao, S. Liu, H. Zhou, and K. Huang, “Towards holistic charging management for urban electric taxi via a hybrid deployment of battery charging and swap stations,” *Renewable Energy*, vol. 155, pp. 703–716, Aug. 2020.

[6] Q. Kang, J. Wang, M. Zhou, and A. C. Ammari, “Centralized Charging Strategy and Scheduling Algorithm for Electric Vehicles under a Battery Swapping Scenario,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 659–669, Mar. 2016.

[7] Y. Wang, Y. Yang, N. Zhang, and M. Huang, “An Integrated Optimization Model of Charging Station/Battery-Swap Station/Energy Storage System Considering Uncertainty,” in *Proceedings - 1st IEEE International Conference on Energy Internet, ICEI 2017*, May 2017, pp. 77–82.

[8] L. Wang, S. Chen, and M. Pedram, “Optimal Joint Management of Charging and Battery Swapping Services for Electric Vehicles,” in *IEEE Green Technologies Conference*, May 2017, pp. 328–333.

[9] L. Zhang, S. Lou, Y. Wu, L. Yi, and B. Hu, “Optimal scheduling of electric vehicle Battery Swap station based on time-of-use pricing,” in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, Mar. 2014, vol. 2015-March, no. March.

[10] O. Worley and D. Klabjan, “Optimization of battery charging and purchasing at electric vehicle Battery Swap stations,” 2011.

[11] L. Xinyi, L. Nian, H. Yangqi, Z. Jianhua, and Z. Nan, “Optimal Configuration of EV Battery Swapping Station Considering Service Availability.”

[12] N. Liu, X. Lin, Q. Chen, F. Zou, and Z. Chen, “Optimal Configuration for Batteries and Chargers in Battery Switch Station Considering Extra Waiting Time of Electric Vehicles,” *Journal of Energy Engineering*, vol. 143, no. 1, p. 04016035, Feb. 2017

[13] BloombergNEF and C. McKerracher, “BNEF’s Electric Vehicle Outlook 2021,” 2021.

[14] M. Nicholas, “Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas,” 2019.

[15] J. Levy, I. Riu, and C. Zoi, “The Costs of EV Fast Charging Infrastructure and Economic Benefits to Rapid Scale-Up Executive Summary,” 2020.

[16] Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori, “AISCAT Informazioni - Edizione semestrale 3-4/2019,” Roma, Jun. 2020.

[17] R. Tadei, F. Della Croce, “Elementi di Ricerca Operativa”, Esculapio, 2° edizione, 2010

Sitografia

1. Parlamento Europeo:
   https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20191129STO67756/emissioni-di-aerei-e-navi-dati-e-cifre-infografica
2. Parlamento Europeo:
   https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infograficaù
3. Our World in Data:
   https://ourworldindata.org/emissions-by-sector
4. GTCN:
   https://news.cgtn.com/news/2020-08-16/EV-battery-swapping-finds-new-life-in-China-SWZQhFZoEE/index.html
5. Nio:
   https://www.nio.com/
6. Forbes:
   https://www.forbes.com/sites/stephenwunker/2013/05/28/288/?sh=2a05c28f5ed7
7. Geely:
   http://global.geely.com/
8. Batteries News
   https://batteriesnews.com/startup-ample-taxi-battery-swapping-service-electric-vehicles/
9. Gogoro:
   https://www.gogoro.com/
10. Volvo Trucks:
    https://www.volvotrucks.it/it-it/news/press-releases/2021/jun/technology-in-new-heavy-duty-electric-trucks.html
11. Mercedes-Benz Trucks:
    https://www.mercedes-benz-trucks.com/it_IT/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html
12. Nikola Motor:
    https://nikolamotor.com/tre-bev
13. Tesla:
    https://www.tesla.com/semi
14. HD Motori:
    https://www.hdmotori.it/mercedes-benz/articoli/n541873/mercedes-eeconic-camion-elettrico-test/
15. Il Giornale:
    https://motori.ilgiornale.it/iveco-nikola-primo-camion-elettrico-dalla-joint-venture/
16. Tom's Hardwer:
    https://www.tomshw.it/automotive/nikola-3-avviata-la-produzione-del-camion-elettrico-con-la-batteria-da-753-kwh/
17. Trasporto Europa:

https://www.trasportoeuropa.it/notizie/logistica-verde/il-camion-elettrico-di-tesla-e-pronto-a-partire/

18. Inside EVs:
https://insideevs.it/news/433117/camion-elettrici-europa-infrastrutture-ricarica/

19. BloombergNEF:
https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/

20. BloombergNEF:
https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/

21. EnelX:
https://www.enelx.com/it/it/?ecid=paid_search-Google-IT_Top_Brand_IT-annuncio-Brand_exact&gclid=CjwKCAjwoduRBhA4EiwACL5RP0iUAXV4bOjqN12XXVU24RHLpCPITUepb2pXy-5RUUuJTcBeb0hNGRoCQYEQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds

22. Wallbox:
https://wallbox.com/it_it/caricatori-elettrici-auto?gclid=CjwKCAjwlcaRBhBYEiwAK341jWnF67rXA8Pvh5X-Sj0rlGyNU1fQPiR-X25Ew28thgjS4WdVAAR47xoCDcsQAvD_BwE

23. EnelX Store:
https://www.enelxstore.com/it/it/prodotti/mobilita-elettrica/stazioni-ricarica/juice-box

24. MathWorks:
https://it.mathworks.com/products/matlab.html

25. FlexSim:
https://www.flexsim.com/