

# **POLITECNICO DI TORINO**

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

## **Analisi e Simulazione di sistemi di Dynamic Wireless Charging per veicoli elettrici industriali**



**RELATORE:**

**Prof. Giulia Bruno**

**Prof. Franco Lombardi**

**Ing. Alberto Faveto**

**Ing. Emiliano Traini**

**CANDIDATO:**

**Alessia Taglienti**

**Matricola 245378**

---

Anno Accademico 2020 - 2021



## RINGRAZIAMENTI

Vorrei esprimere i miei più sinceri ringraziamenti alla professoressa Giulia Bruno e al dottorando Alberto Faveto per la disponibilità, per la loro preziosa guida e per aver permesso la realizzazione di questo elaborato, fornendomi tutti i mezzi per studiare un argomento per me nuovo, permettendomi di ampliare le mie conoscenze.

Un ringraziamento speciale alla mia Famiglia senza la quale nulla sarebbe stato possibile. A mia madre, a mio padre, a mia sorella e a nonno Maurizio appoggiandomi in ogni mia scelta e sostenendomi sempre nei momenti di difficoltà.

Alla famiglia di Amici che mi ha accompagnata in questo percorso, dandomi ogni giorno motivo per sorridere.



## ABSTRACT

Per soddisfare l'esigenza di diminuire l'impatto che i veicoli hanno sull'ambiente, recentemente si è assistito ad un incremento della ricerca legata al passaggio dai veicoli a combustione interna ai veicoli elettrici.

Oltre l'industria automobilistica, ci sono indiscutibili indicatori di cambiamento verso l'elettromobilità anche da parte del settore privato, in particolare per quanto riguarda la logistica industriale sempre più green del mondo elettrico.

Proprio alla luce di queste esigenze, il lavoro di tesi si pone come obiettivo lo studio di una tecnologia di avanguardia per l'alimentazione dei veicoli elettrici industriali, denominata ricarica dinamica wireless (Dynamic Wireless Charging). In particolare, questa tecnologia è stata valutata per l'impiego dell'alimentazione di carrelli elevatori all'interno di un magazzino aziendale.

Per valutare l'efficacia del sistema è stato implementato un modello di simulazione utilizzando il software Anylogic. Tale modello ha consentito, una volta definito graficamente il magazzino, di dimensionare il sistema di alimentazione wireless per i veicoli elettrici industriali per il miglioramento delle operazioni di movimentazione. In particolare, una volta assegnata la logica di movimentazione al carrello elevatore, analizzando le aree del magazzino maggiormente utilizzate, è stato possibile identificare le zone da adibire alla ricarica dinamica, ovvero in cui inserire le bobine trasmettenti poste al di sotto della pavimentazione. Il veicolo, a sua volta provvisto di bobina ricevente, riesce, grazie al fenomeno dell'induzione magnetica, a ricaricarsi semplicemente passando al di sopra della pavimentazione. Inoltre, è stato possibile anche valutare le percentuali di carica e scarica a cui il veicolo viene sottoposto.

# INDICE

Pagina

<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	<b>VII</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INDICE DEI DIAGRAMMI</b> .....	<b>X</b>
<b>IL MONDO DEI VEICOLI ELETTRICI</b> .....	<b>1</b>
1.1.    LA STORIA DELL'ELETTO-MOBILITÀ .....	2
1.2.    MODELLI DI VEICOLI ELETTRICI E LA NASCITA DI INFRASTRUTTURE .....	4
1.3.    VEICOLI ELETTRICI INDUSTRIALI: DAGLI ANNI 80 AD OGGI .....	7
1.4.    TIPOLOGIE DI VEICOLI ELETTRICI INDUSTRIALI .....	9
1.5.    LA SICUREZZA DEI VEICOLI ELETTRICI INDUSTRIALI.....	13
1.6.    ALIMENTAZIONE DEGLI VEICOLI ELETTRICI .....	15
1.7.    TIPOLOGIE DI BATTERIE E LA CONVENIENZA DELLE BATTERIE AGLI IONI LITIO .....	17
<b>LA TECNOLOGIA WIRELESS POWER TRANSFER</b> .....	<b>19</b>
2.1.    EVOLUZIONE STORICA.....	19
2.2.    TIPOLOGIE DI WPT.....	21
2.2.1    WPT capacitivo.....	22
2.2.2    WPT induttivo.....	23
2.2.3    WPT radiativo.....	24
2.3.    METODI DI RICARICA WIRELESS PER VEICOLI ELETTRICI: STATICA E DINAMICA.....	24
2.4.    PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO: BIBERONAGGIO .....	25
2.5.    VANTAGGI E SVANTAGGI DEI DISPOSITIVI WPT .....	28
<b>IL MONDO DELLA SIMULAZIONE</b> .....	<b>30</b>
3.1.    ANYLOGIC.....	33
3.2.    PASSI DA ESEGUIRE PER CREARE UN MODELLO DI SIMULAZIONE .....	40
3.3.    I VANTAGGI E LE COMPLESSITÀ DELLA SIMULAZIONE .....	44
<b>IL MODELLO DI SIMULAZIONE DI UN SISTEMA WPT</b> .....	<b>45</b>
4.1.    GLI OBIETTIVI .....	66
4.1.1    Valutazione delle posizioni che il carrello elevatore ha all'interno del magazzino .....	66
4.1.2    Valutazione della disposizione delle bobine trasmettenti .....	69
4.1.3    Valutazione dello stato di carica della batteria.....	72
4.1.4    Le simulazioni.....	79
<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>102</b>

## INDICE DELLE TABELLE

	Pagina
Tabella 1: Valutazione del parametro ChargeRate .....	78
Tabella 2: Valutazione del parametro DischargeRate .....	78
Tabella 3: Tabella dei tempi del carrello in ogni ubica per 8h .....	80
Tabella 4: Tabella delle probabilità per 8h .....	81
Tabella 5: T-test per la simulazione di 8h con $\Delta Soc=0\%$ .....	84
Tabella 6: Tabella dei tempi del carrello in ogni ubica per 16h .....	87
Tabella 7: Tabella delle probabilità per 16h .....	87
Tabella 8: T-test per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=0\%$ .....	89
Tabella 9: T-test per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=90\%$ .....	91
Tabella 10: T-test per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=95\%$ .....	93
Tabella 11: Tabella dei tempi del carrello in ogni ubica per 24h .....	95
Tabella 12: Tabella delle probabilità per 24h .....	95
Tabella 13: T-test per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=0\%$ .....	96
Tabella 14: T-test per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=90\%$ .....	98
Tabella 15: T-test per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=95\%$ .....	100

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Thomas Edison con la prima auto elettrica nel 1913 .....	2
Figura 2: Struttura di un veicolo elettrico .....	4
Figura 3: Struttura di un veicolo ibrido in serie.....	5
Figura 4: Struttura di un veicolo ibrido in parallelo .....	5
Figura 5: Un membro della Clark Company con il primo prototipo di carrello elevatore....	7
Figura 6: Carrello elevatore da magazzino.....	9
Figura 7: Sollevatore telescopico.....	9
Figura 8: Traspallet .....	10
Figura 9: Carrello trilaterale .....	10
Figura 10: Carrello commissionatore.....	11
Figura 11: Carrello frontale a forche.....	11
Figura 12: Asse posteriore e anteriore di un carrello elevatore.....	12
Figura 13: Console comandi.....	12
Figura 14: Safety e Reliability .....	13
Figura 15: Una configurazione WPT di circuiti risonanti accoppiati magneticamente testati da Tesla .....	19
Figura 16: Sistema di Track-Pickup distribuito.....	21
Figura 17: Sistema di Track-Pickup concentrato.....	21
Figura 18: Apparato per il trasferimento wireless di energia .....	22
Figura 19: Sistema di WPT capacitivi .....	23
Figura 20: Sistema di WPT induttivo .....	24
Figura 21: Receiver e Transmitter .....	26
Figura 22: Schema della tecnologia Enermove .....	27
Figura 23: Energie rinnovabili.....	27
Figura 24: Il modo di studiare un sistema .....	31
Figura 25: Le tre tipologie di simulazione .....	34
Figura 26: Schema di un diagramma di flusso per un sistema ad Eventi Discreti .....	37
Figura 27: Tipologie di diagrammi utilizzabili in Anylogic .....	38
Figura 28: Schema dei passi da eseguire nella realizzazione di un modello simulativo ....	43
Figura 29: Schema del magazzino .....	46
Figura 30: Finestra per la creazione di un Agent Type .....	47
Figura 31: PalletRack.....	49
Figura 32: Panoramica del magazzino in 3D .....	49
Figura 33: Finestra di lavoro del RackSystem .....	50
Figura 34: Finestra di lavoro della ResourcePool “forklift” .....	51
Figura 35: Flowchart.....	52
Figura 36: Finestra di lavoro del blocco Source.....	53
Figura 37: Finestra di lavoro del blocco Move to.....	55
Figura 38: Finestra di lavoro del blocco Delay .....	56
Figura 39: Finestra di lavoro del blocco RackStore.....	59
Figura 40: Finestra di lavoro del blocco Source degli ordini .....	61
Figura 41: Finestra di lavoro del blocco SelectOutput .....	62
Figura 42: Finestra di lavoro del blocco orderQueue .....	62
Figura 43: Funzione per la generazione casuale degli ordini .....	63

Figura 44: Finestra di lavoro del blocco RackPick.....	65
Figura 45: Finestra di lavoro dell'Evento .....	67
Figura 46: Minimo locale e globale delle funzioni obiettivo .....	69
Figura 47: Schema di System Dynamics per la valutazione della carica del carrello elevatore .....	72
Figura 48: Componenti per la realizzazione di uno schema System Dynamics.....	73
Figura 49: Link con linea continua .....	73
Figura 50: Link con linea tratteggiata .....	74
Figura 51: Finestra di lavoro del blocco Stock Charge.....	74
Figura 52: Finestra di lavoro del blocco Stock Discharge .....	75
Figura 53: Finestra di lavoro di blocco DischargingFlow .....	75
Figura 54: Finestra di lavoro del blocco ChargingFlow .....	76
Figura 55: Finestra di lavoro dell'EventCharge .....	77
Figura 56: Matrice delle postazioni delle bobine per 8h con $\Delta Soc=0\%$ .....	82
Figura 57: Bobine rettangolari.....	82
Figura 58: T-test unilaterale sinistro .....	84
Figura 59: Matrice delle postazioni delle bobine per 8h con $\Delta Soc=90\%$ e $\Delta Soc=95\%$ .....	86
Figura 60: Matrice delle postazioni delle bobine per 16h con $\Delta Soc=0\%$ .....	88
Figura 61: Matrice delle postazioni delle bobine per 16h con $\Delta Soc=90\%$ .....	90
Figura 62: Matrice delle postazioni delle bobine per 16h con $\Delta Soc=95\%$ .....	93
Figura 63: Matrice delle postazioni delle bobine per 24h con $\Delta Soc=0\%$ .....	96
Figura 64: Matrice delle postazioni delle bobine per 24h con $\Delta Soc=90\%$ .....	98
Figura 65: Matrice delle postazioni delle bobine per 24h con $\Delta Soc=95\%$ .....	100

## INDICE DEI DIAGRAMMI

	Pagina
Diagramma 1: Q-Q plot per valutare la distribuzione normale .....	83
Diagramma 2: Boxplot per la simulazione di 8h con $\Delta Soc=0\%$ .....	85
Diagramma 3: Distribuzione normale per la simulazione di 8h con $\Delta Soc=0\%$ .....	85
Diagramma 4: Boxplot per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=0\%$ .....	89
Diagramma 5: Distribuzione normale per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=0\%$ .....	90
Diagramma 6: Boxplot per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=90\%$ .....	91
Diagramma 7: Distribuzione normale per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=90\%$ .....	92
Diagramma 8: Boxplot per la simulazione di 16h per $\Delta Soc=95\%$ .....	94
Diagramma 9: Distribuzione normale per la simulazione di 16h con $\Delta Soc=95\%$ .....	94
Diagramma 10: Boxplot per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=0\%$ .....	97
Diagramma 11: Distribuzione normale per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=0\%$ .....	97
Diagramma 12: Boxplot per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=90\%$ .....	99
Diagramma 13: Distribuzione normale per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=90\%$ .....	99
Diagramma 14: Boxplot per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=95\%$ .....	101
Diagramma 15: Distribuzione normale per la simulazione di 24h con $\Delta Soc=95\%$ .....	101

## 1. CAPITOLO

### IL MONDO DEI VEICOLI ELETTRICI

Da recenti studi sono dieci gli anni a disposizione dell'uomo per intervenire sulle due maggiori sfide del mondo: l'Air Quality e il Global Warming. Il 2019 è stato l'anno che ha segnato la chiusura di un decennio segnato dal riscaldamento globale, dallo scioglimento dei ghiacciai, dall'aumento del livello dei mari provocati dai gas serra dovute alle attività dell'uomo. Se non si prenderanno decisive e urgenti misure per contenere tutto questo si andrà verso aumenti della temperatura del nostro pianeta talmente preoccupanti da essere ancora più dannose per la salute umana. E-Mobility è una delle parole chiave nelle relazioni europee sulla mobilità e coinvolge quei veicoli che utilizzano, come fonte di energia primaria, l'elettricità. In altre parole, l'E-mobility è una scelta intelligente per l'ambiente a cui l'uomo non può che guardare con ottimismo. L'agire delle istituzioni non può che garantire una rapida transizione verso i veicoli elettrici per compiere progressi significativi nella riduzione delle emissioni, abbracciando sempre di più l'idea di un mondo "pulito". Nonostante oggi i veicoli elettrici rappresentino una nicchia di mercato rispetto ai motori tradizionali, proprio questo rafforza la necessità a spingere verso l'elettrico, verso i veicoli ibridi e i carburanti alternativi (GPL, metano, idrogeno, biocarburanti).

L'analisi del progetto di tesi si basa su una soluzione altamente innovativa nel settore dell'elettro-mobilità. Sistemi che stanno segnando un punto di svolta nell'industria 4.0 e proseguiranno nell'orientare le scelte future. Soluzioni volte all'incremento della produzione in grado di interagire facilmente con impianti e macchinari già esistenti. Quattro i parametri per ottimizzare la logistica aziendale:

- Distanza da percorrere;
- Tempo impiegato lungo il percorso;
- Spazio per lo stoccaggio;
- Energia necessaria per effettuare lo spostamento.

La logistica è sempre un "tasto dolente" da organizzare e gestire in un'azienda dovendo soprattutto fare attenzione alla gestione, alla movimentazione e allo stoccaggio della merce. Per effettuare al meglio queste operazioni è necessario far fronte all'utilizzo di appositi dispositivi, ovvero i carrelli elevatori detti tipicamente anche muletti. Nel seguente capitolo

sono state trattate le tematiche più importanti che riguardano il mondo dei veicoli elettrici industriali, per poi passare al secondo capitolo con una maggiore attenzione alla modalità di ricarica dei veicoli elettrici industriali. Il terzo e il quarto capitolo sono incentrati invece, sul mondo della simulazione e sul modello creato volto a rappresentare, il più possibile, la realtà e a verificare la veridicità delle ipotesi effettuate nel precedente modello analitico, in modo da avere una visione di insieme delle problematiche trattate, cercando di fornire un piano attuabile all'interno dell'azienda stessa in base alle richieste del cliente.

### **1.1. La storia dell'elettro-mobilità**

Parlare di elettro-mobilità può far pensare ad un'innovazione di recente data e invece, contro ogni possibile previsione, le prime quattro ruote della storia furono elettriche. Fu Henry Ford, con il sostegno dell'amico Thomas Edison, a puntare sull'idea di un veicolo elettrico. Ma il progetto fallì. I problemi furono gli stessi di oggi: i tempi di ricarica, le batterie ingombranti, i costi, le infrastrutture per la ricarica, la limitata autonomia delle batterie, la loro sicurezza in quanto possono esplodere, il loro smaltimento. L'innovazione tecnologica nell'industria automobilistica così come in tutti settori a volte soffre di segni di interruzione, ma questi tentativi non sono mai vani.



**Figura 1: Thomas Edison con la prima auto elettrica nel 1913**

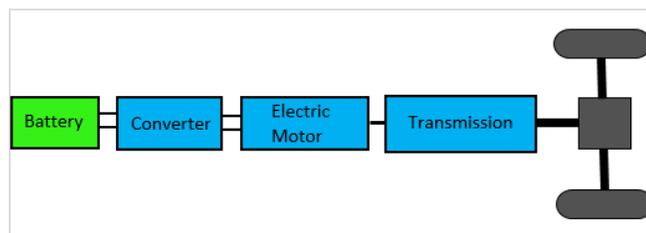
Ma se tutto questo nel 2021 può sembrare pura innovazione in realtà, trova le sue radici nella metà del 1800, grazie a Robert Anderson, un imprenditore scozzese, che ideò la prima carrozza senza cavalli e puramente elettrica, veicoli che si svilupparono molto velocemente grazie alla loro semplicità di guida rendendosi pratici per la vita di tutti i giorni. L'idea era supportata dalla volontà di soppiantare le problematiche tipiche di un veicolo tradizionale i quali soffrono di innumerevoli inconvenienti all'avviamento del motore, per il surriscaldamento, per l'eccessiva produzione di prodotti inquinanti e per l'impatto sonoro dovuto al loro rumore. L'auto elettrica a batteria fu tra i primi modelli di auto ad essere inventata, sperimentata e commercializzata, e nacque proprio nella nostra Europa. Nel 1835 fu con l'idea del professore Sibrandus Stratingh, che venne progettata una piccola electric car, che fu poi costruita e messa a punto dal suo collaboratore Christopher Becker. Sul finire del XIX secolo, si arrivò addirittura a promuovere iniziative come la prima forma di mobilità sostenibile: si trattava di una car sharing, così come quello odierno, che consentiva di noleggiare un'auto all'interno delle principali città europee per un periodo limitato. A fare da trampolino alla diffusione delle auto elettriche non può che esserci l'avvento dell'energia elettrica definita a tutti gli effetti una vera e propria rivoluzione sociale il cui ingresso nel mondo occidentale ha scombuscolato il vivere quotidiano. È inoltre, con la seconda rivoluzione industriale che sono state sviluppate molte soluzioni per il funzionamento degli impianti elettrici industriali. In Italia la storia della produzione di energia elettrica inizia il 18 giugno 1883, quando viene inaugurata a Milano la prima centrale elettrica con macchine a vapore alimentate a carbone. Nel tempo, e con una richiesta sempre più urgente sul territorio nazionale, l'energia è stata generata in grandi impianti che differivano a seconda della tipologia di fonte principale: geotermica, termica, idroelettrica, consentendo l'ingresso delle energie rinnovabili dette RES (renewable energy source), che stanno contribuendo alla sostituzione dei metodi tradizionali, portando vantaggi di natura ambientali, economici e politici. I diversi cambiamenti in tutti i settori energetici, ha riservato scenari molto più ampi al mondo dei veicoli elettrici. L'elettricità ha portato con sé non solo l'incremento dei rendimenti, ma ha assicurato il totale azzeramento delle emissioni di gas nocivi per la salute umana promuovendo una qualità di vita migliore. Negli ultimi anni le automobili hanno dato alle persone un panorama di scelta maggiore per quanto riguarda il luogo dove lavorare

rispetto a quello di residenza. In egual modo, l'eletto-mobilità deve rendersi sempre più eco-sostenibile, consentendo a tutti i paesi del mondo di rientrare nei limiti di inquinamento, che si sono proposti di raggiungere entro il 2030. A tal proposito, a supporto dello sviluppo dei veicoli elettrici ci devono essere però delle strutture di ricarica adeguate, necessarie a arginare uno dei principali inconvenienti che non consentono a queste innovazioni di decollare nello scenario automobilistico e aziendale.

## 1.2. Modelli di veicoli elettrici e la nascita di infrastrutture

Negli ultimi anni il mondo dell'autoveicolo ha visto l'introduzione dei motori elettrici come soluzione ai tradizionali motori a combustione interna, essendo il settore dei trasporti il maggior responsabile dell'inquinamento ambientale. Quando si parla di mobilità sostenibile sono due le tipologie da evidenziare:

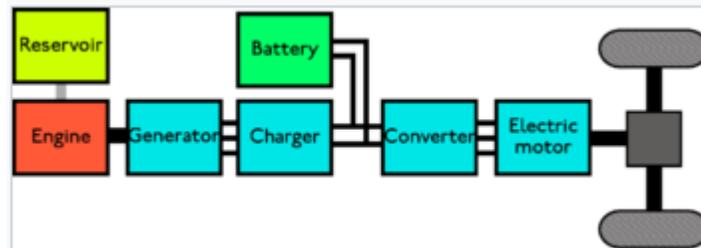
- Veicoli elettrici (BEV): dotati esclusivamente di un motore elettrico, la cui batteria è ricaricata collegandola direttamente alla presa elettrica o con soluzioni analizzate in questa trattazione quali ricarica wireless privo di collegamento cablato, rimuovendo l'uso di fili anche antiestetici.



**Figura 2: Struttura di un veicolo elettrico**

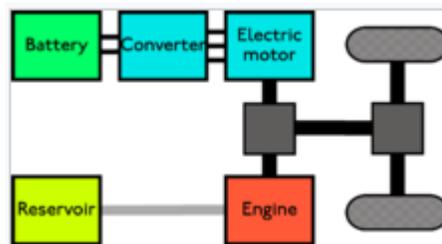
- Veicoli ibridi (PHEV): dotati sia di un motore elettrico che termico che funge da energia primaria. Se si parla di ibridi, inoltre, è essenziale una diversificazione tra ibridi in serie e in parallelo. In quelli in serie il termico funge da generatore, ovvero

quando la batteria sta per scaricarsi il motore termico comanda un generatore elettrico che ricarica la batteria.



**Figura 3: Struttura di un veicolo ibrido in serie**

Quello in parallelo è così detto perché sono entrambe le macchine a mandare energia alle ruote, diversamente dalla configurazione in serie in cui è solo il motore elettrico ad alimentarle. Con l'ibrido parallelo quindi la massima potenza del veicolo è garantita dalla somma delle potenze dei due motori, in modo da realizzare un termico più piccolo.



**Figura 4: Struttura di un veicolo ibrido in parallelo**

Entrambe le tecnologie possono essere: *plug-in* che nasce per avere come fonte primaria l'energia elettrica, ovvero la ricarica della batteria è possibile fermandosi e

collegandosi ad una presa di corrente. Diversamente dal *non plug-in* in cui è il termico che, quando serve, ricarica la batteria.

Tuttavia, i consumatori devono essere incoraggiati e incuriositi a utilizzare l'elettricità prima di tutto con la comodità di una ricarica a livello nazionale con brevi soste e costi contenuti. Il passaggio da un'auto tradizionale a un'auto elettrica non è così immediato, soprattutto se i clienti non vengono aiutati a comprendere i tanti vantaggi di queste nuove tecnologie, ovvero un motore elettrico più leggero di un termico, la possibilità di sfruttare la frenata rigenerativa stoccando energia in batteria durante la frenata del veicolo in quanto non si agisce direttamente sui freni dissipando energia cinetica ma si va a frenare la macchina elettrica, non solo frenando ma anche semplicemente togliendo il piede dall'acceleratore, dal punto di vista delle emissioni è sicuramente più efficiente di un motore convenzionale. Lo sviluppo della mobilità elettrica dipenderà però non solo dall'applicazione di specifiche tecnologie, ma anche dalla capacità di organizzare e gestire le attività di diversi protagonisti: produttori di batterie, industria automobilistica, fornitori di servizi di mobilità, fornitori e distributori di energia, istituzioni. Da qui la necessità di favorire l'emergere di infrastrutture di ricarica, una delle maggiori preoccupazioni di un utente al momento dell'acquisto di un veicolo elettrico, come ad esempio:

- Infrastrutture di battery-swap: ovvero di completa sostituzione del pacco batteria all'interno di apposite stazioni di scambio;
- Infrastrutture di ricarica rapida: cablata o wireless. Nel primo caso si parla di colonnine elettriche tramite il collegamento alla presa elettrica. La seconda molto più innovativa, riguarda la ricarica senza fili.

Data la diversità di veicoli quello a cui si punta maggiormente oggi è la soluzione di ricarica rapida. La mobilità elettrica riguarda non solo le auto ma anche altri tipi di veicoli: due ruote motorizzate, furgoni, biciclette e soprattutto veicoli elettrici industriali, come è stato fatto nella seguente trattazione. Sono state valutate realtà industriali ad elevata innovazione, quali la possibilità di ricarica dinamica e statica di carrelli elevatori all'interno di uno stabilimento elettrificando le corsie tramite l'uso di bobine di ricarica del pacco batterie. La mobilità elettrica rappresenta ormai a tutti gli effetti la vera sfida futura.

### 1.3. Veicoli elettrici industriali: dagli anni 80 ad oggi

L'esigenza di una logistica più green del settore industriale ha portato un sostanziale sviluppo dei veicoli elettrici soppiantando i commerciali e tradizionali veicoli soprattutto diesel, ovvero i maggiori responsabili di emissioni di particolato. L'elettrificazione dei veicoli si ritrova così ad avere sempre più consenso da parte delle aziende orientate verso un'ottica di competitività industriale. Quando si parla di veicoli industriali si pensa subito al più classico dei carrelli elevatori, ormai in uso da più di 80 anni, attribuendo alla Clark Company la sua commercializzazione nel 1917. Questa tipologia di dispositivo è diventato subito popolare tanto che oggi si è stimato un uso che supera il milione di carrelli elevatori utilizzati nei magazzini industriali di tutto il mondo.



**Figura 5: Un membro della Clark Company con il primo prototipo di carrello elevatore**

L'intento con la loro invenzione era quello di permettere di spostare pesanti carichi, e farlo in zone del magazzino inarrivabili in altezza. Fu Clark a commercializzare una loro prima soluzione in acciaio nel 1909, introducendo così la prima classe di veicoli industriali aziendali per magazzini. L'ingente richiesta da parte dei suoi clienti lo portò presto a prendere la decisione di cominciarli a vendere facendone un vero e proprio mercato. Fu grazie agli studi degli ingegneri dell'Università di Yale che si riuscì ad ampliare il campo di studio di questo settore, arrivando a sperimentare il primo carrello elevatore elettrico con un sistema a

cricchetto e pignone. Già le primissime versioni di questi carrelli vantavano particolari come gli schienali e una gabbia attorno al conducente per garantire agli operatori una maggiore sicurezza di guida. Ma le maggiori innovazioni riguardano i modi di alimentazione del veicolo. Tra i vantaggi che fanno preferire il veicolo elettrico al diesel riguarda soprattutto il suo uso in luoghi chiusi e quindi in reparti aziendali ovvero in spazi con poche vie di sfogo infatti il muletto elettrico si presenta più pulito e anche più silenzioso del tradizionale diesel. Diversamente dai sistemi che usano un motore termico, non emettono sostanze dannose per la salute degli operai e dell'ambiente, inoltre presenta il vantaggio di non produrre rumori fastidiosi durante lo svolgimento delle operazioni. Per quanto riguarda i suoi svantaggi invece, data la scelta di ricarica wireless, bisogna far fronte ad ulteriori inconvenienti a cui è soggetto l'operatore, quali campi magnetici, che potrebbero essere un danno alla sua incolumità. Di contro i veicoli elettrici, hanno livelli di vibrazione più bassi, ottimizzando l'esecuzione delle mansioni giornaliere. Inoltre contro ogni possibile previsione un carrello elettrico è anche più performante di un veicolo a combustione interna. Lo svantaggio però è sempre legato ai tempi di ricarica e al costo della batteria: possono servire diverse ore di attesa per ricaricare la batteria, inconveniente che però può essere risolto tramite una soluzione più rapida come la ricarica dinamica. Il muletto diesel quindi è più adatto per un utilizzo all'esterno, grazie prevalentemente alla sua struttura: l'altezza dal suolo e le dimensioni delle ruote, infatti, consentono di lavorare in luoghi pericolanti, scoscesi o bagnati. Inoltre, i carrelli elevatori diesel essendo dotati di un motore termico hanno anche una maggiore autonomia, quindi si riesce a lavorare con turni più lunghi senza doversi fermare per il rifornimento che inoltre è possibile fare in pochi minuti e soprattutto ovunque.

#### 1.4. Tipologie di veicoli elettrici industriali

Tra le tipologie di carrelli elevatori più popolari oggi sul mercato ci sono:

- *Carrello elevatore da magazzino*: sono dispositivi utilizzati soprattutto durante la consegna della merce per il carico e lo scarico di questa dai camion.



**Figura 6: Carrello elevatore da magazzino**

- *Sollevatore telescopico*: meglio conosciuto anche come carrello elevatore retrattile, è caratterizzato da un braccio che potendosi estendere, garantisce il vantaggio di due dispositivi messi insieme ovvero di una gru e di un carrello elevatore. Il pallet da terra viene sollevato per mezzo delle forche, raggiungendo le zone più alte del magazzino.



**Figura 7: Sollevatore telescopico**

- *I transpallet*: detti anche autocarri a pompa, vengono di solito utilizzati per trasportare carichi relativamente leggeri, date le loro piccole dimensioni, all'interno del magazzino senza poterli sollevare da terra.



**Figura 8: Traspallet**

- *Carrelli elevatori industriali*: meglio conosciuto come carrello elevatore di grande capacità, offre il vantaggio di una doppia prestazione ovvero sia quella di un carrello elevatore da magazzino che di un sollevatore telescopico. Nonostante la sua difficoltà nell'arrivare a lavorare in prossimità di angoli stretti, riesce, rispetto a quello da magazzino, a sollevare carichi più pesanti e molto più in alto. Di questa categoria è possibile apprezzare tre possibili tipologie:
  1. Carrelli trilaterali: è un carrello che ha la possibilità di stoccare e movimentare pallet in maniera perpendicolare al suo senso di marcia, raggiungendo, infatti, zone dello scaffale estese in altezza.



**Figura 9: Carrello trilaterale**

2. Carrelli commissionatori: posso essere sia verticali che orizzontali, quest'ultimi consentono di raggiungere altezze degli scaffali molto alte. È una innovazione del semplice transpallet, che permette il picking, ovvero un processo di movimentazione

e posizionamento del materiale tra i più complessi che viene lasciato al ruolo dell'operatore, tanto da richiede macchine che ne riducano l'affaticamento e ne semplifichino i movimenti, per tale ragione possiede il posto per ospitare l'uomo.



**Figura 10: Carrello commissionatore**

4. Carrelli frontali: ovvero quello tradizionale detto anche a forche, è quello più usato e più completo in un magazzino. Hanno i vantaggi di un vero e proprio carrello elevatore a forche frontali, la leggerezza e la maneggevolezza di una macchina da interno. Consente di avere portate residue maggiori rispetto agli altri prodotti presenti sul mercato, in questa categoria.



**Figura 11: Carrello frontale a forche**

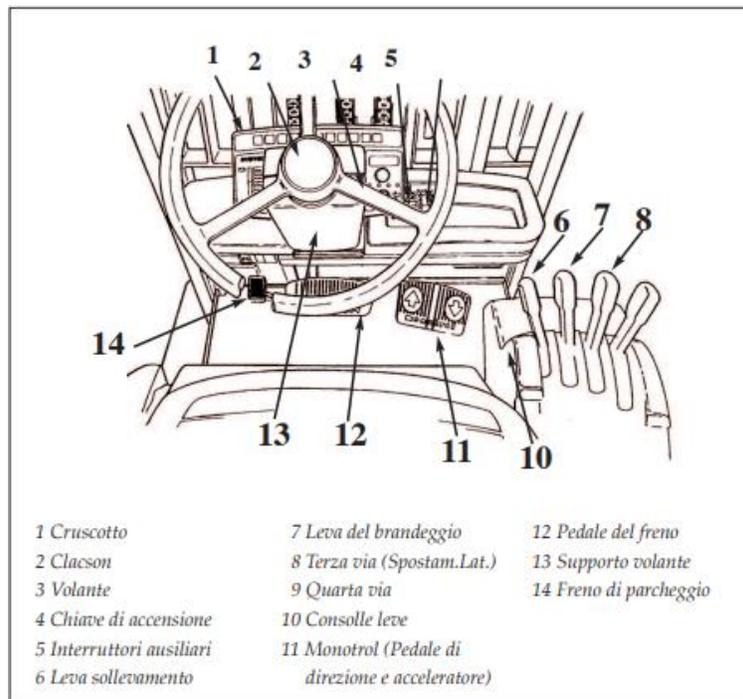
È questo dispositivo a forche che è stato utilizzato nel progetto di tesi. È paragonabile a tutti gli effetti ad un'automobile in quanto dotato anch'esso di un asse anteriore caratterizzato dal

sistema sterzante e dal gruppo di sollevamento, e da un asse posteriore su cui è presente il posto per l'operatore e il vano per ospitare il motore o la batteria.



**Figura 12: Asse posteriore e anteriore di un carrello elevatore**

Una parte essenziale del carrello è sicuramente la console dei comandi mostrata in figura, anche questi molto simili a quelli di un'automobile.



**Figura 13: Console comandi**

Tutti i comandi sono molto vicini all'operatore, in modo da intervenire per qualsiasi evenienza in modo rapido. La sterzata avviene con un volante molto simile a quello automobilistico, ma le ruote adibite alla sterzata per un carrello elevatore sono quelle posteriori diversamente da un'auto. Questi dispositivi usano come principio fisico quello della bilancia (il principio di bilanciamento tra carico e contraccarico) quindi l'esecuzione di una operazione in modo troppo brusco può intaccare la stabilità del veicolo. Il sollevamento della merce è garantito grazie all'uso di leve poste a destra del conducente su cui è indicato il movimento che ne comporta, in modo da essere facilmente utilizzabili. Durante la marcia, inoltre, il veicolo è sottoposto a varie sollecitazioni che ne potrebbero compromettere la stabilità e soprattutto la sicurezza del personale.

### 1.5. La sicurezza dei veicoli elettrici industriali

Come è possibile pensare i veicoli elettrici industriali sono macchine ingombranti e pesanti che normalmente possono arrivare a viaggiare a velocità molto elevate, anche fino a 2 m / s, e quindi rappresentano un rischio reale per le persone che si trovano nelle vicinanze. Spesso si trovano a dover sostenere un carico pesante e quindi devono essere sempre dotati di sistemi di sicurezza, che devono prima garantire la sicurezza delle persone che lavorano intorno al veicolo (safety) e l'integrità del carico che sostengono per un fattore di produttività (reliability).



Figura 14: Safety e Reliability

D'altra parte, la sicurezza del personale addetto all'uso e alla manutenzione dei veicoli, è necessariamente governato da una serie di normative, che servono ad informare il personale specializzato a prevenire incidenti ed infortuni a tutela della salute sull'ambiente di lavoro. Normative che vengono di solito fornite dai produttori dei veicoli, insieme a dei manuali di manutenzione, o che vengono direttamente insegnate da un tecnico della casa produttrice a chi dovrà lavorare a diretto contatto con i mezzi, a cui vengono richieste un certo numero di ore di training, permettendo ai lavoratori già esperti di migliorare le proprie conoscenze e dando invece, agli inesperti un bagaglio di nozioni fondamentali per la propria sicurezza fisica. I seguenti principi sono relativi alla sicurezza dei veicoli, delle merci e soprattutto di tutto il personale:

- **Il sistema di sollevamento:** ovvero il montante, gruppo verticale, posto sulla parte anteriore della macchina, dal quale sporgono le forche su cui viene posizionato il carico che viene sollevato tirando la leva di comando, azionando un cilindro idraulico e un sistema di catene. Per evitare qualsiasi situazione di precarietà viene utilizzata una lastra di materiale plastico trasparente o da una griglia metallica leggera, consentendo all'operatore piena visuale dell'ambiente circostante, proteggendolo da possibili cadute di oggetti.
- **Posto di guida:** deve essere saldata al telaio del carrello, il pacco batterie deve essere fissato al chassis. L'interno del cofano deve essere lontano almeno 3 cm dalle parti in tensione delle batterie e deve essere tutto isolato elettricamente. Deve essere inoltre dotato di cinture di sicurezza, e deve avere dimensioni idonee affinché nessuna parte del corpo dell'operatore sporga.
- **Organi di comando:** i carrelli devono essere provvisti di chiave asportabile per il funzionamento. Tra gli organi dei carrelli ci sono: valvole del circuito idraulico per il gruppo di sollevamento, pedali, volante e pulsanti per la protezione durante l'azionamento accidentale. I pedali devono essere provvisti di sistemi che impediscano ai piedi di scivolare. I freni sono comandati dal pedale di sinistra e devono essere usati in maniera delicata per una maggior sicurezza e stabilità del carico trasportato. La cosa più importante riguarda l'uso di dispositivi a "uomo presente" che blocchi il

funzionamento del veicolo in assenza del guidatore, tramite un interruttore a pedale che l'operatore ha il compito di premere quando è a bordo.

I carrelli hanno poi la necessità di essere provvisti di segnali luminosi e acustici che hanno lo scopo di avvisare in caso di pericolo. L'operatore è soggetto a continue vibrazioni meccaniche che si trasmettono al corpo intero che possono pregiudicare la salute del personale, necessario che quindi queste rimangano sotto la soglia consentita. È inoltre necessario indossare un abbigliamento idoneo, fare attenzione nel salire e scendere dal mezzo ed effettuare controlli preliminari sulla capacità di carico, sulle forche, sugli pneumatici e sui pedali. Un altro aspetto da valutare è sicuramente la sicurezza del sistema di ricarica o di rifornimento. In particolare, la carica deve avvenire in ambiente ben areati, di solito isolati dall'ambiente di lavoro, necessariamente lontano dalle sostanze altamente infiammabili. Per la ricarica statica devono usarsi delle prese di corrente collegate al pacco batterie con il caricabatteria spento. È vietato durante queste operazioni qualsiasi azione quale fumare o usare fiamme libere.

## **1.6. Alimentazione degli veicoli elettrici**

I veicoli elettrici sono sostanzialmente alimentati attraverso un pacco batteria estraibile. A seconda delle esigenze del cliente si possono valutare tre soluzioni possibili:

- Cambio manuale
- Cambio automatico
- Carica automatica

Nel progetto di tesi affrontato nel secondo capitolo si è approfondito lo studio esclusivamente della terza tipologia ovvero quello che viene definito il fenomeno del biberonaggio. Alla base, questo sistema prevede lungo il percorso in cui opera il veicolo, la progettazione di stazioni di ricarica tramite una tecnologia wireless su cui il mezzo stazionando si mantiene costantemente in carica. Parlare di batteria significa parlare di un generatore elettrochimico che produce energia elettrica in modo indipendente, tramite svolgimento al suo interno di reazioni chimiche. Tra le proprietà che la caratterizzano si hanno:

- **LA TENSIONE** misurata in Volt: detta differenza di potenziale è la misura del dislivello elettrico che esiste tra due punti di un circuito;
- **LA CAPACITA'** misurata in Amperora: quantità di carica elettrica che la batteria ha accumulato e che ha a disposizione durante la scarica. Dipende infatti dalle modalità di come viene scaricata, dipende dalla temperatura e da varie condizioni operative;
- **LA CORRENTE** misurata in Ampere: definisce lo spostamento delle cariche elettriche;
- **LO STATO DI CARICA(Soc)**: lo stato di energia residua che la batteria ha immagazzinato;
- **LA POTENZA EROGABILE** misurata in Watt: è il prodotto tra la tensione media di scarica e la corrente;
- **L'ENERGIA SPECIFICA o LA DENSITA' DI ENERGIA** misurata in [Wh/m<sup>3</sup>] o [Wh/kg]: è la quantità di energia che la batteria riesce a fornire, che ha accumulato, messa in relazione al volume o alla massa;
- **IL RENDIMENTO AMPEROMETRICO**: il rapporto tra gli amperora erogati durante la scarica e quelli precedentemente assorbiti dalla carica;
- **IL RENDIMENTO ENERGETICO**: è il rapporto tra l'energia erogata durante la scarica e quella assorbita durante la carica;
- **LA CARATTERISTICHE DI RICARICABILITA'**: a seconda se la batteria è una pila o un accumulatore fondamentale è valutare la sua possibilità di essere ricaricata, riuscendo a erogare diversi megawatt. La ricarica è garantita mediante l'erogazione di una certa quantità di energia elettrica.
- **L'EFFETTO MEMORIA**: esistono alcune batterie ricaricabili che se caricate prima che siano completamente scariche conservano una "memoria" del loro precedente stato di carica, ovvero se si andasse a ricaricare una batteria carica al 60%, significherebbe che il 40% di carica risulterebbe completamente inutilizzabile;
- **L'IMPATTO AMBIENTALE**: ci fornisce informazioni su come smaltire la batteria, una volta esaurito il suo ciclo di funzionamento. Pratica, quella dello smaltimento delle batterie, che può addirittura ricadere in una pratica anti-ecologica, fondamentale è quindi conoscerne le esigenze.

- **I COSTI:** prevalentemente dipendenti dalla disponibilità e dal costo di materie prime, dalle tariffe energetiche, dai costi di manutenzione che a loro volta dipendono dalla tipologia di batteria, dalla loro durata e rendimento.

### **1.7. Tipologie di batterie e la convenienza delle batterie agli ioni litio**

In passato, le batterie al piombo erano sicuramente quelle maggiormente utilizzate, aventi però un'energia specifica troppo bassa non riuscendo inoltre, a garantire un'elevata autonomia del veicolo a causa del contenimento di peso e volume. Quelle al nichel-cadmio sono quelle più diffuse dopo il piombo, garantendo un'energia specifica anche fino a 50Wh/kg, molto più robuste e con prestazioni migliori. Il cadmio, usato come elettrodo negativo è però altamente tossico e questo ne ha sfavorito la diffusione, in quanto richiede uno smaltimento anche molto costoso. La necessità di ridurre l'impatto ambientale ha portato allo sviluppo di accumulatori al nichel-idruri metallici, i quali richiedono però un costo di materie prime elevato.

Nel vasto campo delle batterie quelle al litio rappresentano un'innovazione nell'ambito dell'energia per l'Industria 4.0., un cambio considerevole rispetto alle batterie al piombo. Utilizzare le batterie al litio su veicoli elettrici comporta notevoli vantaggi che permettono di incrementare le performance industriali, specialmente in un sistema produttivo che sfrutta la logistica integrata. Tra i principali vantaggi:

- le batterie al litio non necessitano di manutenzione e questo permette alle industrie di aumentare l'efficienza dell'impianto;
- i tempi di ricarica sono molto più brevi rispetto alle batterie al piombo;

Il litio è il metallo più leggero conosciuto e l'elemento solido meno denso con il più grande potenziale elettrochimico, che si traduce in prestazioni energetiche superiori in termini di peso. Una tipica batteria al litio è in grado di generare tensioni da 2,4 V a 3,7 V, a seconda della chimica utilizzata. Le particolari proprietà chimico-fisiche del litio hanno consentito lo

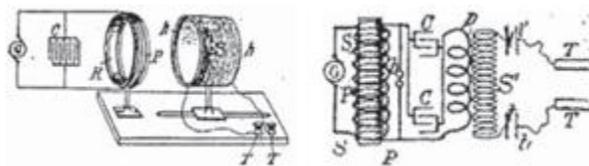
sviluppo di tecnologie per l'accumulo di energia elettrica sotto forma di energia chimica. C'è infatti da fare una diversificazione sul il litio metallico che viene utilizzato per la realizzazione di pile (batterie non ricaricabili dette secondarie), diversamente dallo ione litio usato per la produzione di accumulatori (batterie ricaricabili dette primarie). Si tratta di un metallo alcalino, ad elevata reattività, uno dei motivi che lo rende introvabile puro in natura. Una batteria è un dispositivo in grado di convertire energia chimica in energia elettrica, tramite una reazione chimica di ossido-riduzione dette reazione Redox, che implica trasferimento di elettroni. Tra le batterie ricaricabili, quelle al litio hanno, le prestazioni potenzialmente più interessanti, permettendo di stoccare in batteria più energia rispetto a quelle al piombo. Le batterie agli ioni di litio sono anche più piccole e più leggere, per questo si pensa che in futuro potrebbero sostituire quelle ad idrogeno. Necessitando di un fabbisogno di raffreddamento inferiore essendo meno sensibili alle fluttuazioni di temperatura soprattutto se utilizzate a basse velocità di scarica potendo accettare sbalzi di corrente senza che questi creino inconvenienti sulle prestazioni della batteria. Contro ogni previsione di utilizzo massimo di 10 anni la maggior parte dei consumatori sostituisce le batterie al piombo anche dopo 5 anni, diversamente da quelle al litio che invece hanno una prospettiva di vita, garantita, anche superiore ai 10 anni, riducendo di conseguenza i costi necessari per la loro sostituzione. Costo però che risulta sicuramente maggiore rispetto alle altre soluzioni. Essendo un materiale infiammabile bisogna evitare problemi come il mantenimento della batteria per troppo tempo collegata al suo caricabatteria in quanto questo potrebbe provocare eventuali cali di corrente che possono seriamente comprometterne il suo corretto funzionamento.

## 2. CAPITOLO

### LA TECNOLOGIA WIRELESS POWER TRANSFER

#### 2.1. Evoluzione storica

Se alla base dei problemi riguardanti la diffusione dei veicoli elettrici ci sono l'autonomia e i tempi di ricarica allora i sistemi per la ricarica wireless possono rappresentare una valida soluzione. La trasmissione di energia elettrica senza fili, "Wireless Power Transfer" (WPT), deve il suo sviluppo agli studi basati sull'elettromagnetismo affrontati negli anni, mirati a rendere il mondo dei trasporti più sostenibile. Fu Michael Faraday nel 1831, fisico e chimico britannico, a dimostrare il principio dell'induzione magnetica. Il fenomeno fisico si fonda sulla magnetizzazione di alcune sostanze, dette ferromagnetiche, le quali, messe in contatto con un campo magnetico variabile nel tempo, interagendo con un circuito elettrico, riescono ad indurre una forza elettromotrice senza alcun contatto elettrico tra la sorgente del campo magnetico e il circuito stesso. A valle di questa scoperta e l'avvento delle leggi fondamentali della fisica classica di Ampère-Maxwell (che correlano i fenomeni elettrici e magnetici), spinsero il fisico ed ingegnere elettrico Nikola Tesla, nato da una famiglia serba, a sperimentare analisi sulla trasmissione di energia senza conduttori, per mezzo dell'onda elettromagnetica non legata da un mezzo conduttore, mediante l'uso di induttori.



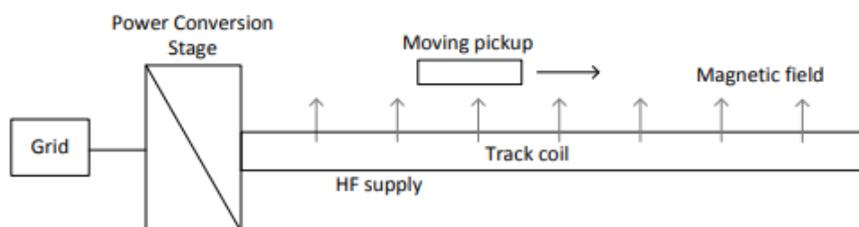
**Figura 15: Una configurazione WPT di circuiti risonanti accoppiati magneticamente testati da Tesla**

Alla base di tale iniziativa tecnologica c'è lo studio di diversi parametri essenziali al suo corretto funzionamento quali, i parametri di accoppiamento, la geometria delle spire, l'aumento della frequenza, necessario per aumentare la potenza trasmessa, l'utilizzo di

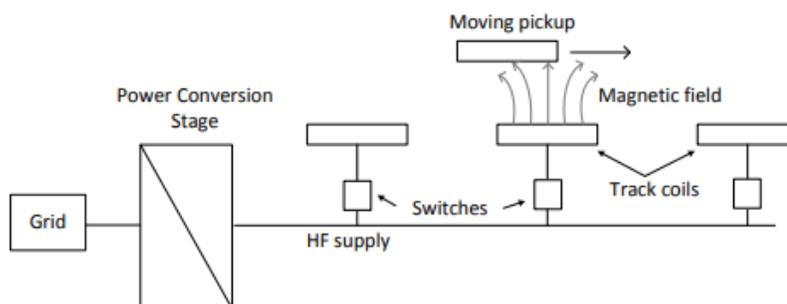
condensatori connessi ai solenoidi, per creare un sistema risonante. Queste tecnologie vengono ormai utilizzate in molte situazioni che caratterizzano il nostro vivere quotidiano, essendosi sempre di più sviluppati dispositivi portatili caratterizzati da accumulatori di energia. L'alba dell'era dei telefoni cellulari a metà degli anni '90 ha anche stimolato la ricerca nella ricarica wireless per l'elettronica portatile. Così come la pubblicità di un articolo del team di fisici del M.I.T su "Science" del 1997 sull'uso di un sistema WPT a 4 bobine per alimentare una lampadina su una distanza di 2 m, fu un fattore importante che stimolò un intenso interesse per la ricerca di queste soluzioni. Diverso è l'ambito industriale dove lo sviluppo di applicazioni che usano questa tecnologia sono ancora poco in uso essendo una tecnologia che presenta ancora poca affidabilità in termini di sicurezza. La ricerca universitaria di origine industriale però si sta sempre più indirizzando verso lo sviluppo di tecnologie che permettono di raggiungere risultati di eccellenza. La tecnologia wireless è inoltre vista come sinonimo di innovazione che non può sicuramente passare inosservata dai tecnici progettisti e dai responsabili marketing delle aziende di maggior rilievo. La tecnologia WPT innanzitutto è una forma di trasmissione di energia sicura, economica, non sensibile alle condizioni atmosferiche, e duratura. Inoltre, permette uno standard di ricarica per tutti i veicoli che adottano tale sistema, evitando la complessa omologazione dei diversi dispositivi presenti ad oggi. L'aumento, nel corso degli ultimi decenni, della sensibilità da parte delle popolazioni su temi come la sostenibilità dell'ecosistema dovuto al progressivo aumento dei gas serra e di anidride carbonica nell'ambiente, gli ha senz'altro garantito un posto di riguardo nelle scelte future. Il settore dei trasporti, che usa quasi totalmente derivanti del petrolio, rappresenta uno dei maggiori produttori di inquinanti e quindi è un campo fertile per l'innovazione affinché si raggiungano i migliori risultati per la salvaguardia dell'ambiente.

## 2.2. Tipologie di WPT

Un generico circuito per il trasferimento di potenza elettrica senza fili è composto da due sezioni principali elettricamente isolate tra loro e più o meno complesse: il circuito trasmettitore detto primario o track e il circuito ricevitore detto secondario o pickup. Ci sono inoltre due tipi di track: distribuito e concentrato.



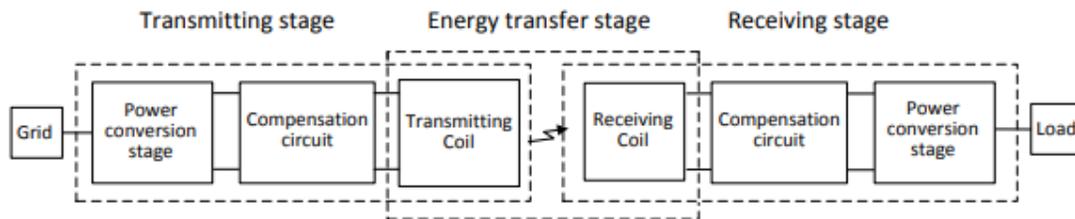
**Figura 16: Sistema di Track-Pickup distribuito**



**Figura 17: Sistema di Track-Pickup concentrato**

Nella disposizione con i track distribuiti la lunghezza di questo è maggiore della lunghezza delle bobine poste sul veicolo e quindi queste restano accoppiate con la medesima bobina del track per un arco di tempo piuttosto lungo della corsa del veicolo. Diversamente nei track concentrati essendo la lunghezza delle bobine circa uguale a quella del pickup, i due dispositivi restano accoppiati per un intervallo sicuramente più breve. La realizzazione di questi sistemi richiede di elettrificare il pavimento del reparto produttivo con più bobine trasmettenti, mentre è sul veicolo che viene posta la bobina ricevente. L'obiettivo di un WPT

è quello di portare potenza dalla rete elettrica ad un carico elettrico che per varie ragioni non può essere raggiunto da una connessione. Tra il circuito trasmittente e la rete è necessario l'utilizzo di un convertitore statico per garantire il corretto trasferimento di energia. Allo stesso modo viene utilizzato un convertitore statico anche tra il carico e la parte del ricevitore in modo da alimentarlo in modo ottimale.



**Figura 18: Apparato per il trasferimento wireless di energia**

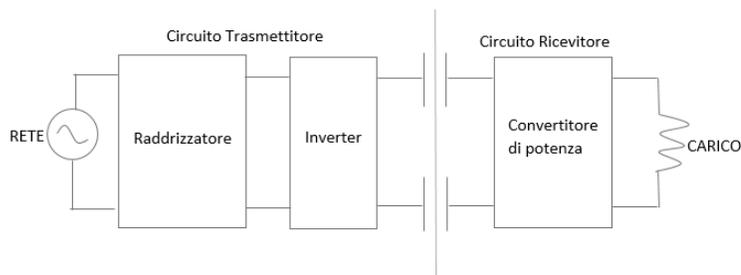
È la parte del circuito trasmettitore che crea un campo sinusoidale che utilizza l'aria come mezzo per raggiungere la parte del circuito ricevitore il quale, riesce a raccogliere l'energia per trasmetterla al carico ad esso collegato. Il campo coinvolto può essere di tre tipi a seconda della tipologia di accoppiamento utilizzato, e di conseguenza anche l'energia coinvolta nel campo sarà differente nei tre casi:

1. WPTS capacitivo (Campo elettrico)
2. WPTS induttivo (Campo magnetico)
3. WPTS radiativo (Campo elettromagnetico)

### 2.2.1 WPT capacitivo

Questi sistemi insieme a quelli induttivi fanno parte delle tecnologie di trasmissioni di potenza senza fili non radiative e quindi a corto raggio. I WPT capacitivi utilizzano come sistema di accoppiamento due piastre di metallo trasmettenti e due riceventi messe una di fronte all'altra. È per mezzo di un ponte a diodi che l'energia della rete viene trasformata da un segnale alternato in uno unidirezionale, per poi ritrasformarla in corrente alternata ad alta

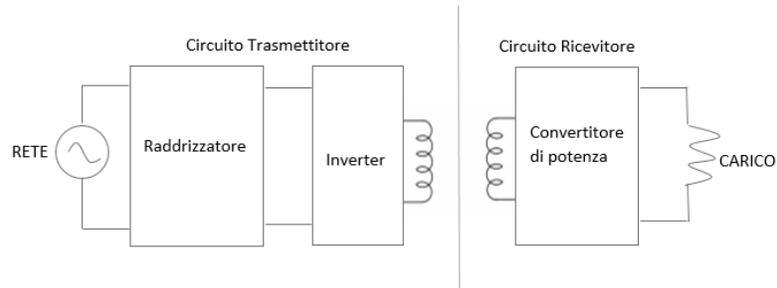
frequenza da un inverter. È tramite quest'ultimo che le due piastre dal lato del circuito trasmettitore, accostate alle piastre dal lato ricevitore, formano un campo elettrico tra di loro. Il loro più grande vantaggio è quello di poter essere utilizzati anche in ambiente caratterizzati da forti campi magnetici esterni, di contro il loro svantaggio riguarda la scarsa densità di energia che possono immagazzinare rendendola una tecnologia sicuramente meno performante. Di questi caricabatteria capacitivi non esistono inoltre molte applicazioni nel mondo reale, data la loro scarsa potenza.



**Figura 19: Sistema di WPT capacitivi**

### 2.2.2 WPT induttivo

Nei dispositivi di trasmissione di energia di tipo induttivi i sistemi di accoppiamento sono due bobine, una sul lato track e uno sul lato pickup. Per garantire un'elevata efficienza energetica, necessita di bobine con bassa resistenza per il funzionamento ad alta frequenza con una rete di alimentazione anch'essa ad alta frequenza. È la bobina trasmittente che genera un campo magnetico concatenando la bobina ricevente creando una tensione alternata sul lato ricevente. Questa tensione viene poi convertita per essere utilizzata dal carico. Diversamente da quanto visto precedentemente, queste sono soluzioni che producono onde elettromagnetiche e comportano la nascita di correnti parassite nei metalli. Tali dispositivi sono sicuramente quelli maggiormente utilizzati nello scenario attuale dei caricabatteria wireless.



**Figura 20: Sistema di WPT induttivo**

### 2.2.3. WPT radiativo

Il funzionamento dei WPT radiativi, infine, si basa sull'utilizzo di fasci di radiazione elettromagnetica, come microonde o raggi laser, tra il circuito trasmettitore e quello ricevitore e rientrano nei dispositivi di trasmissione di energia senza fili a lunga distanza o a lungo raggio. Il loro dimensionamento è strettamente correlato alla lunghezza dell'onda elettromagnetica inviata, dovendo rispettare dei limiti consentiti sulle loro possibili dimensioni. Trovano applicazione su larga scala in campo aerospaziale, con una maggiore difficoltà invece sul campo automobilistico dato il costo e l'eccessiva complessità impiantistica della soluzione.

### 2.3. Metodi di ricarica wireless per veicoli elettrici: STATICA e DINAMICA

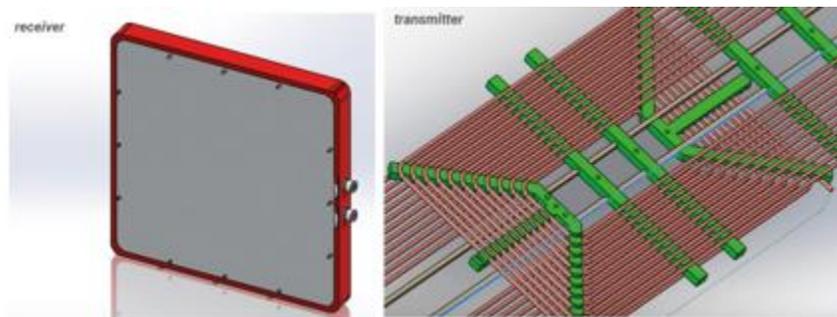
L'insorgere sempre più in maniera incalzante di queste nuove tecnologie hanno consentito negli anni di sperimentare diverse soluzioni di ricarica wireless. Quelle maggiormente affermate oggi sono la ricarica statica del veicolo per cui si parla di Stationary Wireless Charging, in cui il veicolo deve sostare in una area del magazzino per poter essere ricaricato, rimanendo anche per diverse ore non utilizzabile, e la ricarica dinamica per questo si parla di Dynamic Wireless Charging, in cui il veicolo durante lo svolgimento delle sue abituali operazioni transitando su determinate aree del magazzino provviste di un sistema di bobine trasmettenti riesce a ricaricarsi eliminando la necessità di dover essere parcheggiato a lungo

prima di poter di nuovo essere utilizzato, soppiantando l'inconveniente principio dei veicoli elettrici ovvero la limitata autonomia delle batterie. Questa è la soluzione sicuramente più ambiziosa e quella proposta nel seguente progetto di tesi. La ricarica WPT sia essa statica che dinamica dei veicoli elettrici presenta molti vantaggi quale l'eliminazione della ricarica tramite colonnine pubbliche o private, consente l'aumento della distanza di trasmissione della potenza da millimetri a diversi centimetri. Tuttavia, ci sono ancora molti problemi nella commercializzazione di questi sistemi di ricarica. Le principali difficoltà riguardano: il raggiungimento di efficienze di trasferimento di potenza accettabili, la necessità di tolleranze più ampie relative al disallineamento tra la bobina trasmettitore e ricevitrice in quanto solo una sezione della pavimentazione viene alimentata da queste bobine riducendo il coefficiente di accoppiamento. Sebbene il principio fisico che sta alla base di questa tecnologia trova le sue fondamenta da tempi molto più lontani, solo nell'ultimo decennio è stata mostrata un'efficace ricerca e commercializzazione di soluzioni che si basano su tale principio.

#### **2.4. Principio di funzionamento: BIBERONAGGIO**

I caricabatteria, vengono installati nei punti di maggior transito nel percorso dei veicoli industriali per garantire la ricarica continua durante le attività giornaliere, o anche durante l'esecuzione di una operazione. Il processo non necessita di nessun particolare intervento da parte degli operatori per la ricarica ma è totalmente automatico ovvero sono i mezzi che trovandosi in una stazione di ricarica, opportunamente segnalata all'interno del magazzino, effettueranno un ciclo di biberonaggio durante la propria marcia tra uno scaffale e l'altro del magazzino. Con il termine biberonaggio come suggerisce la parola stessa si intende la ricarica parziale delle batterie poste sul veicolo elettrico. Oggi, i metodi maggiormente in uso per ricaricare le batterie dei carrelli elettrici industriali prevedono o nella completa rimozione del pacco batterie esausto sostituendolo con un altro carico o nella tecnologia della ricarica "veloce". Per evitare di mettere a rischio la sicurezza del personale, essendo operazioni precise e delicate, bisogna essere provvisti di operai altamente qualificati, e questo si traduce in costi più elevati e tempi anche necessari alla formazione di questi operai. A porsi come possibile futuro nella logistica della ricarica senza fili è la start up spin-off del Politecnico di Torino *ENERMOVE*. Nasce nel maggio 2019, offrendo sistemi per la ricarica wireless induttiva sia di tipo dinamico che statico per carrelli elevatori e sistemi di guida autonoma

(AGV). L'idea nasce grazie all'esperienza dell'imprenditore torinese Flavio Cavallo, sulla trazione elettrica. L'installazione dell'impianto avviene attraverso una precedente analisi necessaria ad individuare le aree dello stabilimento maggiormente raggiunte dal carrello, in modo da adottare l'alternativa più funzionale all'esigenze del cliente. Enermove ha avuto come obiettivo principale il proporre un sistema di facile adattamento nella forma, dimensione e numero di bobine. Il sistema è basato sulla tecnologia dell'accoppiamento magnetico ovvero Inductive Power Transfer (IPT) utilizzando come dispositivi di accoppiamento due bobine, una fissa a terra, detta trasmittente, ed una posta al di sotto del veicolo, detta ricevente.



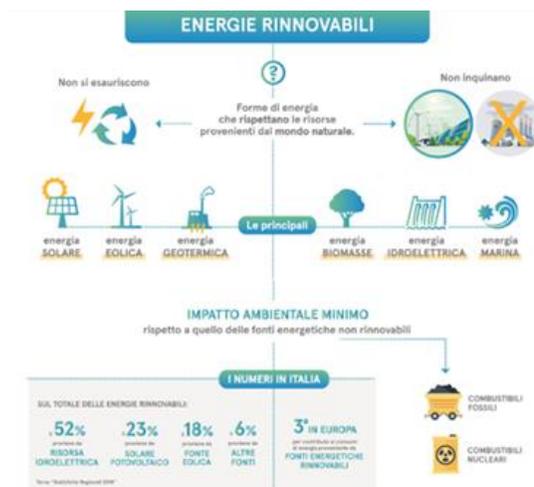
**Figura 21: Receiver e Transmitter**

La bobina trasmittente è alimentata tramite l'utilizzo di un convertitore DC/AC che fa sì che nella bobina circoli una corrente alternata ad alta frequenza. Questa corrente alternata va a generare un campo magnetico che viene concatenato ai capi della bobina ricevente creando una tensione alternata. Se alla bobina si va a collegare un circuito, si dà luogo alla circolazione di una corrente consentendo di trasferire potenza dalla bobina trasmittente a quella ricevente senza che ci siano alcun tipo di contatti elettrici.



**Figura 22: Schema della tecnologia Enermove**

A seconda del tipo di stato di carica che viene richiesto al veicolo, questo può trovarsi in stato di alimentazione anche per un tempo continuo durante il turno di lavoro mettendo in atto il maggior vantaggio di questa soluzione ovvero l'eliminazione dei tempi morti necessari alla ricarica. Non è inoltre da sottovalutare il fatto che si parla di una tecnologia particolarmente adatta all'uso di sistemi che si basano sull'importanza delle fonti rinnovabili. Sono forme di energia che rispettano le risorse provenienti dal mondo naturale. Hanno il vantaggio di non inquinare e non si esauriscono, dal momento che hanno la capacità di rigenerarsi a fine ciclo. Hanno fatto il loro ingresso anche nel nostro Paese da tempo e si stanno sempre più affermando come energia del futuro, a disposizione di tutti, economica e pulita.



**Figura 23: Energie rinnovabili**

In un anno complicato per il settore industriale, nel quale le misure di contenimento per il Covid-19 hanno reso molto dura la vita di tantissime aziende, dal commercio all'ingrosso fino al dettaglio, dai trasporti alla ristorazione, per tante aziende è stata l'occasione per abbracciare l'innovazione e il cambiamento tecnologico.

Tra le aziende di maggior rilievo che sono stata piacevolmente colpite da programma Enermove vi è sicuramente la Michelin che ha scelto di sperimentare la tecnologia Enermove, cercando di migliorare la gestione e il monitoraggio dell'energia, eliminando le problematiche del cambio o ricarica batterie il tutto finalizzato all'operatività dei carrelli elevatori e quindi del reparto produttivo.

## **2.5. Vantaggi e Svantaggi dei dispositivi WPT**

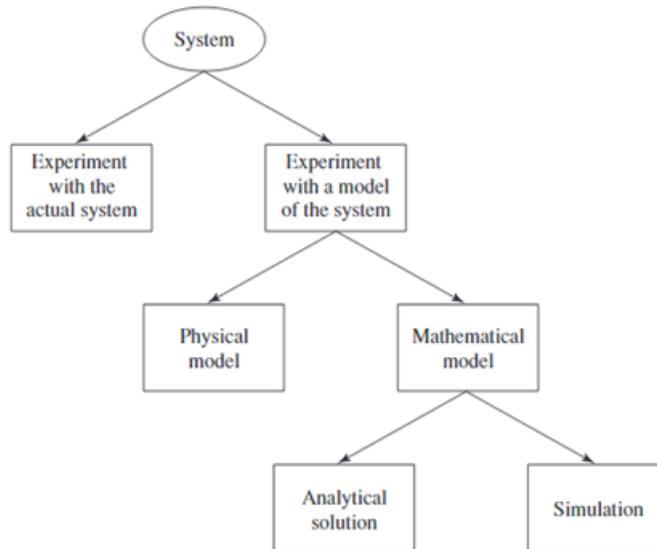
Nei sistemi di ricarica wireless basandosi sull'esigenza, durante la ricarica, che le due bobine siano poste in un accoppiamento induttivo, viene prodotta una differenza di potenziale tra la bobina ricevente e trasmittente, instaurando quella che viene definita trasmissione energetica a corto raggio. Tali sistemi oltre a garantire una maggiore longevità del veicolo stesso, permettono di ridurre gli inconvenienti legati a malfunzionamenti degli impianti elettrici in quanto non occorre far fronte a eventuali problemi di isolamento dei cavi prevenendo inoltre, i fenomeni di corrosione e di folgorazione in caso di contatto. I principali vantaggi di questa tecnologia sono che non occupa rilevanti aree dello stabilimento, può essere utilizzata su tutti i veicoli industriali, non comporta la modifica dell'impianto elettrico del reparto e soprattutto elimina i tempi legati alle operazioni di sostituzione batteria e ricarica, ovvero i fermi macchina. Il principale problema di questa tecnologia è sicuramente l'esposizione alle emissioni elettromagnetiche a cui viene sottoposto l'operatore, data la formazione di un campo magnetico, tra la bobina trasmittente e ricevente. Il campo non può essere schermato e inoltre la distanza tra le due bobine crea la presenza anche di campi dispersi. Da qui la necessità di verifica, per ogni sistema, che il campo soddisfi le normative vigenti in ogni Paese. Il telaio del veicolo e altre parti, fortunatamente sono fatte di acciaio in modo da schermare l'interno della vettura e le immediate vicinanze. Sono dispositivi sicuramente più costosi, costo spiegato dalla loro maggiore complessità soprattutto dal punto di vista tecnologico e per tutti i componenti necessari al loro funzionamento. Un costo maggiore viene richiesto anche dalla necessità di lavorare con una rete altamente complessa, data

l'esigenza da parte delle bobine di una corrente ad alta frequenza. Tali dispositivi, inoltre, richiedono la standardizzazione sia delle bobine riceventi, che trasmittenti. Inoltre, le bobine stesse sono caratterizzate da materiali costosi. Nonostante tutti questi inconvenienti le numerose organizzazioni che si occupano di monitorare il livello di inquinamento del nostro pianeta non possono che favorire ed incentivare la promozione di sistemi di questo tipo, volti al raggiungimento delle principali sfide ambientali che riguardano il mondo intero, e mai come oggi l'attenzione verso il mondo elettrico si sta rilevando una vera e propria rivoluzione tecnologica e ambientale che le aziende non possono non tenere in considerazione.

### 3. CAPITOLO

#### IL MONDO DELLA SIMULAZIONE

Secondo la definizione di Robert E. Shannon (1975): “dato un sistema e definito un modello di tale sistema, la simulazione consiste nell’uso del modello stesso per la riproduzione cronologica degli stati del modello, che è considerata come la storia del sistema modellato”. Con il termine simulazione è possibile riprodurre l’evoluzione di un sistema reale mediante l’uso del computer. La simulazione è uno strumento molto efficace che si avvale delle soluzioni di calcolo offerte dall’informatica; permette la realizzazione in termini logico-matematica-procedurali di un "modello concettuale" della realtà. Questo può essere definito come l’insieme dei processi che si manifestano nel sistema che si vuole studiare permettendo di comprendere le logiche di funzionamento del sistema stesso. Il funzionamento di un sistema è “simulato” utilizzando delle distribuzioni di probabilità per creare gli eventi del sistema e dal sistema simulato si ottengono statistiche sulle prestazioni dello stesso. Il primo passo da eseguire affinché tutto questo possa essere realizzato è definire un modello di simulazione, che descrivere le operazioni di un sistema e come esse debbano essere simulate. La simulazione è un mezzo potentissimo, in grado di fornire molte informazioni utili, semplicemente osservando la realtà con un elevato livello di dettaglio e gestendo facilmente la complessità che il sistema può avere. Lo scotto da pagare per tale completezza è ovviamente il tempo. Le strategie di programmazione possono essere infatti, molto lunghe prima di ottenere dei dati realmente sensati e soprattutto in grado di fornire un modello che ne rappresenti a pieno le caratteristiche. Nella figura sottostante è rappresentato uno schema che ci permette di capire i modi in cui un sistema può essere studiato:



**Figura 24: Il modo di studiare un sistema**

Un sistema è sostanzialmente definito come un insieme di entità, ad esempio persone o macchine, che collaborano insieme per il raggiungimento di un fine logico. È possibile classificare i sistemi in due tipologie, discreti e continui. Si parla di sistemi discreti quando le variabili di stato cambiano istantaneamente in punti diversi nel tempo. Una banca è un esempio di sistema discreto, poiché le variabili di stato, ovvero il numero di clienti nella banca, cambiano solo quando un cliente arriva o quando un cliente finisce di essere servito dall'operatore postale e quindi se ne va. Un sistema continuo invece, è quello per cui le variabili di stato cambiano continuamente rispetto al tempo, un aereo è un esempio di sistema continuo, poiché le variabili di stato, ovvero posizione e velocità possono cambiare continuamente nel tempo. Il sistema può essere inoltre studiato o attraverso esperimenti sulla base del sistema effettivo o sulla base di un modello del sistema. Se è possibile conviene sempre alterare fisicamente il sistema e poi lasciarlo funzionare in queste nuove condizioni, in modo da non avere dubbi sulla validità di ciò che studiamo. Tuttavia, è raramente possibile farlo, perché un simile esperimento potrebbe essere troppo costoso e distruttivo per il sistema. Per questo si preferisce operare con un modello del sistema. Questo, a sua volta, può essere fisico o matematico. La parola "modello fisico" può evocare immagini complesse come quelle di macchine di argilla nelle gallerie del vento, cabine di pilotaggio scollegate dai loro aeroplani per essere utilizzate nell'addestramento dei piloti o superpetroliere in miniatura, per

questo la stragrande maggioranza dei modelli costruiti sono matematici, in quanto permettono di rappresentare un sistema in termini di relazioni logiche che vengono poi gestite e modificate per valutare come il modello reagisce. Il modello matematico poi si compone di una soluzione analitica e di una simulativa. La simulazione viene applicata quando la prototipazione o la sperimentazione con il sistema reale è costosa o impossibile. Come nel caso in esame, validare dove è più conveniente inserire le bobine di ricarica per i veicoli elettrici in un reparto aziendale risulta costoso e impossibile, se non tramite prima uno studio simulativo del modello analitico. Consente infatti, l'ottimizzazione dei sistemi prima dell'implementazione, include il processo di mappatura del problema dal mondo reale al mondo dei modelli. Il primo passo, infatti, è stato quello di progettare sul software la realtà aziendale su cui operare. Nel modello analitico, il risultato dipende funzionalmente dall'input, che è possibile implementare tramite un foglio di calcolo. Tuttavia, la soluzione analitica non esiste sempre o può essere, a volte, anche molto difficile da trovare, ed è proprio su questo fronte che fa capolino l'efficienza della simulazione, anche detta modellazione dinamica. Un modello di simulazione è definito tramite un insieme di regole (ad esempio equazioni, diagrammi di flusso) che definiscono come il sistema modellato cambierà in futuro, dato il suo stato attuale. La simulazione è il processo di "esecuzione" del modello analitico e porta quest'ultimo a cambiamenti di stato (discreti o continui) nel tempo. In ambiti in cui la dinamica del tempo è essenziale, il mondo della simulazione è la risorsa migliore. Associare ad un sistema un modello significa sostituirlo con qualcosa di più semplice, ma comunque sempre fedele all'originale nelle sue caratteristiche. L'utilizzo di modelli definiti da un calcolatore, come strumento di aiuto decisionale è molto frequente.

È utile a questo scopo classificare i modelli di simulazione lungo tre diverse dimensioni:

- Statici vs Dinamici: a seconda del ruolo che le variabili hanno nel tempo;
- Deterministici vs Stocastici: a seconda della presenza o meno dell'elemento casuale;
- Continui vs Discreti: a seconda di come il sistema si evolve nel tempo.

A causa dell'aumento dei consumi e della necessità che un gran numero di prodotti finiti sia pronto per la consegna e dei tempi di attesa più brevi, la logistica e la gestione del magazzino stanno diventando problemi pratici sempre più gravi in un ambiente industriale. Per questo

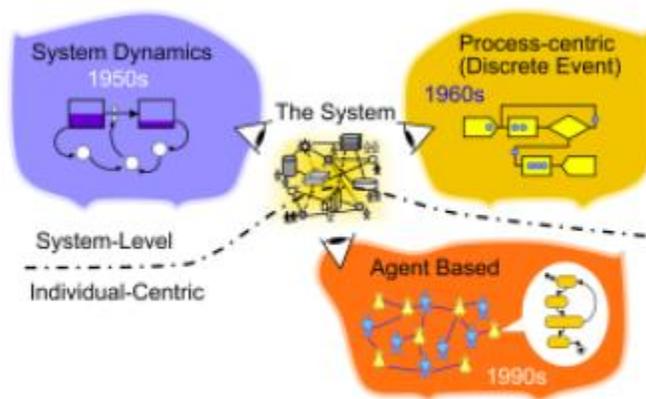
lo scopo del paragrafo successivo è introdurre il software utilizzato per simulare il sistema di ricarica wireless di un carrello elevatore. Il programma è in grado di soddisfare le necessità degli utenti occasionali, dei principianti e degli utenti più esperti con lo scopo di simulare impianti industriali di qualsiasi livello di complessità e dettaglio. Consente la programmazione utilizzando il linguaggio di programmazione Java. Ha molteplici funzioni che consentono di migliorare l'efficienza di progetti di fabbrica e sistemi complessi: animazione grafica in realtà virtuale 3D, modellazione interattiva e modelli di movimento predefiniti. Nonostante le diverse applicazioni in cui vengono usati modelli di simulazione, alla base di tutti c'è un numero di componenti comuni ed esiste un'organizzazione logica per questi componenti.

### 3.1. Anylogic

L'interesse nei primi anni Novanta su come modellare e simulare sistemi di vita reale ha portato il gruppo di ricerca in Network di Computer Distribuiti (DCN) della Technical University di San Pietroburgo a implementare un software per l'analisi della correttezza dei programmi; questo strumento prese il nome di COVERS (CONcurrent VERification and Simulation). Il software è uno strumento di simulazione multi-metodo, che permetteva la modellazione delle strutture e dei comportamenti dei sistemi attraverso una notazione grafica. Nel 1998, il successo di questo esperimento ha portato a fondare una nuova società con l'obiettivo di sviluppare software di simulazione di nuova generazione. L'obiettivo principale: l'applicazione di metodi quantitativi ovvero simulazione, analisi delle prestazioni, comportamento stocastico del sistema e ottimizzazione. Il nuovo software è stato rilasciato nel 2000 e include l'ultimo livello di informatica: un metodo di programmazione orientato agli oggetti tramite l'uso di Java, come linguaggio di programmazione e una moderna

interfaccia grafica. Allo strumento venne dato il nome di  (letteralmente: ogni logica), caratterizzato da tre principali paradigmi di simulazione ovvero:

- Agent-based: orientati agli agenti;
- System Dynamics: orientati alle attività;
- Discrete-event: orientati ai processi.



**Figura 25: Le tre tipologie di simulazione**

### **AGENT-BASED**

La modellazione Agent-based è un metodo di modellazione più recente rispetto alle altre due metodologie. Fino all'inizio degli anni 2000, questa modellazione era soltanto un argomento accademico ma l'incalzante richiesta di ottimizzazione del mercato globale ha portato ingegneri, modellatori e la ricerca operativa stessa, a studiare sistemi combinati per ottenere una più profonda comprensione di processi di natura molto diversa. L'adozione di questa da parte di professionisti della simulazione è iniziata soltanto nel 2002-2003. La sua nascita si basa dal desiderio di ottenere una visione più approfondita dei sistemi che non sono valutabili dagli approcci di modellazione tradizionali. La modellazione basata su agenti suggerisce quindi al modellatore un altro modo di vedere il sistema. Sebbene sia possibile trovare una serie di varie definizioni di modellazione basata su agenti in letteratura, dal punto di vista delle applicazioni pratiche questa modellazione può essere definita semplicemente come un approccio essenzialmente incentrato sull'individuo. Quando si progetta un modello basato su agenti, il modellatore identifica gli agenti attivi (che possono essere persone, aziende, progetti, risorse, veicoli, città, animali, navi, prodotti, ecc.), definendone il comportamento (fattori principali, reazioni, storia), li inserisce in un determinato ambiente, magari stabilisce delle connessioni ed esegue la simulazione. Il comportamento globale (a livello di sistema) emerge quindi come risultato delle interazioni di molti comportamenti individuali. L'Agent-

Based, viene utilizzata in tutti i livelli di astrazione, permettendo all'agente di modellare oggetti di diversa natura e origine.

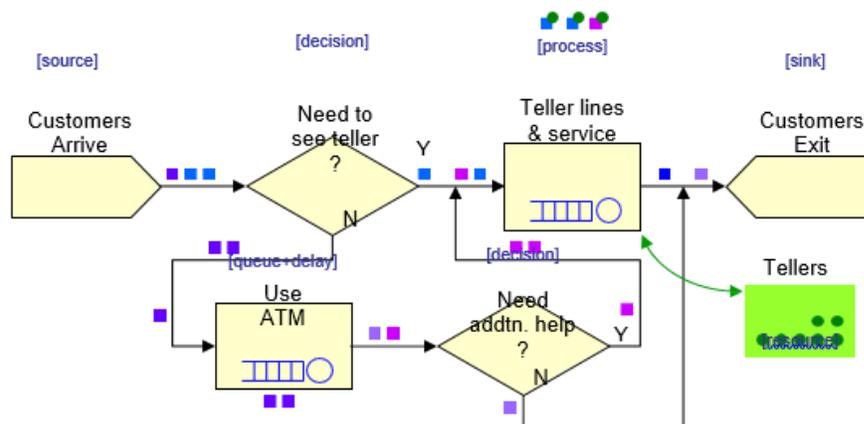
### **SYSTEM DYNAMICS**

“La dinamica dei sistemi è una prospettiva e un insieme di strumenti concettuali che ci consentono di comprendere la struttura e le dinamiche di sistemi complessi. La dinamica dei sistemi è anche un metodo di modellazione rigoroso che ci consente di costruire simulazioni informatiche formali di sistemi complessi e di utilizzarle per progettare politiche e organizzazioni più efficaci”. Così definisce il System Dynamics John Sterman, dal suo "Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World". Il System Dynamics è un metodo creato a metà degli anni '50 dal professor Jay Forrester del MIT la cui idea era quella di utilizzare le leggi della fisica, in particolare le leggi dei circuiti elettrici, per descrivere e indagare le dinamiche dei sistemi economici e, successivamente, sociali. L'approccio System Dynamics riguarda principalmente i processi continui, mentre gli eventi discreti e gli Agent-Based lavorano principalmente con tempi discreti. Il System Dynamics, che si occupa di aggregati, è ovviamente utilizzato per simulare il più alto livello di astrazione.

### **DISCRETE-EVENT**

È possibile riservare il termine "modellazione a eventi discreti" per l'approccio basato sul concetto di entità, risorse e grafici a blocchi che descrivono il flusso di entità e la condivisione delle risorse. La modellazione di eventi discreti è vecchia quasi quanto la System Dynamics. Nell'ottobre 1961, l'ingegnere IBM Geoffrey Gordon ha introdotto la prima versione di GPSS (General Purpose Simulation System, originariamente Gordon's Programmable Simulation System), che è considerato il primo metodo di implementazione software della modellazione ad eventi discreti. Oggigiorno, la modellazione di eventi discreti è supportata da un gran numero di strumenti software, comprese le versioni moderne dello stesso GPSS. In essa

viene utilizzato un livello di astrazione medio-basso, con il diagramma di flusso che rispecchia i passaggi sequenziali che avvengono nel sistema fisico. Mentre nel System Dynamics si aggregano singoli oggetti e si parla della dinamica delle loro quantità, nella modellazione ad eventi discreti ogni oggetto nel sistema è rappresentato da un'entità o un'unità di risorse e mantiene la sua individualità. Le entità e le risorse possono avere attributi, possono differire l'una dall'altra e possono essere trattate in modo diverso all'interno del processo. Nei modelli ad eventi discreti, i ritardi possono essere deterministici o stocastici con qualsiasi distribuzione di probabilità. Ci sono molti strumenti commerciali che supportano questo stile di modellazione, alcuni sono di uso generale, altri mirano a nicchie particolari: servizio, produzione, logistica, processi aziendali, call center. Le loro interfacce utente possono sembrare molto diverse a causa della specializzazione degli strumenti, ma sotto, tutti hanno motori di simulazione di eventi discreti simili che spingono le entità attraverso i blocchi. Ai fini di questa indagine, l'obiettivo è sottolineare che la modellazione DE può essere considerata come la definizione di un algoritmo di elaborazione di entità globale, tipicamente con elementi stocastici. La simulazione di eventi discreti riguarda la modellazione di un sistema mentre evolve nel tempo mediante una rappresentazione in cui le variabili di stato cambiano istantaneamente in punti separati nel tempo. Questi punti nel tempo sono quelli in cui si verifica un evento, dove un evento è definito come un evento istantaneo che potrebbe cambiare lo stato del sistema. Nella figura viene rappresentata una tipica situazione giornaliera: la coda che un cliente deve attendere per poter essere servito in un ufficio postale. L'arrivo dei clienti è rappresentato dal blocco di origine del diagramma, a seconda che questi debbano parlare con un dipendente postale o debbano semplicemente prelevare denaro dallo sportello ATM, vengono separati su due piani del diagramma. Quello superiore destinato al primo caso e quello inferiore destinato al secondo caso. Entrambi i clienti vengono messi in fila, questa scorre ogni volta che l'operazione è stata eseguita. È possibile passare dal prelievo di denaro al poter parlare con un operatore se il cliente ha bisogno di un ulteriore aiuto nel compiere certe trattative. Una volta terminata l'operazione il cliente può lasciare il diagramma e quindi realmente la banca.



**Figura 26: Schema di un diagramma di flusso per un sistema ad Eventi Discreti**

Il software permette al modellatore di combinare questi approcci di simulazione all'interno di uno stesso modello, e la cosa più importante è che non esiste un ordine fissato in cui questi sistemi possono essere utilizzati. AnyLogic è il software di modellazione di simulazione per applicazioni aziendali, utilizzato in tutto il mondo. Permette a ingegneri, analisti e manager di ottenere informazioni più specifiche per ottimizzare sistemi complessi in un'ampia gamma di settori quali: trasporti, produzione, catene di approvvigionamento, operazioni di magazzino, logistica ferroviaria, ecc. Include un linguaggio di modellazione grafica e consente inoltre agli utenti di estendere il modello di simulazione utilizzando codice scritto in Java. Inoltre, la versione professionale consente anche la creazione di applicazioni runtime Java che possono essere distribuite agli utenti. Queste applicazioni Java possono diventare la base degli strumenti software di supporto decisionale. La piattaforma per l'ambiente di sviluppo dei modelli è Eclipse. Questo approccio a linguaggio misto è applicabile a una vasta gamma di complessi problemi di modellazione, che possono essere simulati tramite qualsiasi approccio anche se con compromessi. Il linguaggio di simulazione AnyLogic è composto dai seguenti elementi:

- *diagrammi di stato (statechart)*: utilizzati soprattutto nella modellazione AgentBased e in quella Discrete Event;
- *diagrammi di scorte e flusso*: utilizzati nella modellazione System Dynamics;

- *diagrammi di azione*: vengono utilizzati per definire algoritmi. Possono essere utilizzati sia nella modellazione Agent-Based, sia in quella Discrete Event;
- *diagrammi di flusso di processo*: sono alla base della modellazione Discrete Event.

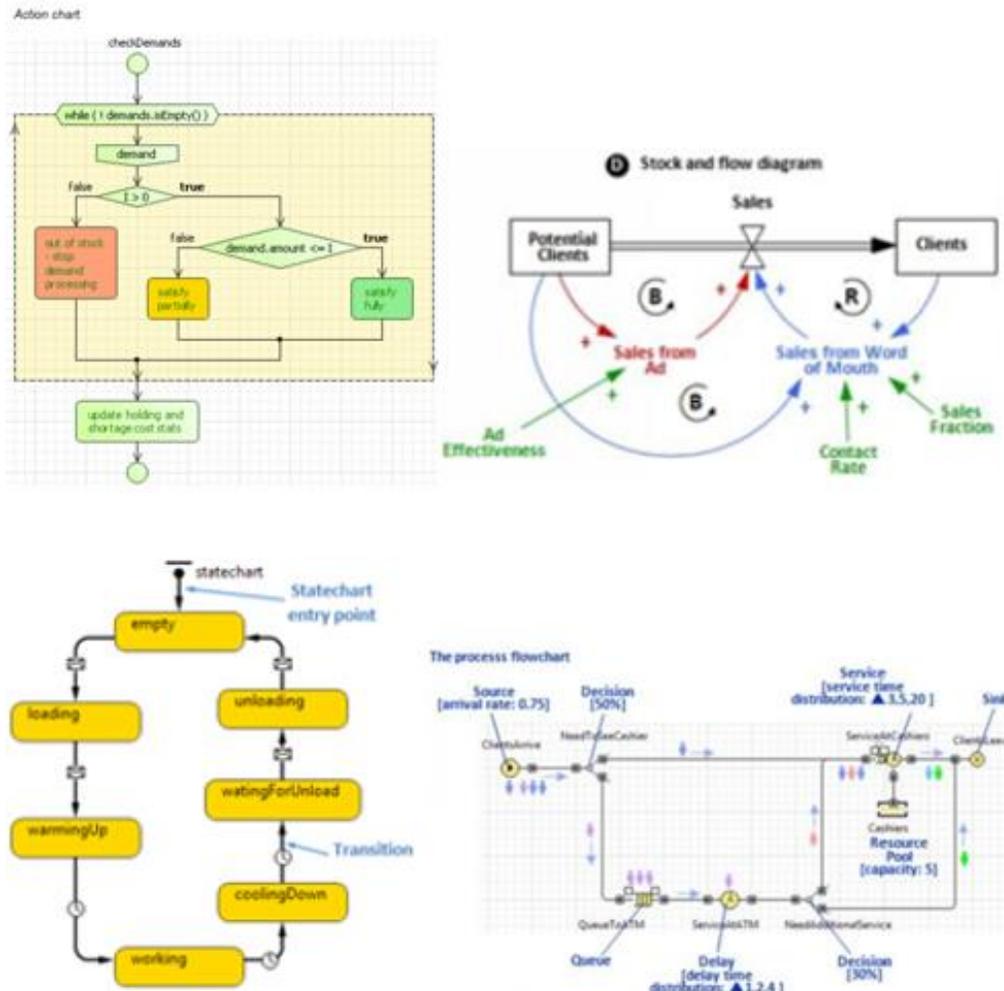


Figura 27: Tipologie di diagrammi utilizzabili in Anylogic

Alla base dell'utilizzo di Anylogic ci sono le seguenti librerie standard:

- **Process Modeling Library:** supporta il paradigma di modellazione a eventi discreti ovvero, è incentrato sui processi. Utilizzando gli oggetti Process Modeling Library è possibile modellare i sistemi del mondo reale in termini di agenti (transazioni, clienti, prodotti, veicoli, ecc.), processi (sequenze di operazioni che tipicamente coinvolgono

code, ritardi, utilizzo delle risorse) e risorse. I processi sono specificati sotto forma di diagrammi di flusso, una rappresentazione grafica ampiamente adottata utilizzata in molte aree. I diagrammi di flusso di AnyLogic sono gerarchici, estensibili e orientati agli oggetti, il che consente all'utente di modellare sistemi complessi di grandi dimensioni a qualsiasi livello di dettaglio. Un'altra caratteristica importante della Process Modeling Library è la capacità di creare animazioni molto sofisticate di modelli di processo. Questa libreria è quella che è stata usata nel progetto di tesi per la realizzazione del digramma di flusso necessario alla movimentazione del carrello elevatore.

- ***Material Handling Library***: è la libreria che gestisce materiali. Per questo dotata di blocchi come nastri trasportatori, gru per il sollevamento di oggetti. Questa libreria semplifica le operazioni di produzione più complessi. Viene utilizzata per rappresentare i dettagli di un impianto di stoccaggio e gestione dei flussi di lavoro dei materiali all'interno del reparto stesso, con l'obiettivo di ottimizzare le politiche di produzione, trasporto e inventario, oltre alla necessità di ridurre possibili errori e ritardi nel flusso operativo dei materiali di fabbrica. L'utilizzo di strategie di instradamento della merce per i robot industriali, per le macchine di produzione e per gli operatori rappresenta un'ottima soluzione alle difficili logiche di magazzino. Questa libreria è utilizzata soprattutto per la creazione di trasportatori come gli AGV, ovvero veicoli a guida autonoma che non hanno bisogno di un operatore per funzionare ma grazie a dei sensori vengono richiamati nelle varie zone del magazzino.
- ***Pedestrian Library***: dedicata alla simulazione dei flussi pedonali. Permette di simulare modelli di edifici pedonali (come stazioni della metropolitana) o strade. I modelli consentono di raccogliere statistiche sulla densità pedonale in diverse aree, per garantire prestazioni accettabili dei punti di servizio con carico ipotetico, stimare la durata della permanenza in aree specifiche. Nei modelli creati con Pedestrian Library, i pedoni si muovono in uno spazio continuo, reagendo a diversi tipi di ostacoli (modellati da elementi di markup dello spazio, come i muri) e altri pedoni.

- **Rail Library**: utilizzata per la creazione di cantieri ferroviari di qualsiasi dimensione, processi di mercato e altre attività di trasporto.

### **3.2. Passi da eseguire per creare un modello di simulazione**

Il modello una volta creato rappresenta un insieme di oggetti attivi che interagiscono tra loro, ma affinché questo sia possibile, il ciclo di vita di uno studio di simulazione deve essere suddiviso in più fasi, non necessariamente sequenziali, durante le quali possono sorgere problemi che costringono a tornare indietro nell'esecuzione. La simulazione richiede una conoscenza approfondita del problema che si sta affrontando, quindi si consiglia di utilizzare un metodo ben strutturato e testato, invece di perdere tempo per ottenere i dati e correre il rischio che la premessa sia sbagliata e dover ripetere alcune operazioni. Pertanto, gli input e gli output a cui ci si rivolge devono essere chiaramente definiti. Come qualsiasi altro ambiente di pianificazione, è necessario sviluppare un modello concettuale prima di iniziare a utilizzare il software di simulazione per sviluppare un modello. Un metodo sempre affidabile di agire nella creazione di un modello è il seguente:

#### **Definizione degli obiettivi e delle problematiche da esaminare**

Una simulazione richiede la conoscenza di un consistente numero di dati in diversi ambiti del progetto, è bene dunque avere ben chiaro ciò che si vuole ottenere dallo studio così da non tralasciare alcun aspetto. Deve essere esposto ed analizzato il problema in maniera dettagliata presentando domande specifiche a cui si vuole dare una risposta, obiettivi generali, software da utilizzare. È necessario conoscerlo a pieno in ogni sua parte, in modo tale da non doversi trovare di fronte a punti morti che costringano a tornare indietro di diversi passi alla ricerca di una soluzione. Per questo è necessario capire con quali strumenti si potrà rendere la simulazione il più possibile fedele all'originale che si vuole analizzare. Gli obiettivi possono essere di vario genere: analisi delle performance di un sistema, analisi di capacità necessaria per valutare se le risorse impiegate sono appropriate, ottimizzazione della soluzione migliore per il problema messo in atto, visualizzazione di una realtà non ancora esistente.

### **Acquisizione dei dati**

Una volta stabiliti gli obiettivi ed il modo con cui questi dovranno essere raggiunti, diviene essenziale raccogliere i dati di partenza in merito alle procedure operative del sistema che si andrà a simulare. È necessario chiarire subito il livello di dettaglio che si vuole raggiungere, in quanto modelli complessi potrebbero portare a soluzioni lontane dalla realtà così come modelli troppo semplici potrebbero portare a soluzioni approssimative. Tali dati devono essere poi inseriti in un database da utilizzare per ricavare da essi ulteriori informazioni. I dati possono spaziare dalle informazioni di tipo geometrico, come layout, dimensioni di magazzini, lunghezze e larghezze dei porta-pallet, dimensionamento delle unità di carico e dei pallet di trasporto, ai dati di tipo cinematico, come le velocità dei carrelli elevatori ed ancora sarà utile conoscere i tempi ciclo delle macchine e degli operatori manuali, la loro efficienza ed i loro eventuali momenti di pausa. La raccolta di queste informazioni rende possibile sviluppare un modello accurato e fedele alla realtà, e saranno i dati stessi che opportunamente combinati consentono di capire come cambiano le logiche dell'impianto. Questa fase di raccolta dati è sicuramente molto lunga ma essenziale per avere alla fine un modello che funzioni.

### **Definizione del modello concettuale**

Si tratta di ideare il modello concettuale tramite l'uso di diagrammi di flussi ovvero dei linguaggi grafici. Si disegnano i sistemi di trasporto, si posizionano le macchine, si impostano le logiche di instradamento dei prodotti. Non c'è virtualmente limite al livello di dettaglio che si possa raggiungere tramite una simulazione, in funzione del tempo che ci si può permettere di spendere sulla sua realizzazione, si può arrivare a simulare i percorsi esatti che gli operai compiono ogni giorno per raggiungere il posto di lavoro, così come si può mappare interamente un magazzino che contiene diverse decine di migliaia di pezzi al suo interno. Durante la fase di modellazione i progetti concettuali che erano stati fatti vengono dunque resi più tangibili e visibili, dando luogo ad una prima fase di correzione delle imperfezioni che subito possono saltare all'occhio, in particolar modo legate alla necessità di tradurre dei dati cartacei in dati informatici.

### **Implementazione del modello concettuale**

È sicuramente la fase più critica dell'intero progetto, finalizzata all'elaborazione delle funzioni che fanno da legante per tutto il sistema logico. Si traduce il modello concettuale in

un linguaggio di programmazione (Fortran, Matlab, C, Java, ecc) facendo uso di un software di simulazione (Arena, Automod, Witness, Anylogic, ecc).

### **Validazione**

Quando il modello è pronto non c'è altro da fare se non farlo girare e vedere se il suo comportamento corrisponde a quello che ci si aspetta nella realtà. Essendo la programmazione legata comunque a delle menti umane gli errori sono inevitabili, tanto più numerosi quanto più complesso è il modello che è stato creato. Durante la fase di validazione si passa al setaccio il modello in ogni suo componente funzionale, fino a quando tutto al suo interno non lavori come è stato programmato, trovando così la conformità tra modello e realtà.

### **Progettazione e realizzazione degli esperimenti**

Una volta che il modello funziona in ogni sua parte e che il suo funzionamento è accurato rispetto a quello dell'impianto che sta simulando, si può passare all'importantissima fase di sperimentazione, che consiste nel mettere alla prova il modello in diverse configurazioni o con diversi valori variabili, per vedere come reagisce e trovare una soluzione ottimale. I software di simulazione sono in grado di eseguire sperimentazioni equivalenti a mesi e mesi di funzionamento dell'impianto semplicemente in poche ore di elaborazione, rendendo finalmente davvero evidente il grande vantaggio che offre il simulare ovvero ricreare un impianto prima della sua realizzazione finale, scoprire un errore dopo giorni di avviamento di un impianto già acquistato è economicamente sconveniente rispetto allo scoprire lo stesso errore dopo pochi minuti di simulazione. Si tratta di minimizzare il numero di run simulativi necessari e massimizzare le informazioni ricavate.

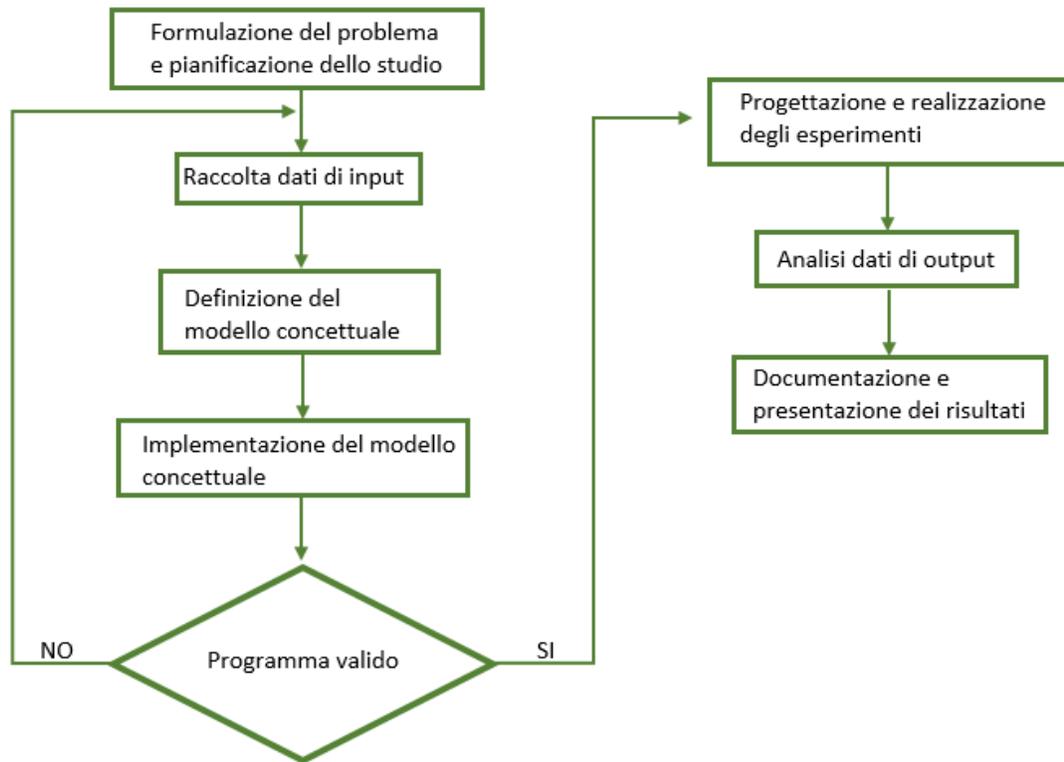
### **Analisi dati di output**

Consiste nel valutare i valori performance e paragonarli con quelli ottenuti. Per rendere il tutto più pratico si utilizzano tabelle e grafici in modo da evidenziare l'utilità del modello.

### **Documentazione e presentazione dei risultati**

Una volta che la sperimentazione ha dato i suoi frutti non resta che presentarli al cliente o all'ufficio acquisti, potendo contare su dati affidabili ed oggettivi ricavati proprio dal software di simulazione che ha eseguito la sperimentazione. I risultati ottimali possono essere usati nel successivo processo di ottimizzazione del sistema reale. In ognuna delle fasi sopra indicate potrebbero verificarsi situazioni in cui sia necessario tornare alla fase precedente. Seguendo

lo schema di seguito riportato si garantirà al lavoro di simulazione un'ottima flessibilità, riducendo i tempi di realizzazione a lungo termine e permettendo di intervenire in qualsiasi momento per apportare le modifiche che si riterranno opportune.



**Figura 28: Schema dei passi da eseguire nella realizzazione di un modello simulativo**

A causa della natura dinamica dei modelli di simulazione ad eventi discreti, dobbiamo tenere traccia del valore corrente del tempo simulato mentre la simulazione procede, e abbiamo anche bisogno di un meccanismo per far avanzare il tempo simulato da un valore all'altro. La variabile in un modello di simulazione che fornisce il valore corrente del tempo simulato è definito l'orologio di simulazione. Il tempo cioè diventa la variabile principale da legare all'evoluzione del sistema.

### 3.3. I vantaggi e le complessità della simulazione

Tra i principali vantaggi del modello di simulazione si riscontrano:

- Possibilità di analisi di sistemi complessi e reali che non possono essere descritti in maniera approfondita da un modello matematico. Pertanto, una simulazione è spesso l'unico tipo di indagine possibile;
- Elevata precisione del risultato ottenuto;
- Consente di avere un'idea delle prestazioni che può avere un sistema reale;
- In una simulazione si possono mantenere un controllo migliore sulle condizioni sperimentali;
- Possibilità di analizzare il sistema nel tempo.

La simulazione però non è priva di inconvenienti tra cui:

- Il modello di simulazione produce solo stime delle vere caratteristiche di un modello per un particolare insieme di input. Pertanto, saranno probabilmente necessarie diverse esecuzioni indipendenti del modello. D'altra parte, un modello analitico, se accurato, può spesso produrre facilmente le esatte caratteristiche di quel modello per una varietà di parametri di input. Pertanto, se un modello analitico "valido" è disponibile o può essere facilmente sviluppato, sarà generalmente preferibile a un modello di simulazione.
- I modelli di simulazione sono spesso costosi e richiedono molto tempo per lo sviluppo.
- Se un modello non è una rappresentazione "valida" del sistema in esame, i risultati della simulazione, non importa quanto appaiano impressionanti, forniranno poche informazioni utili sul sistema reale.

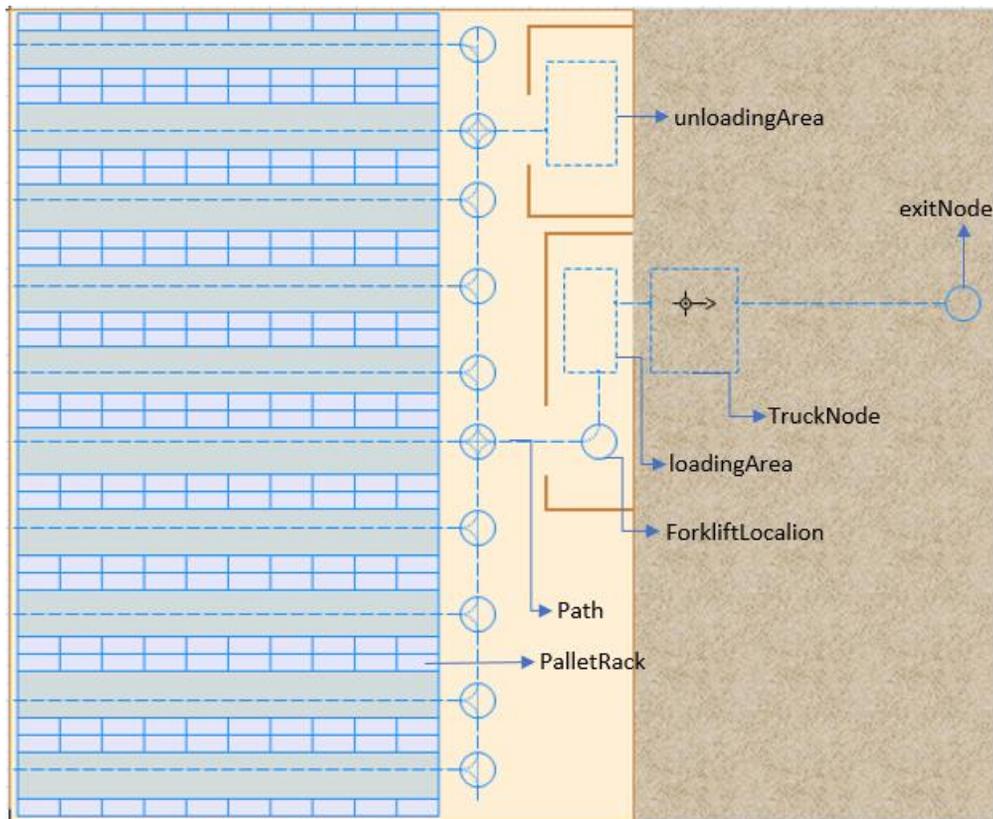
Si noti che i modelli di simulazione e di analisi possono essere utili in molti ambiti. In particolare, la simulazione può essere utilizzata per verificare la validità delle ipotesi necessarie nel modello di analisi. Questo è l'obiettivo di questa tesi, che è quello di utilizzare i dati di modellazione analitica precedentemente elaborati per valutare la loro efficacia nel mondo reale attraverso l'elaborazione di un modello simulativo.

## 4. CAPITOLO

### IL MODELLO DI SIMULAZIONE DI UN SISTEMA WPT

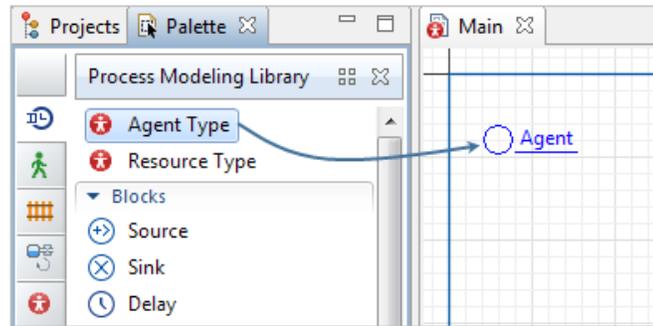
Sbagliare la progettazione di un nuovo reparto produttivo aziendale che utilizza una tecnica di ricarica wireless (quindi non così banale) può essere molto rischioso e anche costoso, non considerando le spesa da effettuare per ottimizzare al meglio il processo. Usufruire di una simulazione dinamica che ci permetta di studiare tutti i possibili scenari, prima di realizzare nella realtà il progetto, è sicuramente una scelta vincente, riuscendo a ridurre al minimo gli inconvenienti legati ai cambiamenti del sistema logistico. Con i sistemi di progettazione tradizionali sarebbe necessario sviluppare progetti più completi e ripetere ogni volta noiosi calcoli comparativi per determinare il progetto ottimale. La simulazione, invece, ci permette di confrontare il comportamento del nostro sistema in modo veloce, efficiente e, soprattutto, dinamico, variando semplicemente i parametri impostati, cosa che riduce notevolmente i tempi di lavorazione e, quindi, i costi di costruzione.

Dopo aver fornito una panoramica sul mondo della trasmissione di potenza wireless per veicoli elettrici e sul mondo della simulazione, si procede col dimensionamento di un reparto produttivo in cui è stata progettata tale soluzione, attraverso la simulazione ad eventi discreti dal punto di vista più impiantistico che magnetico. Come precedentemente annunciato il *primo passo* da eseguire è stato valutare gli obiettivi da perseguire, avendo ben chiari i risultati ricavati dal modello analitico. Alla base della seguente trattazione, infatti, c'è stata la volontà di riscontrare con il modello simulativo la veridicità del modello analitico, il cui studio è sempre a monte di ogni possibile simulazione. L'obiettivo principe è stato quello di creare una mappa delle posizioni ottimali delle bobine trasmettenti necessari alla ricarica dinamica dei veicoli industriali, avendo come base decisionale le zone del reparto produttivo maggiormente utilizzate dal carrello elevatore nell'esecuzione delle sue mansioni giornaliere. Il *secondo passo* è stato quello di ricreare, usando la progettazione grafica del programma, il reparto aziendale su cui lavorare e tutti gli oggetti che lo compongono. Il magazzino è largo 36 metri e lungo 47. È stato realizzato graficamente anche uno spazio esterno necessario allo scarico della merce, utilizzato dal camion adibito a tale ruolo.



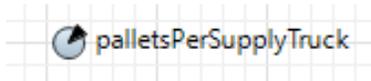
**Figura 29: Schema del magazzino**

Dalla figura è possibile notare come questo sia stato caratterizzato da una zona di carico detta *Loading Area* realizzata tramite l'uso di uno Space Markup, in particolare un rectangular node, e una zona di scarico detta *Unloading Area* realizzata nello stesso modo. La Loading Area è alimentata con della merce grazie all'arrivo di un Truck, ovvero un camion che arrivando in prossimità del *TruckNode* scarica una certa quantità di pezzi nella Loading Area, che poi il carrello elevatore distribuisce, seguendo una logica, nei vari *PalletRacks* ovvero negli scaffali. Sia il Truck che la merce, sono stati definiti come Agent Type della simulazione, creati semplicemente trascinando l'agente dalla Process Modeling Library nel Main del programma. Successivamente agli agenti sono stati assegnati un nome e una animazione.

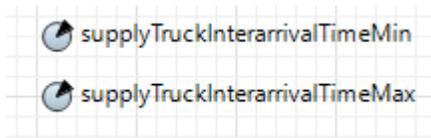


**Figura 30: Finestra per la creazione di un Agent Type**

Gli arrivi di questo camion così come i pezzi che questo è in grado di scaricare ogni volta sono gestiti da un *Parameter*, presente nell'Agent components. Gli oggetti attivi, infatti, possono essere caratterizzati da dei parametri. Questi sono spesso utilizzati per rappresentare alcune specifiche dell'oggetto modellato. Essi sono utili quando le istanze dell'oggetto hanno lo stesso comportamento descritto nella classe, ma differiscono per alcuni valori dei parametri. Tutti i parametri sono visibili e soprattutto modificabili durante l'esecuzione del modello. Così, si può semplicemente modificare il modello variando i parametri in fase di runtime. Se necessario, è possibile definire le azioni da eseguire su un cambio di parametro. Il parametro che governa quanti pezzi il camion è in grado di scaricare è:



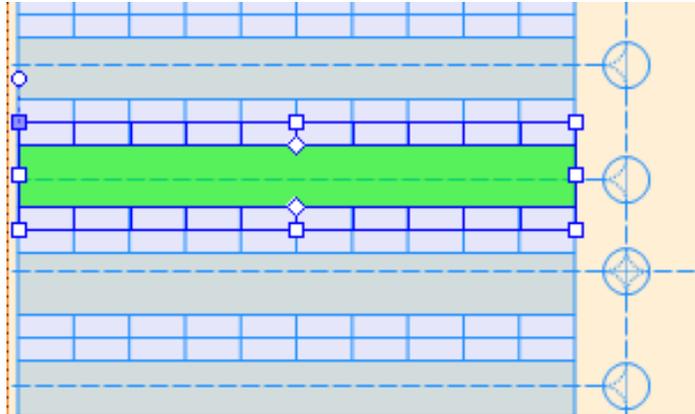
Mentre per definire il tempo di arrivo del camion adibito allo scarico della merce sono stati previsti due parametri che rappresentano un tempo massimo e minimo di possibile arrivo del Track. Questa scelta si basa sulla volontà di rendere il modello ancora più fedele alla realtà, in modo che il Track arrivi in un tempo uniforme tra la soglia massima e minima:



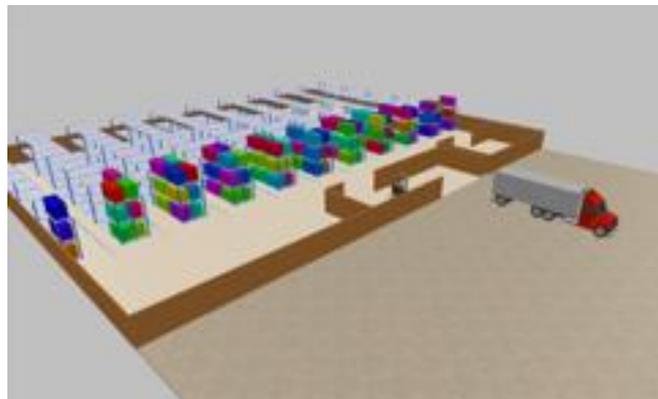
Entrambi sono parametri di tipo intero. AnyLogic permette di usare parametri di tipi primitivi: double, integer, boolean. Inoltre, garantisce molteplici possibilità di parametrizzare gli oggetti, poiché supporta i parametri di qualsiasi classe Java. È possibile definire i parametri delle classi Java comuni, ad esempio, il parametro String, per rappresentare stringhe di caratteri; oppure creare un parametro della classe Object (che è alla base di tutte

le classi Java) e assegnare un'istanza di qualsiasi classe al parametro. Dal momento che tutti gli oggetti di AnyLogic sono istanze di classi Java, è possibile definirne i parametri, e quindi utilizzare oggetti di AnyLogic come parametri. AnyLogic supporta, inoltre, la creazione di parametri di tipo Array. Spesso si crea confusione tra la definizione di parametro e variabile. Una variabile rappresenta uno stato del modello, e può cambiare durante la simulazione. Un parametro, invece, è comunemente utilizzato per descrivere gli oggetti in modo statico. Generalmente, esso è una costante nella simulazione, e viene cambiato solo quando è necessario regolare il comportamento del modello.

Per la presentazione del modello, Anylogic consente di costruire forme molto complesse in 2D utilizzando la struttura a oggetti del modello. La presentazione è un disegno composto da varie forme (cerchi, rettangoli, linee, ecc.) e da comandi. Ogni forma ha un certo numero di caratteristiche che definiscono il suo aspetto visivo: posizione, altezza, larghezza, colore e così via. Tra le forme elementari che il programma dispone c'è il *Path* che è stato utilizzato per la definizione del percorso che il carrello elevatore può seguire nell'esecuzione della simulazione. Nel percorso compaiono anche dei Point Node necessari al collegamento dei vari Path con le corsie tra uno scaffale e l'altro. Nello Space Markup del programma è stato possibile usufruire anche del Pallet Rack ovvero degli scaffali necessari al collocamento della merce all'interno del magazzino. Di questi ne sono stati previsti 10 ognuno con due ali separate da un corridoio largo 2.7 metri e lunghi 24 metri. Ogni scaffale ha 10 postazioni e tre piani, per un totale di 400 postazioni. Tra un piano e l'altro è stata prevista una distanza di 1.5 metri e per posizionare il pallet nei ripiani più alti è stato quindi previsto un tempo di ritardo di 20 secondi, necessario al sollevamento delle forche e al corretto posizionamento del pezzo.



**Figura 31: PalletRack**



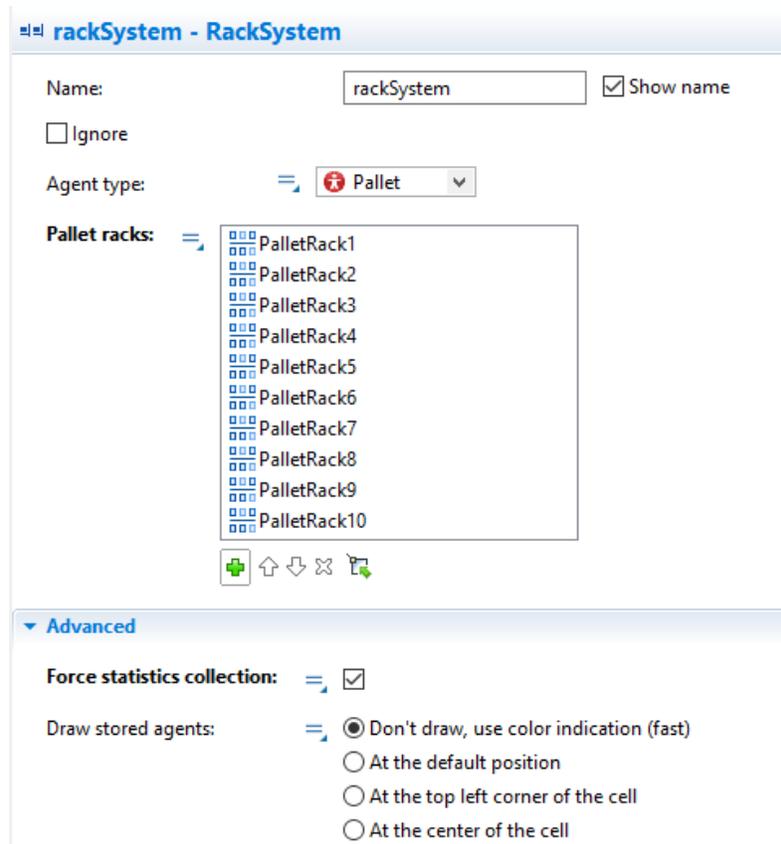
**Figura 32: Panoramica del magazzino in 3D**

Per semplicità durante la simulazione come oggetti sono stati previsti dei Pallet, che durante il run sono rappresentati con dei blocchi colorati.

Data la necessità di usare più di uno scaffale questi sono stati raggruppati in un *rackSystem*



a cui è stato abbinato come Agent type il Pallet precedentemente creato, ovvero gli scaffali saranno riempiti con i pallet che di volta in volta il camion scaricherà nella loadingArea. Come si può notare nella figura sottostante il rackSystem contiene i 10 palletRacks creati nel magazzino.



**Figura 33: Finestra di lavoro del RackSystem**

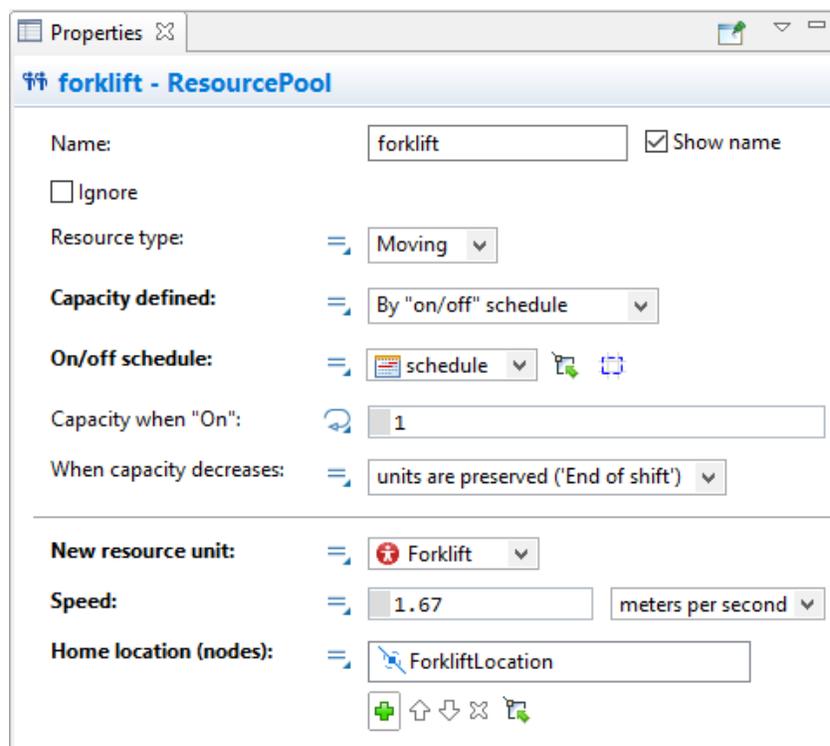
Un altro Agent Type creato all'interno della simulazione è il *Forklift*, ovvero il nome che è stato fornito al carrello elevatore, a cui è stata assegnata una velocità di 1.67 m/s. All'interno

della simulazione il Forklift funge da *ResourcePoll*  che definisce una serie di unità di risorse che possono essere sequestrate e rilasciate dagli agenti. Le risorse possono essere di tre tipi: statiche, mobili e portatili:

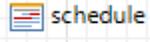
- Le risorse statiche sono vincolate a una posizione particolare (ad es. Nodo) all'interno della rete e non possono essere spostate. Un esempio di risorsa statica potrebbe essere una sala radiografica.
- Le risorse in movimento possono spostarsi da sole, possono rappresentare il personale, i veicoli, come nel nostro caso.

- Le risorse portatili possono essere spostate dagli agenti. Una sedia a rotelle sarebbe un esempio di risorsa portatile.

Le risorse mobili e portatili hanno le loro “posizioni di casa” dove possono facoltativamente tornare, qui definita Forklift Location, ovvero la postazione dove il carrello elevatore torna se non ha altre operazioni da svolgere durante la simulazione e dove staziona in attesa dell’arrivo del Truck. L'agente utilizza il nome del pool (forklift) per fare riferimento alle unità di risorse, e può scegliere un'unità particolare analizzando gli attributi dell'unità stessa. Qualsiasi unità di risorse può essere inattiva o occupata. Le risorse in movimento hanno l’inconveniente di non riconoscersi a vicenda come ostacoli e si sposteranno l'una sull'altra, il che non corrisponde alla realtà. Se si desidera prendere in considerazione le collisioni e modellare il modo in cui gli oggetti in movimento risolvono i conflitti di navigazione, i trasportatori spaziali guidati dal percorso o liberi sarebbero una scelta migliore.



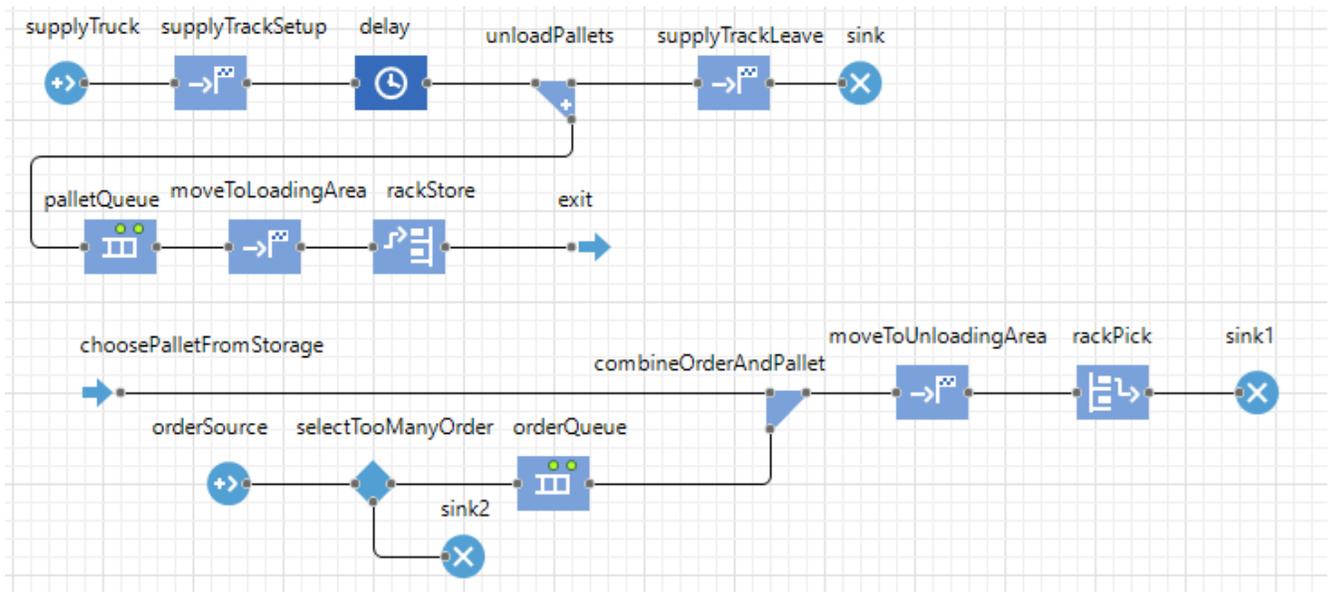
**Figura 34: Finestra di lavoro della ResourcePool “forklift”**

Alla ResourcePool del Forklift è possibile associare uno *Schedule*  per definire la TimeTable del carrello elevatore, ovvero i suoi tempi di attività e inattività. Questo è un elemento speciale che consente di definire come alcuni valori cambiano nel tempo secondo il modello definito (facoltativamente ciclico). La pianificazione viene spesso utilizzata per definire:

- Un calendario per una ResourcePool;
- Tempi di generazione dell'agente, o un modello temporale della velocità di arrivo dell'agente nel blocco Sorgente;
- Tempi di generazione dei pedoni, o un modello temporale (es. Giornaliero) del tasso di arrivo dei pedoni nel blocco PedSource;

In particolare, la simulazione può essere eseguita prevedendo per ogni ora e mezza di marcia del veicolo uno stop di un quarto d'ora nella loadingArea, utile alla ricarica statica del carrello.

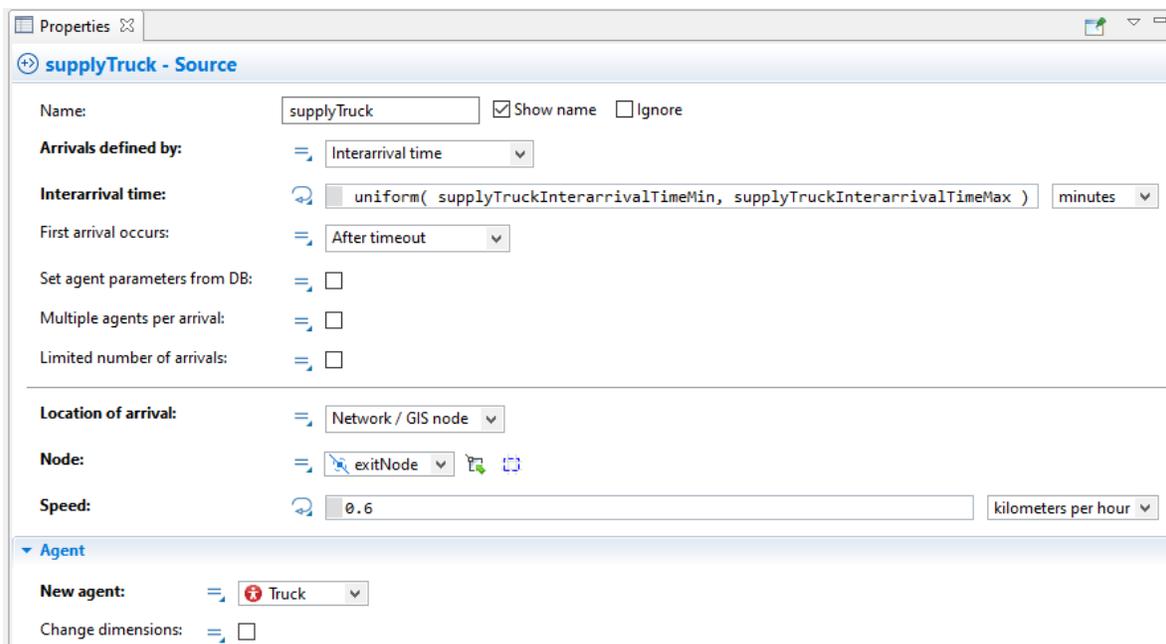
Il *terzo passo* riguarda l'elaborazione di un modello concettuale, un diagramma di flusso, ovvero un linguaggio grafico a blocchi, necessario a dar vita, con la rappresentazione grafica, alla movimentazione del carrello elevatore.



**Figura 35: Flowchart**



Il primo blocco di un diagramma di flusso è sempre una **Source** ovvero un “Genera agenti”. Di solito è il punto di partenza di un modello di processo. Gli agenti possono essere standard o di qualsiasi tipo definiti dall'utente. È possibile personalizzare gli agenti generati specificando il tipo di agente nel campo Nuovo agente, quindi specificando l'azione da eseguire prima che l'agente esca dal blocco Origine. Nella simulazione in questione l'Origine è stata definita supplyTruk, in quanto legato all’arrivo del camion che rilascia la merce.

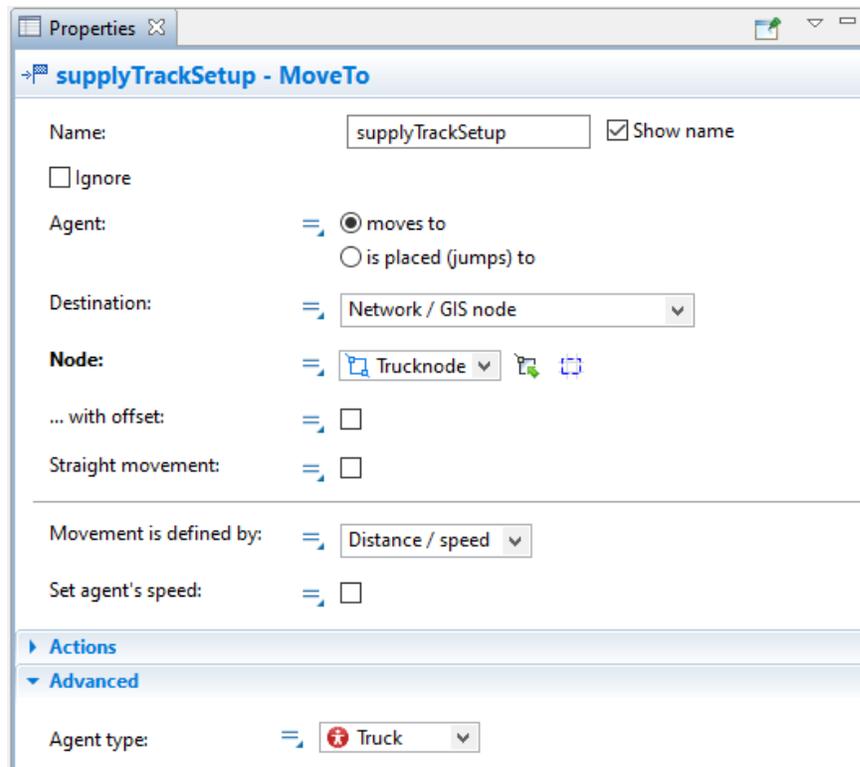


**Figura 36: Finestra di lavoro del blocco Source**

Esistono diversi modi per definire quando e quanti agenti devono essere generati. Come già annunciato per i tempi di arrivo del Truck è stata scelta una soluzione di tempo uniforme tra un tempo massimo e minimo, definiti tramite l’utilizzo di due parametri. È possibile anche impostare il numero di agenti in ogni arrivo e limitare il numero totale di arrivi. In alcuni casi ha senso utilizzare due o più blocchi Source per implementare schemi di arrivo complessi, come è stato fatto anche in questo esempio applicativo per gestire non solo gli arrivi ma anche gli ordini all’interno del magazzino stesso. Oltre a Source, ci sono altri modi per creare agenti nei modelli Process Modeling Library. Ad esempio, si può usare *Enter block* come punto di

partenza del flusso e chiamare la sua funzione take per generare agenti. Quest'ultima funzione ha senso quando gli agenti vengono creati altrove (ad esempio da un diagramma delle statistiche o da un evento) e devono solo essere richiamati nel processo. Anche questa soluzione è stata sperimentata nel modello proposto. La location di partenza del Truck è un generico nodo definito nella simulazione *ExitNode*. Da qui deve essere comandato il suo spostamento verso il magazzino, in particolare verso l'area rettangolare adibita allo scarico della merce, ovvero il *TruckNode*.

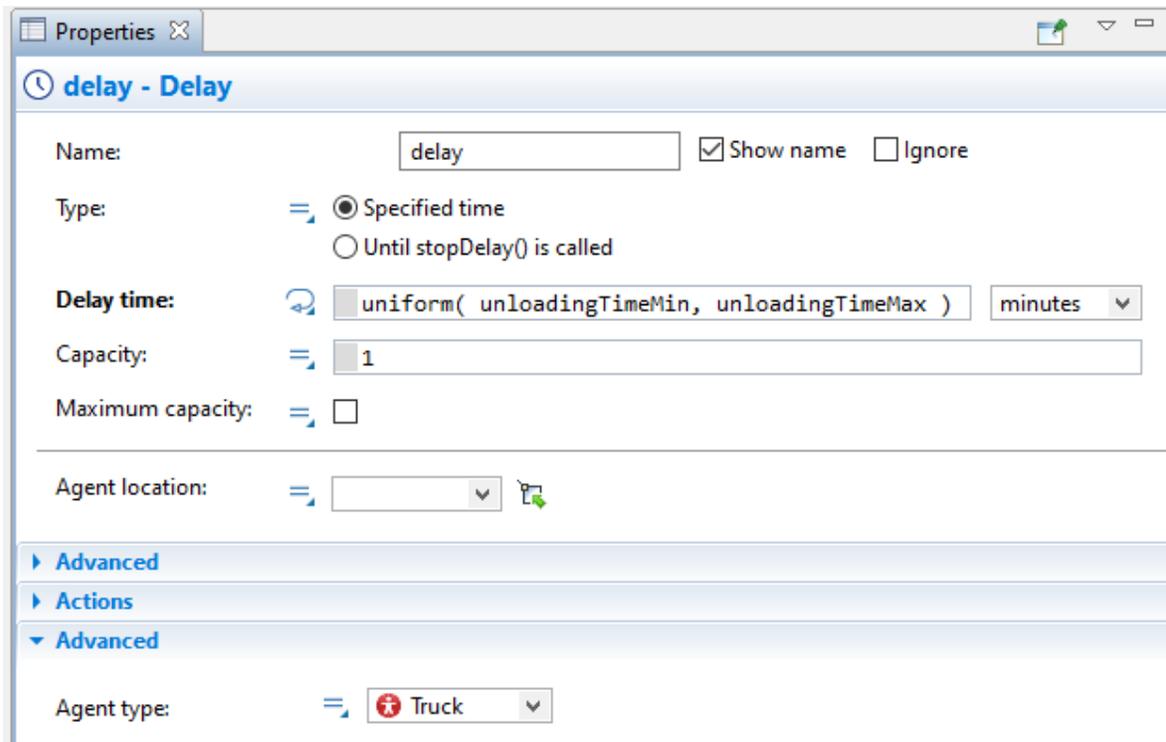
A tal fine subito dopo l'origine è stato creato un blocco di **Move To**  che come fa ben pensare, sposta l'agente generato nella source in una nuova posizione. Se all'agente sono assegnate risorse, si sposteranno con esso, infatti nel caso realizzato, al Truck è associata la merce, quindi insieme ad esso arriveranno alla postazione comandata anche i pallet, pronti per essere scaricati. La velocità sarà la velocità dell'agente indipendentemente dalla velocità delle risorse collegate. Al Truck è stata assegnata una velocità di 0.6 km/h, velocità pensata per le operazioni di manovra necessarie al camion per posizionarsi correttamente nella zona di scarico merce. L'agente è animato muovendosi lungo il percorso.



**Figura 37: Finestra di lavoro del blocco Move to**

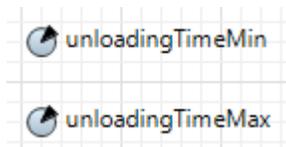


Il blocco di **Delay** serve a ritardare gli agenti per un determinato periodo di tempo. Il tempo di ritardo viene valutato dinamicamente, può essere stocastico e può dipendere dall'agente nonché da qualsiasi altra condizione. Facoltativamente, può essere calcolato come la lunghezza del percorso di animazione del ritardo diviso per la velocità dell'agente. Più agenti (fino alla data capacità di ritardo) possono essere ritardati simultaneamente e indipendentemente. Se la capacità del *Delayblock* viene modificata dinamicamente e, il numero di agenti attualmente in ritardo supera la capacità, Delayblock consentirà loro di completare i tempi di ritardo e non consentirà ai nuovi agenti di entrare fino a quando il numero non scende al di sotto della nuova capacità. È possibile accedere agli agenti in ritardo, in particolare è possibile ottenere i loro tempi rimanenti e persino rimuovere gli agenti dal blocco prima che finiscano i ritardi. In questo caso l'utilizzo di questo blocco è servito a simulare un certo tempo necessario allo scarico della merce del camion.



**Figura 38: Finestra di lavoro del blocco Delay**

Il tempo, anche in questo caso, è stato valutato in maniera uniforme tra un tempo massimo e minimo definito usando due parametri, che simulano il tempo necessario allo scarico della merce:



L'arrivo del camion nel TruckNode consente lo scarico effettivo della merce. Questo

passaggio è rappresentato dal blocco **Split** . Per ogni agente in entrata crea uno o più agenti e li invia in output tramite la porta outCopy. Un nuovo agente creato può avere il significato di una copia, un fratello, ecc. e può essere di tipo arbitrario. Il numero di nuovi agenti può essere modificato dinamicamente. In questo caso il blocco serve a creare con l'out l'uscita del camion dal campo di interesse una volta scaricati i pezzi e con l'outCopy si va a fare una copia dell'Agent Type Pallet per poi utilizzarlo all'interno del magazzino stesso. In particolare dopo l'uscita out viene posto un altro blocco di Move To per la movimentazione

del Track dal TruckNode all'exitNode in cui il camion scompare per poi riapparire per il

secondo scarico merce. Il blocco **Sink**  serve proprio ad eliminare gli agenti, in questo caso il camion. Di solito è un punto finale in un modello di processo, a meno che non si utilizzi l'*Exitblock*, in cui però gli agenti non verrebbero mai rimossi dal modello (quindi non si deve lasciare una porta non connessa alla fine di un processo ma terminare il processo con tale blocco). Le seguenti condizioni devono essere soddisfatte prima che l'agente possa essere smaltito con successo:

1. L'agente deve essere registrato da una rete;
2. L'agente non deve possedere unità di risorse di rete;
3. Se l'agente contiene altri agenti, tutti dovrebbero soddisfare le stesse condizioni di smaltimento.

Se una qualsiasi di queste condizioni viene violata, il blocco Sink genera un errore.

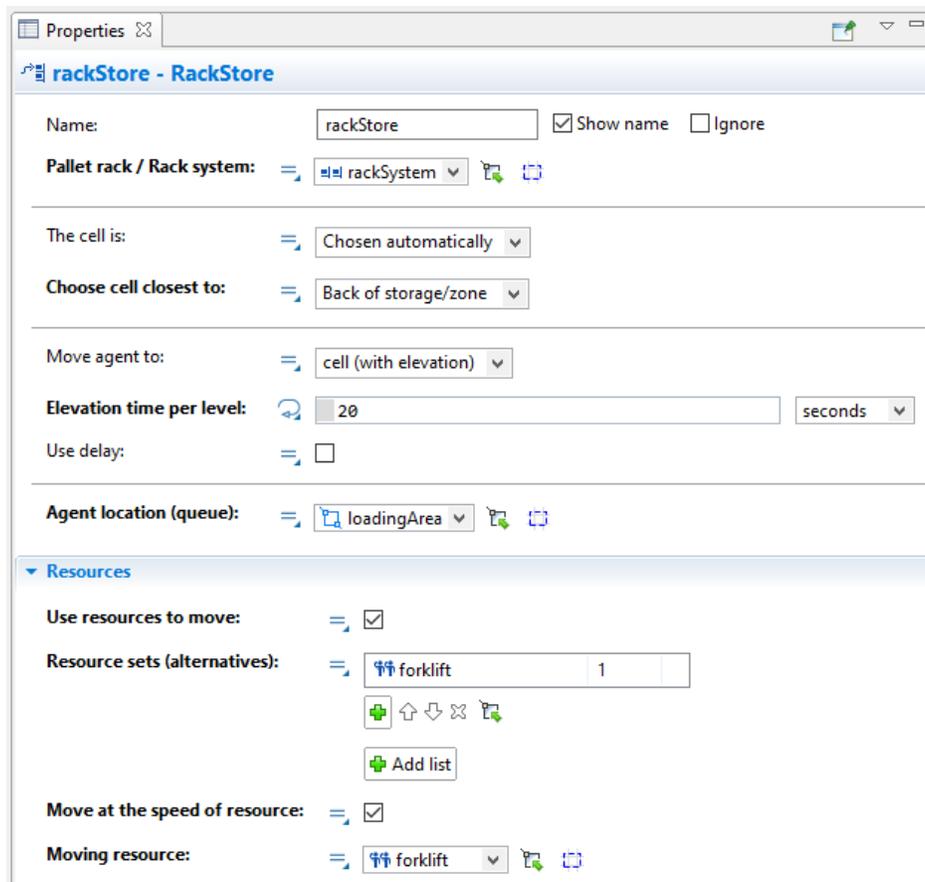
La porta outCopy viene invece collegata al blocco **Queue** . Una coda (un buffer) di agenti in attesa di essere accettati dagli oggetti successivi nel flusso del processo. Facoltativamente, è possibile associare un tempo di attesa massimo a un agente. È inoltre possibile rimuovere gli agenti a livello di programmazione da qualsiasi posizione nella coda. La disciplina dell'accodamento può essere di tipo FIFO (first in first out), LIFO (last in first out) o basata sulla priorità. La priorità può essere memorizzata esplicitamente nell'agente o calcolata in base alle proprietà dell'agente e alle condizioni esterne. Una coda con priorità accetta sempre un agente in entrata, valuta la sua priorità e lo colloca nella posizione corrispondente nella coda. Se la coda è piena, il nuovo agente può quindi causare l'eliminazione dell'ultimo agente dalla coda, oppure può procedere immediatamente lì se la sua priorità è inferiore o uguale a quella dell'ultimo agente. Nel caso in cui un timeout sia associato all'agente, uscirà tramite outTimeoutport se viene raggiunto il tempo massimo di attesa. È inoltre possibile rimuovere agenti arbitrari dalla coda chiamando la funzione remove. È possibile inserire gli agenti rimossi in altri processi utilizzando Enterblock. La capacità della coda può essere modificata dinamicamente. Gli agenti in coda possono essere animati come in piedi uno dietro l'altro lungo il Path o nelle posizioni specificate all'interno di un nodo. Queueblock ha diversi punti di estensione, in particolare è possibile eseguire

azioni personalizzate quando l'agente entra nella coda, esce dalla coda tramite una delle tre porte e appare nella prima posizione della coda. Si noti che quando viene eseguito onEnter, l'agente viene già messo in coda. Quando vengono eseguiti onExit o onExitTimeout, l'agente è già rimosso dalla coda. Nella seguente trattazione questo blocco è stato richiamato per simulare la coda degli oggetti scaricati dal camion nella loadingArea e che uno dopo l'altro vengono collocati nelle varie postazioni degli scaffali. A valle del Queueblock è posto un Move To che consente di richiamare l'attenzione del carrello elevatore che esegue l'operazione di carico del Pallet dalla loadingArea in prossimità dei PalletRacks. Così come è stato programmato per il modello analitico anche nella simulazione la logica utilizzata per riempire i PalletRacks è stata quella di alimentare per prime le postazioni più vicine alla zona di carico procedendo sulla larghezza del magazzino.

Per far intuire al Forklift dove posizionare i Pallet una volta prelevati dalla loadinArea è stato



usato il blocco **Rack Store**. Questo inserisce l'agente in una cella di un determinato scaffale per pallet, o RackSystem. L'agente viene spostato dalla posizione corrente nella rete alla posizione della cella, facoltativamente con l'aiuto dello spostamento delle risorse. Un ritardo può essere associato all'inserimento di un agente in una cella e può dipendere dalle coordinate della cella, ad es. dal suo livello, come è stato fatto in questo caso applicativo prevedendo un tempo di 20 secondi per alimentare il ripiano dello scaffale più alto. La cella può essere specificata esplicitamente come (riga, posizione, livello) o scelta automaticamente. In quest'ultimo caso RackStore utilizza la funzione getFreeCell. In alternativa è possibile sequestrare e rilasciare risorse al di fuori del RackStoreblock o non utilizzarle affatto. Il RackStore permette di usare una serie di punti di estensione per inserire azioni personalizzate in diverse fasi del processo. È essenziale legare a tale blocco la risorsa che ne consente l'operazione ovvero la resourcePool che abbiamo istituito per richiamare il Forklift, precedentemente enunciata.



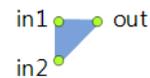
**Figura 39: Finestra di lavoro del blocco RackStore**

Se questo è un punto finale del processo relativo all'agente, cioè se non c'è una continuazione diretta da qui, è possibile inserire un blocco di uscita "vuoto" dopo il RackStore, senza lasciare mai la sua porta di uscita scollegata. Mettere Sink al posto di Exit non sarebbe corretto, poiché l'agente rimarrebbe nel sistema. In base a questo alla porta di uscita del RackStore è stato collegato il blocco **Exit**  che elimina gli agenti in entrata dal flusso del processo e consente all'utente di specificare cosa farne. Se tutto ciò che si vuole fare è eliminare gli agenti si dovrebbe usare Sinkblock. Tipicamente Exit viene utilizzato per trasferire gli agenti in una parte del modello implementato in un altro stile di modellazione (ad esempio in un diagramma di stato, una funzione, ecc.) o, in coppia con il blocco Enter, per implementare l'instradamento personalizzato degli agenti tra le diverse parti del processo, così come è stato usato in questo caso. La volontà è quella di correlare i Pallet posizionati

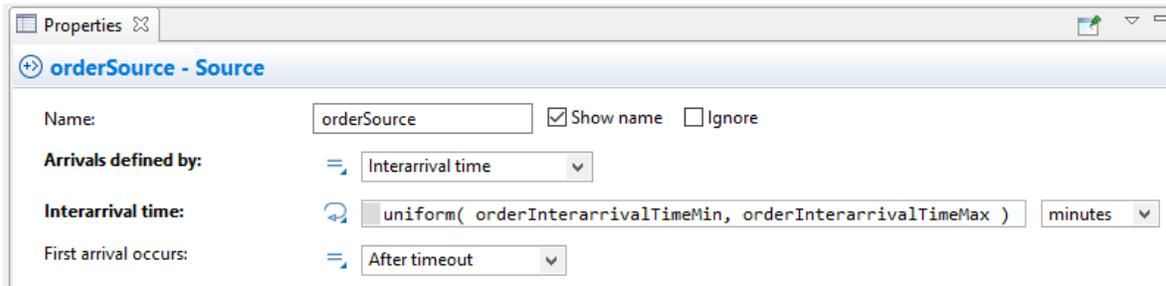
sugli scaffali con gli ordini caratteristici di un reparto produttivo. È possibile infatti che durante l'operazione di carico della merce, vengano richiesti dei pezzi per controllo qualità o eventualmente per spostarli in altre aree del magazzino. Questi ordini vengono soddisfatti dal carrello elevatore che a seconda della richiesta sposta i Pallets precedentemente caricati sugli scaffali in una UnloadinArea in cui i Pallet scompaiono per una maggiore semplicità visiva. Proprio per collegare queste due operazioni di carico e scarico sono stati utilizzati i



blocchi exit e **Enter**, in particolare quest'ultimo inserisce gli agenti (già esistenti) in un punto particolare del modello. Questo blocco viene tipicamente utilizzato per trasferire gli agenti creati in un nuovo diagramma di flusso per implementare il routing personalizzato nel processo. Per inserire l'agente tramite questo blocco si richiama la sua funzione take. Il diagramma di flusso precedentemente rappresentato infatti, può essere diviso in due macro sequenza, separate dai blocchi exit e enter, ovvero la sequenza rappresentativa del carico della merce e quella dello scarico necessaria al soddisfacimento degli ordini. Un altro blocco

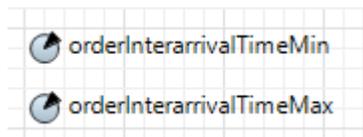


necessario affinché le due sequenze interagiscano tra loro è il **Combine** dotato di due ingressi e un'uscita. Attende l'arrivo dei due agenti (in ordine arbitrario) alle porte in1 e in2, produce un nuovo agente e lo invia in output. Il nuovo agente può essere completamente nuovo, cioè un oggetto di nuova costruzione le cui proprietà possono dipendere dagli agenti originali, oppure può essere uno degli agenti originali, ancora una volta, eventualmente modificato. Una volta che i due agenti sono pronti, l'operazione di combinazione non richiede del tempo. La combinazione può essere utilizzata per diversi scopi. Innanzitutto, può fungere da punto di sincronizzazione per consentire a uno degli agenti di andare oltre solo dopo che ne è arrivato un altro. In secondo luogo, si può utilizzare Combin per unire nuovamente l'agente con la sua copia. In questo blocco possono essere smaltiti agenti. Nel progetto di tesi questo blocco è servito a combinare gli ordini derivanti da una nuova Source e l'operazione di carico precedentemente eseguita dal carrello. Nel primo ingresso viene infatti, collegato la sequenza di flusso di carico del Pallet, sul secondo ingresso invece, gli ordini. La nuova Source detta orderSource fa intuire come questa sia destinata alla generazione degli ordini.

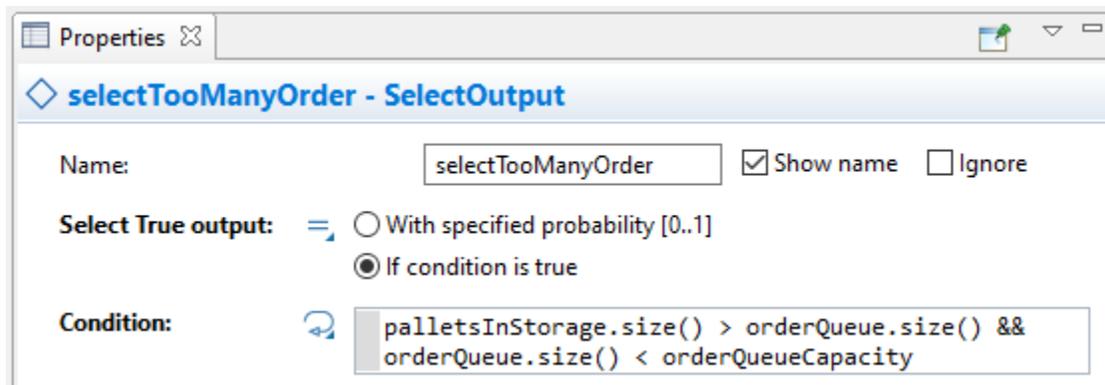


**Figura 40: Finestra di lavoro del blocco Source degli ordini**

Anche in questa origine viene utilizzato un intervallo di tempo uniforme quindi caratterizzato da un tempo massimo e minimo in cui gli ordini possono arrivare, tempi di nuovo valutati tramite due parametri:

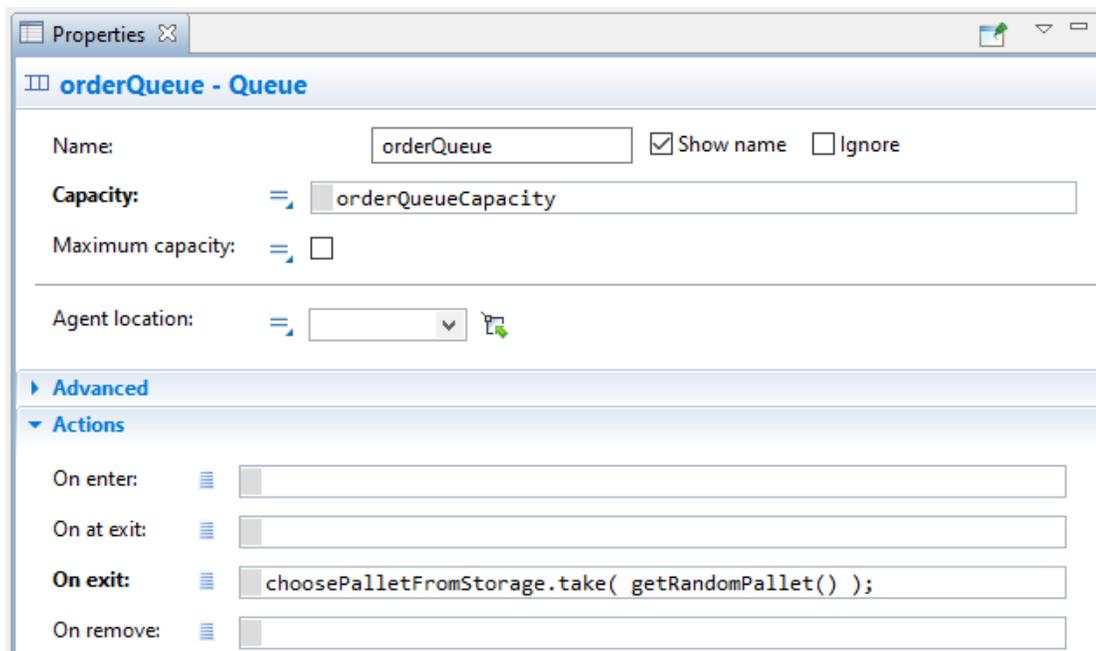


A valle dell'orderSource è stato utilizzato il blocco **SelectOutput** il quale instrada gli agenti in ingresso a una delle due porte di output a seconda della condizione (probabilistica o deterministica). La condizione può dipendere dall'agente e da eventuali fattori esterni. Può essere utilizzato per ordinare gli agenti in base a determinati criteri, per dividere in modo casuale il flusso degli agenti. A volte è necessario avere più di due uscite. Sono disponibili due blocchi per l'instradamento degli agenti a diversi rami del diagramma di flusso: SelectOutput e SelectOutput5. SelectOutput5 ha cinque porte di output, quindi può instradare gli agenti a un massimo di cinque uscite. In questo caso è stato utilizzato unicamente perché si necessitava di una porta per il Sink obbligatorio dato l'uso della Source e di una porta collegata alla coda degli ordini. La condizione scelta per la seguente trattazione è quella riportata nella figura sottostante, ovvero che gli ordini possono essere soddisfatti se la quantità di Pallet presenti sugli scaffali è inevitabilmente maggiore della quantità di pallet da spostare nell'unloadingArea e se quest'ultimi sono inferiori alla massima capacità della coda.



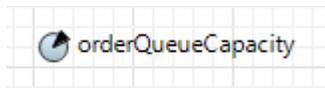
**Figura 41: Finestra di lavoro del blocco SelectOutput**

Subito dopo il SelectOutput infatti, è stato inserito di nuovo un blocco Queue che simuli l'accumulo degli ordini i quali vengono soddisfatti non appena il Forklift termina la sua precedente operazione di carico.



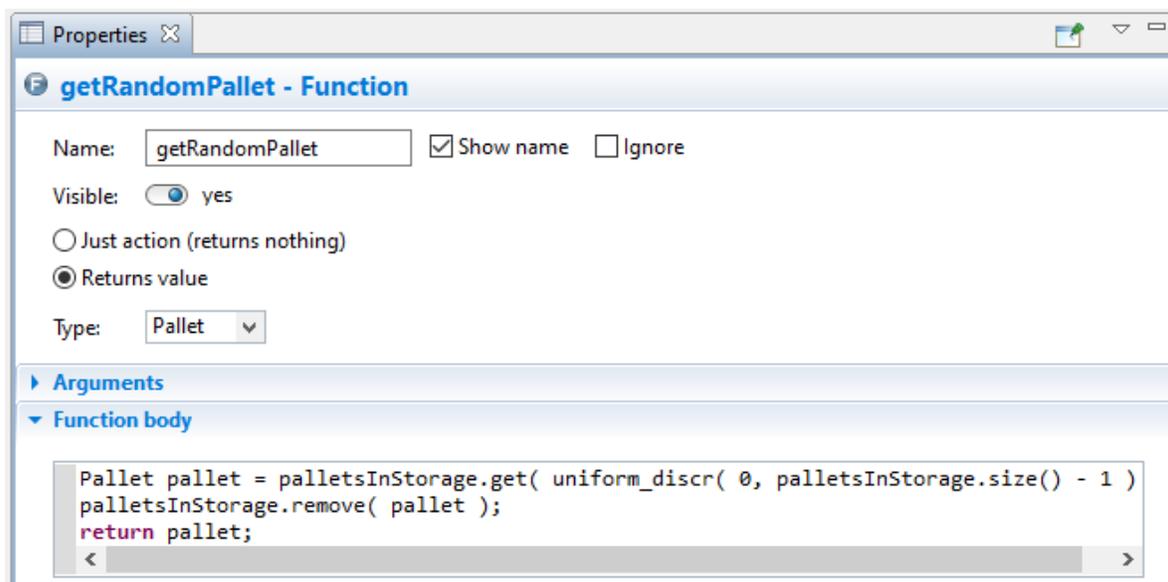
**Figura 42: Finestra di lavoro del blocco orderQueue**

All'interno di questo blocco alla voce Capacity è stato collegato un parametro definito per quantificare il massimo di ordini che si possono accumulare prima che il carrello elevatore possa intervenire per soddisfarli:



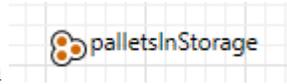
Come già detto, il Forklift esegue prima l'operazione di carico dei Pallet sugli scaffali e solo quando termina questa operazione accontenta gli ordini. Se però l'accumulo degli ordini diviene superiore a questo parametro allora il carrello elevatore smetti di eseguire il carico e si occupa degli ordini.

In questa coda la tecnica più appropriata sembrava essere quella del FIFO ovvero il primo oggetto ad entrare è anche il primo ad uscire. In realtà la scelta che poi si è preferito perseguire è quella di prelevare gli ordini in maniera casuale, randomica in modo da simulare in maniera più ottimale la realtà, nell'ottica che il magazzino sia adibito a diverse tipologie di prodotti che potrebbero trovarsi in aree completamente diverse tra loro. Durante la simulazione infatti è possibile notare come il Forklift prelevi i Pallet da destinare all'unloadingArea prima in una zona del magazzino e poi in una parte completamente opposta da questa, ipotizzando che in quel momento siano arrivati gli ordini di due oggetti diversi e chiaramente disposti in due scaffali diversi del magazzino. Per fare questo è stato utilizzato il comando take collegato alla funzione getRandomPallet.



**Figura 43: Funzione per la generazione casuale degli ordini**

In questa funzione compare anche una **Collection**



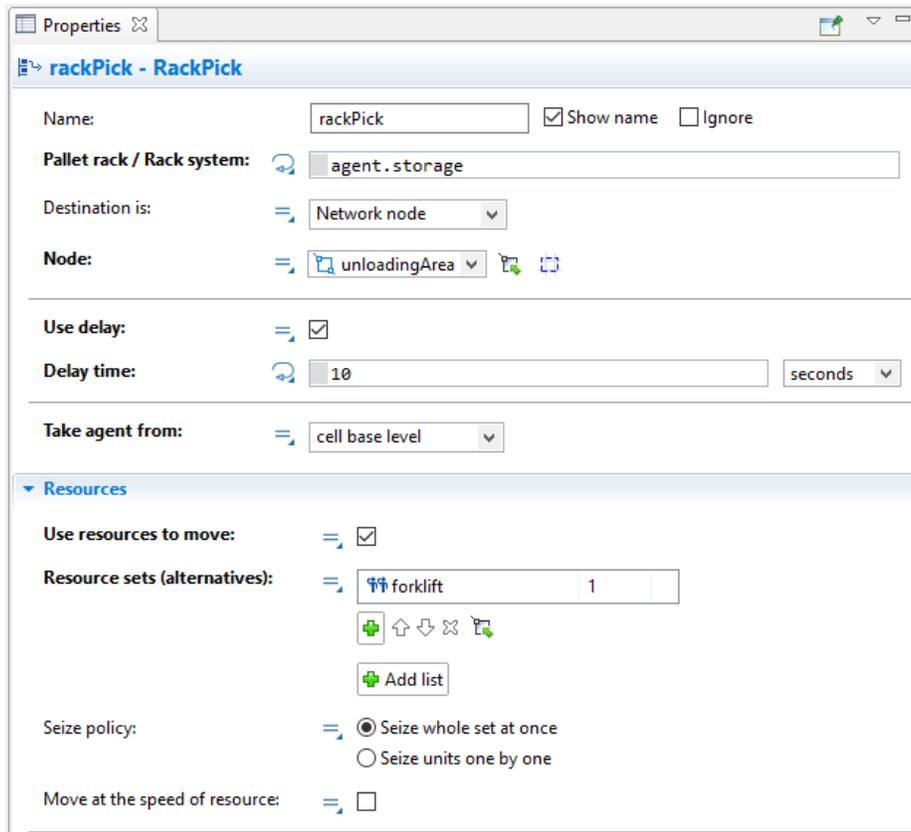
che è stata utilizzata per conteggiare i pallet posizionati sui vari scaffali.

Tramite l'uscita del blocco Combine è possibile dare il via alla fase di scarico portando i Pallet dagli scaffali all'unloadingArea, sempre tramite un blocco Move To per richiamare il

carrello elevatore. Per questo è stato utilizzato il blocco **RackPick**



che rimuove l'agente da una cella nel PalletRack specificato o RackSystem e lo sposta nella posizione di destinazione specificata, ovvero l'unloadingArea. Ciò è facoltativamente fatto con l'aiuto dello spostamento delle risorse e gli può essere associato un ritardo per la raccolta dell'agente. Nel caso in analisi è stato usato un ritardo di 10 secondi. Il ritardo può dipendere dalle coordinate della cella, e dal livello dello scaffale in cui viene prelevato l'oggetto. È necessario specificare il PalletRack o RackSystem dove è immagazzinato l'agente. Valgono le stesse condizioni viste per il RackStore. Il RackPick permette una serie di punti di estensione per inserire le azioni personalizzate in diverse fasi del processo. Come per il RackStore anche per il RackPick è necessario abbinarvi la resourcePool del Forklift, agente in grado di svolgere l'operazione comandata.



**Figura 44: Finestra di lavoro del blocco RackPick**

Affinché il diagramma di flusso possa funzionare, deve essere correttamente chiuso dal blocco Sink.

Una volta compilato il modello (*quarto passo*) fino a qui ampiamente descritto è inevitabile dover far fronte a degli errori di esecuzione dei vari comandi inseriti, essendo questi creati da una mente umana. Così definito il modello può essere fatto girare tramite il pulsante Run



arrivando all'esecuzione del *quinto passo*. Il *sesto passo* consiste nell'effettuare diversi run per testare il modello, cercando di minimizzarli per ottimizzare il processo.

## 4.1. Gli obiettivi

Una volta approvato, il modello è possibile utilizzarlo per raggiungere gli obiettivi proposti, ovvero valutare la migliore soluzione di disposizione delle bobine trasmettenti necessarie alla ricarica dinamica e statica del veicolo elettrico industriale.

Per la **ricarica statica** non sono stati necessari grandi studi, in quanto la soluzione più conveniente è sicuramente quella di prevedere una ricarica di questo tipo nella zona di maggior stazionamento del veicolo elettrico, ovvero la loadingArea. È in questa zona, infatti, che il Forklift transita sia per prelevare la merce e posizionarla nei vari scaffali sia per stazionare nell'eventuale quarto d'ora a disposizione dell'operatore tra un'ora e mezza e l'altra. Pause che l'operatore ha il diritto di avere per recuperare le energie psico-fisiche e per consumare il pasto, stipulate dai contratti collettivi che ne determinano la durata e le modalità di fruizione.

Per la **ricarica dinamica** invece, lo studio non è stato sicuramente così immediato.

### 4.1.1. Valutazione delle posizioni che il carrello elevatore ha all'interno del magazzino

Il primo step è stato quello di identificare le tempistiche che il Forklift ha all'interno del magazzino, ovvero capire ogni singolo secondo della simulazione in che coordinata, posizione del magazzino esso viene a trovarsi, in modo da capire quali sono le zone maggiorate toccate dal carrello che ci permettono di avere un'idea più chiara di dove poter posizionare le bobine trasmettenti. Tutto questo è stato possibile tramite l'utilizzo di un Event



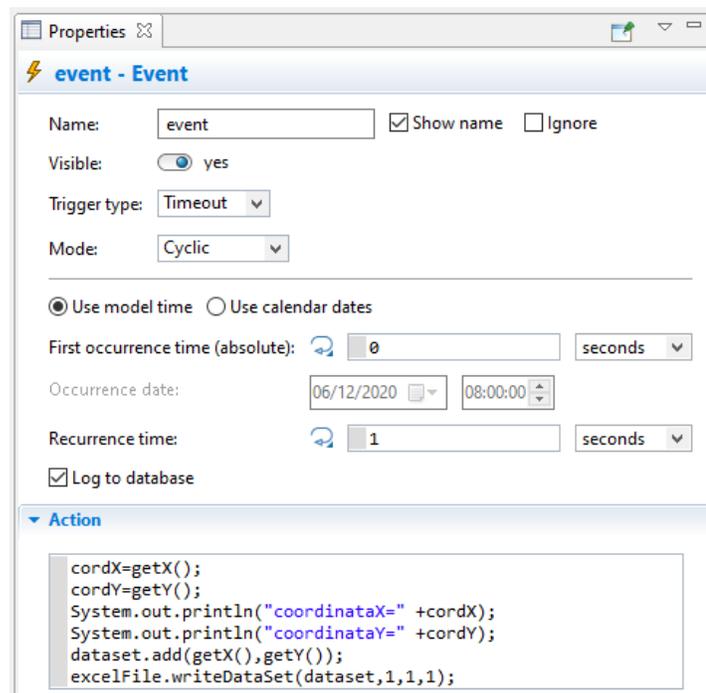
all'interno dell'Agent Type Forklift. L'evento è il modo più semplice per programmare un'azione nel modello. Pertanto, gli eventi vengono comunemente utilizzati per modellare ritardi e timeout. A volte si può fare lo stesso usando le transizioni temporizzate nei grafici delle statistiche, ma gli eventi potrebbero essere più efficienti. Esistono tre tipi di eventi:

- Evento attivato da timeout. Viene utilizzato quando è necessario pianificare un'azione in un determinato momento (o in una data particolare). L'evento si verifica

esattamente nel tempo di timeout dopo che è stato avviato. L'evento attivato da timeout ha ancora più funzionalità quando si specifica che scada una volta o ciclicamente.

- Evento attivato da una condizione. Viene utilizzato quando si desidera monitorare una determinata condizione ed eseguire un'azione quando questa diventa vera.
- Evento attivato da una velocità. Viene utilizzato per modellare un flusso di eventi indipendenti. È spesso necessario per modellare gli arrivi: ad es. arrivi dei clienti nei sistemi di accodamento, arrivi delle transazioni nei modelli di rete basati su server.

In questo progetto di tesi l'evento è stato utilizzato proprio per avere informazioni, dal tempo zero dell'avvio della simulazione fino allo scadere delle ore, per ogni secondo, sulle coordinate (cordX,cordY) del carrello industriale. Evento ciclico date le informazioni da ottenere.

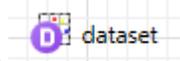


**Figura 45: Finestra di lavoro dell'Evento**

Le coordinate sono state inizializzate tramite due parametri, inevitabilmente di tipo double:



È stato possibile ottenere le informazioni sulle coordinate utilizzando la funzione **getX()** e **getY()** molto utilizzate in Anylogic. La memorizzazione di queste coordinate è stata possibile



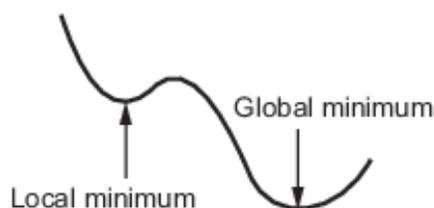
utilizzando un **DataSet** che è in grado di registrare dati 2D (x,y) di tipo double e di mantenere il minimo e il massimo aggiornati dei dati memorizzati per ciascuna dimensione. Il set di dati conserva un numero limitato di elementi di dati più recenti. È possibile utilizzare il tempo come valori X del set di dati, ovvero associare un valore osservabile a un momento temporale in cui viene campionato. Una lunghezza della coda, una coordinata del veicolo, un livello del fluido sono gli esempi di tali valori. Tale set di dati è chiamato temporizzato. Si deve tener presente che l'aggiunta di un nuovo elemento quando il set di dati è pieno causerà la perdita del campione più vecchio e, se l'elemento perso conteneva un minimo o un massimo, avvierà una nuova ricerca per min / max, che potrebbe richiedere molto tempo per set di dati di grandi dimensioni. Pertanto, per set di dati di grandi dimensioni si consiglia di avere una dimensione non inferiore al numero di elementi che si intende aggiungere. Durante l'esecuzione del modello, è possibile visualizzare i dati raccolti



in modo che in seguito sia possibile salvarli su un foglio Excel, per eseguire analisi statistiche, così come è stato fatto nel progetto di tesi. Conoscendo le coordinate del magazzino, facilmente reperibili dal programma stesso utilizzando semplicemente il puntatore, si è passati alla ricerca di quelle postazioni sul file Excel filtrando i dati, ottenendo una matrice di probabilità di tempo che il carrello elevatore trascorre in corrispondenza di ogni singola ubica, in corrispondenza del corridoio e in corrispondenza delle zone di carico e scarico. Con il termine ubica è stata identificata la singola postazione in cui il carrello si ferma in prossimità dello scaffale per poter posizionare il Pallet.

#### 4.1.2. Valutazione della disposizione delle bobine trasmettenti

Per la valutazione delle postazioni ottimali delle bobine trasmettenti è stato necessario l'utilizzo di un altro software ovvero MATLAB, per l'analisi iterativa dei processi di progettazione con un linguaggio di programmazione che esprime le operazioni matematiche con matrici e array in modo diretto. MATLAB (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un software per il calcolo numerico e l'analisi statistica che usa il linguaggio di programmazione C, per lavorare con matrici, funzioni, implementare algoritmi e soprattutto interfacciarsi con altri programmi. Gli script utilizzati nel progetto di tesi sono stati formulati nel precedente modello analitico e adattati al seguente modello simulativo. In esso sono stati inseriti i dati ottenuti dalla simulazione riguardo all'uso del magazzino da parte del carrello elevatore, ovvero le informazioni riguardanti le zone maggiormente toccate da questo durante il run del modello simulativo. In particolare per ottenere le informazioni desiderate sulla disposizione delle bobine all'interno del reparto produttivo è stato utilizzato il Global Optimization Toolbox di Matlab per risolvere problemi di ottimizzazioni. Questo si basa sulla creazione di algoritmi genetici per ottimizzare funzioni obiettivo o di vincolo, discontinue, continue, stocastiche. È un algoritmo stocastico basato sulla popolazione effettuando ricerche casuali per mutazione e crossover dei membri della popolazione. I sistemi di ottimizzazione permettono di trovare il punto che riduce al minimo la funzione obiettivo, in questo caso come risolutore è stata utilizzata la funzione "ga" che trova il minimo di funzionalità usando l'algoritmo genetico. Questo minimo può essere locale o globale; quello locale è un punto in cui il valore della funzione è minore o uguale al valore nei punti vicini, ma possibilmente maggiore che in un punto distante mentre quello globale è un punto in cui il valore della funzione è minore o uguale al valore in tutti gli altri punti ammissibili. In generale, i solutori Global Optimization Toolbox trovano un ottimo locale.



**Figura 46: Minimo locale e globale delle funzioni obiettivo**

È stato necessario definire un flusso di lavoro per risolvere i problemi di ottimizzazione ovvero:

1. **La definizione dell'obiettivo da ottimizzare:** valutare dove e quante bobine inserire all'interno del magazzino;
2. **La creazione di una funzione obiettivo:** la funzione di minimizzazione dei costi, una funzione lineare che ci permette di avere informazioni sul posizionamento e sulla quantità di bobine inserite in funzione del costo totale dell'impianto, valutato come il costo fisso delle bobine trasmittenti più il costo variabile per il numero di bobine inserite più il costo della bobina ricevente per il numero di veicoli come rappresentato dalla formula seguente:

$$C_{tot} = C_{fix} + n_{wpt} * C_{wpt} + n_{veic} * C_{rec}$$

3. **La creazione della funzione di vincolo:** la funzione che andrà in pasto all'algoritmo di ottimizzazione. Come vincoli sono stati utilizzati: un vincolo sulla continuità orizzontale del corridoio e quello sul DeltaSoc (State of Charge). Nel primo caso è stato imposto un vincolo sulla necessità di adibire, il corridoio che separa le banchine di carica e scarica dagli scaffali, con le bobine trasmittenti essendo questa zona altamente utilizzata per soddisfare le varie operazioni nel turno. Per quanto riguarda il secondo vincolo è stato impostato un valore di DeltaSoc (variazione dello stato di carica della batteria), modificabile in base alle richieste del cliente;
4. **La definizione di un flusso di calcolo:** sia per la funzione obiettivo che per la funzione di vincolo. In entrambi i casi questo flusso è stato associato al numero di bobine trasmittenti da inserire all'interno del reparto;
5. **L'esecuzione del risolutore:** ovvero viene lanciato il run del modello;
6. **Valutazione dei risultati:** come già detto l'obiettivo principale del modello è stato la valutazione di quante bobine occorrono inserire per minimizzare il costo dell'impianto, grazie all'importazione nel modello Matlab dei tempi precedentemente rilevati dal

modello simulativo, ovvero i tempi all'interno del magazzino dove il Forklift staziona per la maggior parte della simulazione. Sono stati valutati inoltre altre informazioni quali:

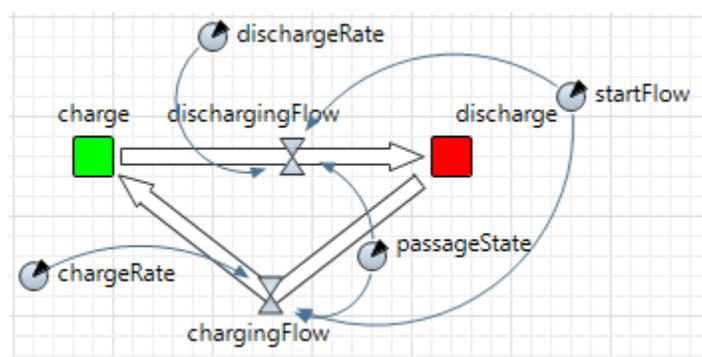
- I tempi in cui il carrello elevatore è sottoposto a ricarica,
- Il consumo ovvero la scarica che la batteria ha durante il turno lavorativo valutato come la potenza massima (impostata a 4.3kW) per una potenza mix (impostata a 0.6279 ovvero la potenza media durante l'utilizzo del carrello sia in trazione che durante il sollevamento delle forche valutata circa il 63% della potenza di picco) per i tempi di ricarica totali,
- L'energia totale immagazzinabile in batteria (valutata come tensione per capacità),
- L'energia ricaricata (valutata come i tempi di ricarica per la potenza nominale impostata a 4 kW per l'efficienza di ricarica impostato a 0.85),
- La variazione di energia nel turno (valutata come l'energia di ricarica meno il consumo),
- La variazione percentuale del Soc durante il turno di lavoro (valutata come la variazione di energia nel turno diviso l'energia totale immagazzinata in percentuale).

Lanciando la simulazione il grafico di maggior interesse è stato quello di una matrice di zero e uno che rappresenta il magazzino reale con le 10 corsie. In particolare le celle con il numero 1 rappresentano la presenza di una bobina trasmittente viceversa quelle con 0. Sono stati poi plottati altri due grafici entrambi aventi sulle ascisse il numero di bobine trasmittenti inserite e sulle ordinate in uno il costo totale dell'impianto e nell'altro il deltaSoc ovvero la variazione di stato di carica della bobina ricevente.

7. Se i risultati non sono soddisfacenti occorre ripetere i punti di partenza modificando le opzioni che ci portano all'ottimizzazione del modello

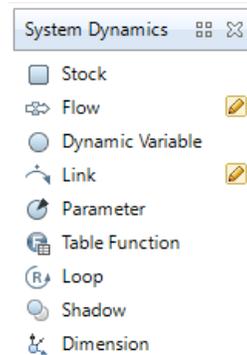
### 4.1.3. Valutazione dello stato di carica della batteria

Una volta che si hanno a disposizione le zone del magazzino in cui è necessario inserire le bobine di ricarica è stato possibile far fronte al secondo obiettivo che ci si è riproposti di soddisfare nella seguente trattazione, ovvero valutare la carica e scarica a cui la batteria del carrello elevatore, viene sottoposta durante le ore di simulazione. In particolare l'obiettivo è stato validare il modello analitico (il vero scopo di un modello simulativo), ovvero, sulla base delle informazioni di dove posare il track di alimentazione della batteria, dimostrare che durante la simulazione si riescono a rispettare i vincoli sullo stato di carica della batteria impostato nel modello Matlab, altrimenti questo significherebbe non avere una totale validità del modello analitico. Per fare questo è stato utilizzato di nuovo il programma di simulazione Anylogic per creare uno schema di System Dynamics di seguito rappresentato.



**Figura 47: Schema di System Dynamics per la valutazione della carica del carrello elevatore**

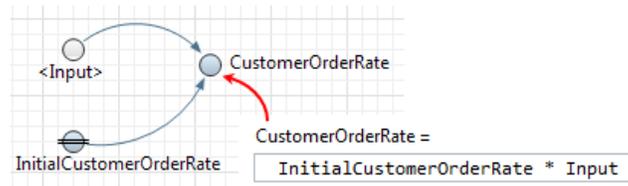
Ogni componente che lo caratterizza è stato reperito dall'apposita lista.



**Figura 48: Componenti per la realizzazione di uno schema System Dynamics**

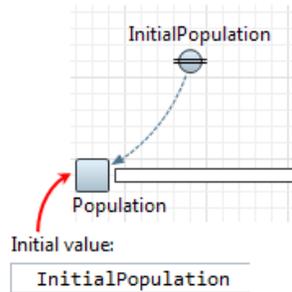
In System Dynamics gli stock (noti anche come livelli, accumuli o variabili di stato) vengono utilizzati per rappresentare i processi del mondo reale (ad es. Stock di materiale, conoscenza, persone, denaro), definendo la parte statica del sistema. I Flow, ovvero i flussi, definiscono come i valori degli Stock cambiano nel tempo e quindi definiscono le dinamiche del sistema. Sebbene i diagrammi di stock e di flusso possano contenere solo stock e flussi, è buona pratica definire concetti intermedi con variabili dinamiche. Le variabili comunemente dinamiche sono costituite da funzioni di stock (costanti o input esogene). Nel caso in cui sia necessario definire una costante, si rende utile l'utilizzo di un parametro. Il Link è utilizzato per definire una dipendenza tra gli elementi di uno stock e il diagramma di flusso. Esistono due tipi di Link:

- Se alcuni elementi (stock, flusso, variabile dinamica o parametro) sono menzionati in una formula di un flusso o in una variabile dinamica, questo tipo di collegamento viene disegnato con una linea continua:



**Figura 49: Link con linea continua**

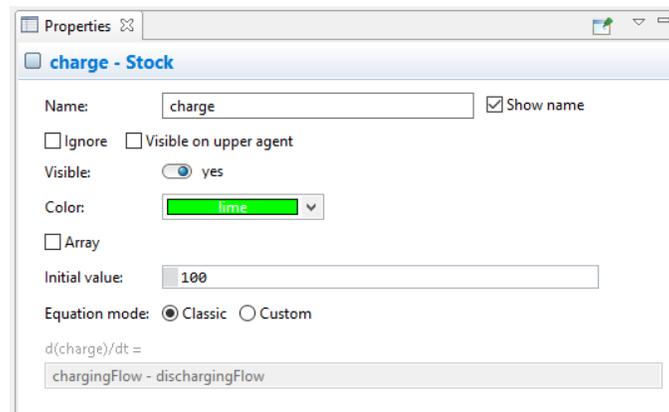
- Se l'elemento è menzionato nel valore iniziale dello stock, allora questo tipo di collegamento viene disegnato con una linea tratteggiata:



**Figura 50: Link con linea tratteggiata**

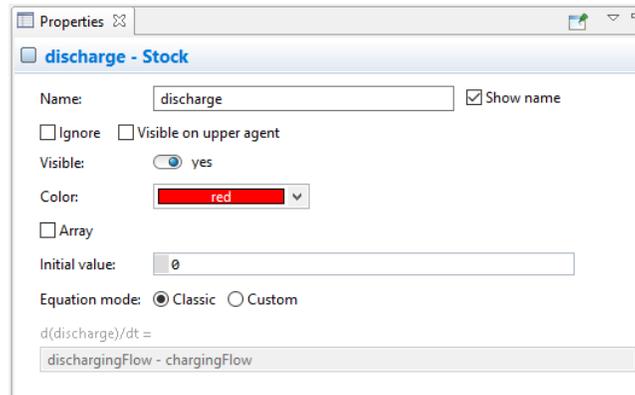
Il Loop è solo un identificatore grafico, costituito da un'etichetta con una breve descrizione del significato del loop e una freccia che mostra la direzione di questo. Non definisce il ciclo causale in sé, ma mostra solo le informazioni sulle dipendenze causali esistenti nel diagramma di flusso e di stock, ovvero mostra come le variabili si influenzano a vicenda. Shadow è una copia di una variabile delle dinamiche del sistema. Dimension è utilizzato per definire le dimensioni delle variabili di matrice. Analogamente ad altri strumenti tradizionali di dinamica del sistema, AnyLogic supporta gli array. L'Array consente di creare un unico diagramma per tutti i livelli. Pertanto, il modello rimane compatto e le modifiche apportate interesseranno l'intero modello, e non un singolo livello.

In particolare lo schema si compone di due blocchi Stock, due Flow, sei Link e quattro parametri. Il blocco di inizio del diagramma di flusso è il blocco **Stock** ed è stato validato con il nome di *Charge* necessario alla simulazione della carica iniziale della batteria a cui è stato assegnato il valore iniziale del 100%.



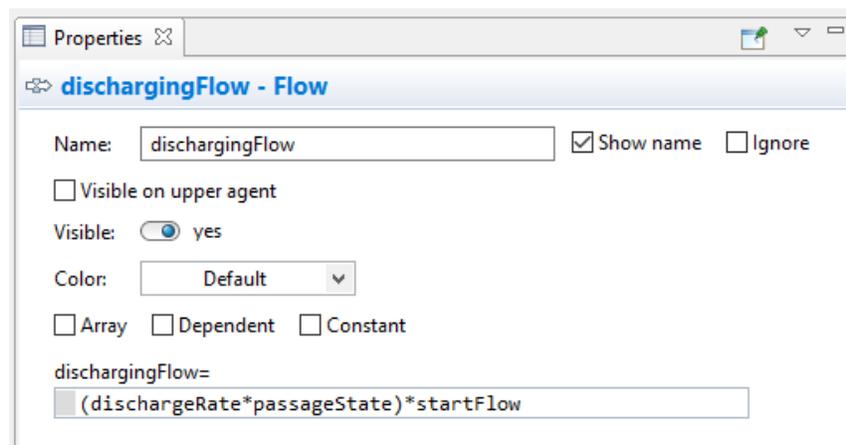
**Figura 51: Finestra di lavoro del blocco Stock Charge**

Allo stesso modo è stato creato il blocco che simula la scarica della batteria sempre tramite un blocco Stock a cui è stato dato il nome di *Discharge*. Il suo valore iniziale è dello 0%.

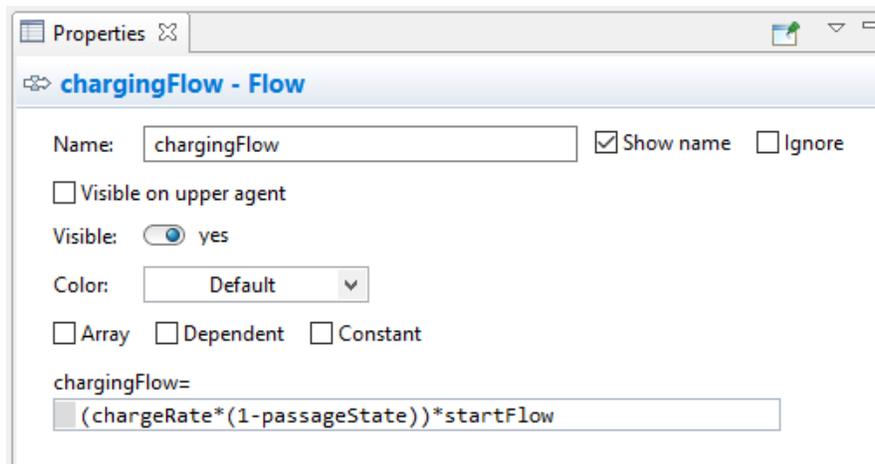


**Figura 52: Finestra di lavoro del blocco Stock Discharge**

I due blocchi di carica e scarica devono essere collegati tra loro tramite l'elemento **Flow**. In particolare per la scarica è stato utilizzato un flusso detto *dischargingFlow* che collega il blocco di Charge alla Discharge. Il flusso quindi serve per passare da una condizione di carica della batteria a una condizione di scarica. Allo stesso modo dal blocco di Discharge a quello di Charge è stato realizzato un ulteriore flusso di ricarica denominato *chargingFlow* che consente alla batteria di ricaricarsi.

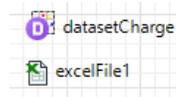


**Figura 53: Finestra di lavoro di blocco DischargingFlow**



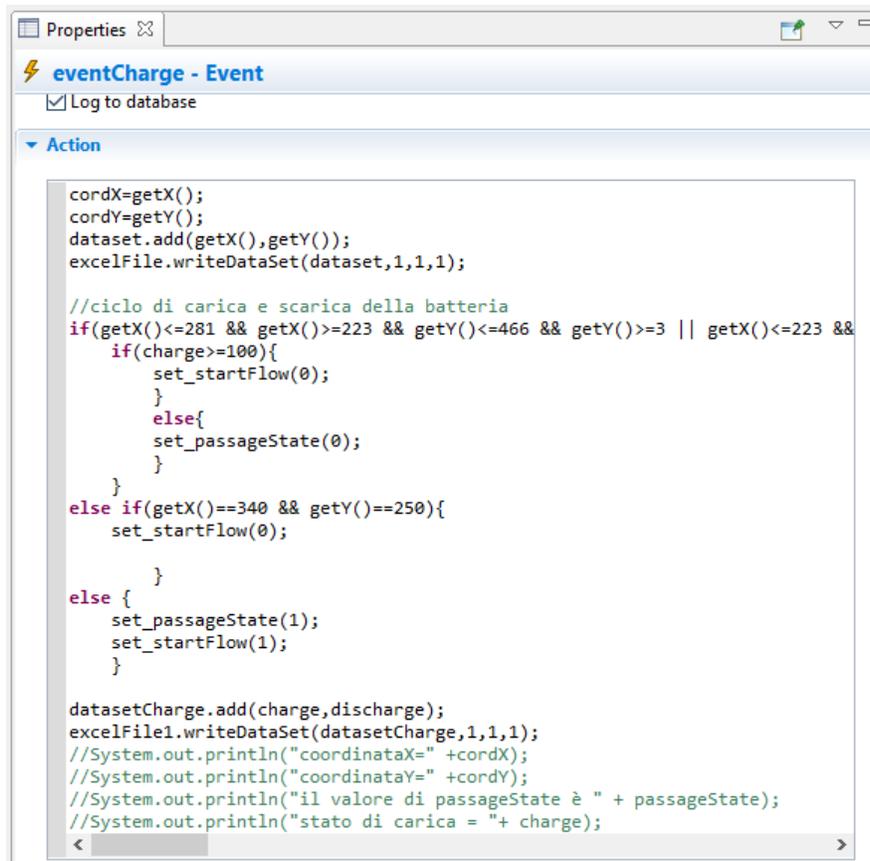
**Figura 54: Finestra di lavoro del blocco ChargingFlow**

In entrambi i casi è stato inserito un vincolo di carica e scarica e per fare questo è stato necessario l'utilizzo di un parametro chiamato *passageState* proprio per mettere in rilievo che si tratta di quel parametro che permette di passare dalla condizione di scarica a quella di carica. Questo parametro è stato inizializzato a 1 e quindi viene avviato il flusso di scarica, questo perché a inizio simulazione la batteria è pienamente carica e quindi non può che scaricarsi, il parametro viene poi settato a 0 ovvero si passa al flusso di ricarica solo se il carrello elevatore passa in prossimità dei corridoi nei quali è stata posizionata una bobina di ricarica. A tal proposito anche in questo contesto è stato funzionale l'utilizzo di un evento ciclico denominato *eventCharge* all'interno del quale è stato inserito un ciclo if. Questo ciclo ci ha permesso di chiarire la condizione di carica e scarica ovvero se le coordinate che il carrello ha durante la simulazione sono contenute nel range di valori dove sono state posizionate le bobine allora la batteria si ricarica e quindi il parametro *passageState* viene settato a zero, se invece è fuori questo range il parametro è inevitabilmente settato a uno, quindi la batteria si scarica. I valori di carica e scarica del modello simulativo sono poi stati inseriti, in un *dataSet* chiamato *dataSetCharge* associato ad un foglio Excel:



Inoltre, se il carrello è all'interno dell'area con i pickups e lo stato di carica è già al 100% il programma setta il parametro *startFlow* a zero ovvero è stato inserito un limite sulla capacità di ricarica inevitabilmente mai superiore al 100%. Questo parametro infatti è stato inserito all'interno della condizione del *chargingFlow* e del *dischargingFlow* in modo tale che se

nullo riesce ad interrompere entrambi i flussi di carica e scarica, è stato inoltre utilizzato per evitare che il carrello quando è fermo nella banchina di carico in attesa di nuovi pezzi da caricare, in attesa di nuovi ordini da soddisfare, trovandosi fuori dalla zona con le bobine trasmettenti vada a scaricarsi. Questa postazione di fermo macchina si trova nelle coordinate (340,250). Il range di valori dove sono state posizionate le bobine sono stati identificate banalmente tramite le coordinate (x, y) del magazzino.



```
cordX=getX();
cordY=getY();
dataset.add(getX(),getY());
excelFile.writeDataSet(dataset,1,1,1);

//ciclo di carica e scarica della batteria
if(getX()<=281 && getX()>=223 && getY()<=466 && getY()>=3 || getX()<=223 &&
    if(charge>=100){
        set_startFlow(0);
    }
    else{
        set_passageState(0);
    }
}
else if(getX()==340 && getY()==250){
    set_startFlow(0);
}
else {
    set_passageState(1);
    set_startFlow(1);
}

datasetCharge.add(charge,discharge);
excelFile1.writeDataSet(datasetCharge,1,1,1);
//System.out.println("coordinataX=" +cordX);
//System.out.println("coordinataY=" +cordY);
//System.out.println("il valore di passageState è " + passageState);
//System.out.println("stato di carica = "+ charge);
```

**Figura 55: Finestra di lavoro dell'EventCharge**

Fondamentale nel seguente sistema è sicuramente il quantitativo di carica e scarica da associare al carrello elevatore, ovvero la % di quanto il carrello si scarica e si ricarica, a seconda se si trova o meno su una bobina trasmettente. Nel modello questa “velocità” di carica e scarica sono state rappresentate dai due parametri: *dischargeRate* e *chargeRate* valutati come la percentuale del tempo necessario per scaricare e caricare la batteria. Per

avere delle informazioni di questo tipo sono state necessarie delle valutazioni sulle prestazioni della batteria utilizzata. Di questa sappiamo che è dotata di una Capacità di 625Ah e una tensione di 48V.

**Per la carica:**

Potenza di carica	4	kW
Efficienza di ricarica	0,85	
Tensione	48	V
Corrente di ricarica	70,8	Ah
Capacità	625	Ah
Tempo di ricarica	31764,71	sec
Charge Rate	0,25	

**Tabella 1: Valutazione del parametro ChargeRate**

**Per la scarica:**

Potenza di scarica	2,5	kW
Tensione	48	V
Corrente di scarica	52	A
Capacità	625	Ah
Tempo di scarica	43200	sec
Discharge Rate	0,15	

**Tabella 2: Valutazione del parametro DischargeRate**

Il modello non lavorando con unità di misura internazionali ma con delle percentuali, per capire che valore inserire all'interno di questi due parametro, sono state effettuate delle prove inserendo un valore unitario e valutando dopo un'ora di simulazione lo stato di carica della batteria. Riportando poi questo valore ai valori reali che abbiamo del tempo di carica e scarica della batteria sono stati ottenuti i valori indicati.

#### 4.1.4. Le simulazioni

Una volta definito il modello e gli obiettivi che con questo si vogliono raggiungere sono state lanciate più simulazioni per studiare diverse realtà industriali. In particolare il primo parametro da impostare prima di eseguire una simulazione su un modello simulativo è sicuramente il tempo in cui il programma deve girare ed elaborare tutti i comandi programmati dai vari script in Java. A tal proposito si è scelto di analizzare tre situazioni:

- 1)  8h  un singolo turno lavorativo;
- 2)  16h  due turni lavorativi;
- 3)  24h  tre turni lavorativi.

Tutte le simulazioni sono state eseguite con gli stessi valori impostati all'interno dei parametri del modello fatta eccezione per il parametro che regola la quantità di pezzi che di volta in volta il camion scarica. Questa eccezione nasce dalla necessità di dover far fronte a dei limiti del modello ovvero se la quantità di pezzi che si accumula nella LoadingArea diventa in numero maggiore rispetto alle postazioni negli scaffali il modello restituisce un errore e si blocca. Accumuli inevitabili dato il fatto che il carrello all'interno del modello ha una certa velocità di movimento e anche nell'eseguire le operazioni di carico e scarico necessita di tempi che non possono essere esattamente tarati al tempo di arrivo del Track. Per quanto riguarda il tempo di arrivo del camion questo avviene in un tempo uniforme tra 20 e 30 minuti e impiega un tempo tra 5 e 7 minuti per scaricare i pezzi di cui è provvisto. L'arrivo degli ordini avviene in un tempo uniforme tra 3 e 6 minuti. E come capacità massima di accumulo ordini è stato assegnato un valore di 20 pezzi, ovvero la quantità oltre il quale il carrello smette di eseguire qualsiasi operazione di carico e soddisfa gli ordini. Per quanto riguarda i pezzi che vengono scaricati dal camion per la prima simulazione di 8h sono stati previsti uno scarico di 25 pezzi, per la seconda simulazione di 16h i pezzi scaricati sono 18 e infine per la terza e ultima simulazione di 24h sono 15. Di ogni simulazione sono stati ricavati i tempi che il carrello ha all'interno del magazzino, in particolare i tempi che ha in prossimità dell'ubica di ogni corsia. I tempi sono stati ricavati in secondi per avere una

maggiore precisione, e la matrice ricavata è stata diagrammata riproducendo lo schema grafico dello stabilimento caratterizzato quindi dalla zona di carico, da una di scarico, da 10 corsie e un corridoio che separa le banchine dagli scaffali. Inoltre è stata realizzata anche una matrice delle probabilità di uso dell'ubica.

- **Simulazione a 8h (un solo turno)**

**Tempi di impiego del magazzino per la Simulazione di 8h e matrice di probabilità:**

	Unloading Area 562					Loading Area 6192				
Corridoio	413	1199	1295	1528	1460	1638	1180	1083	725	533
1	204	163	243	337	270	267	273	237	260	274
2	259	178	134	261	194	168	206	166	150	289
3	162	144	134	160	173	198	227	183	167	123
4	165	180	134	205	154	157	125	116	141	111
5	84	99	85	144	174	118	96	125	82	108
6	75	76	75	80	82	123	119	88	79	89
7	61	62	62	59	76	74	96	66	60	62
8	49	51	50	51	58	63	51	48	51	50
9	0	0	0	0	50	49	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corsie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabella 3: Tabella dei tempi del carrello in ogni ubica per 8h**

	Unloading Area 1,95 %					Loading Area 21,50 %				
Corridoio	1,434	4,16	4,50	5,31	5,07	5,69	4,10	3,76	2,52	1,85
1	0,708	0,57	0,84	1,17	0,94	0,93	0,95	0,82	0,90	0,95
2	0,899	0,62	0,47	0,91	0,67	0,58	0,72	0,58	0,52	1,00
3	0,563	0,50	0,47	0,56	0,60	0,69	0,79	0,64	0,58	0,43
4	0,573	0,63	0,47	0,71	0,53	0,55	0,43	0,40	0,49	0,39
5	0,292	0,34	0,30	0,50	0,60	0,41	0,33	0,43	0,28	0,38
6	0,260	0,26	0,26	0,28	0,28	0,43	0,41	0,31	0,27	0,31
7	0,212	0,22	0,22	0,20	0,26	0,26	0,33	0,23	0,21	0,22
8	0,170	0,18	0,17	0,18	0,20	0,22	0,18	0,17	0,18	0,17
9	0	0	0	0	0,17	0,17	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corsie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

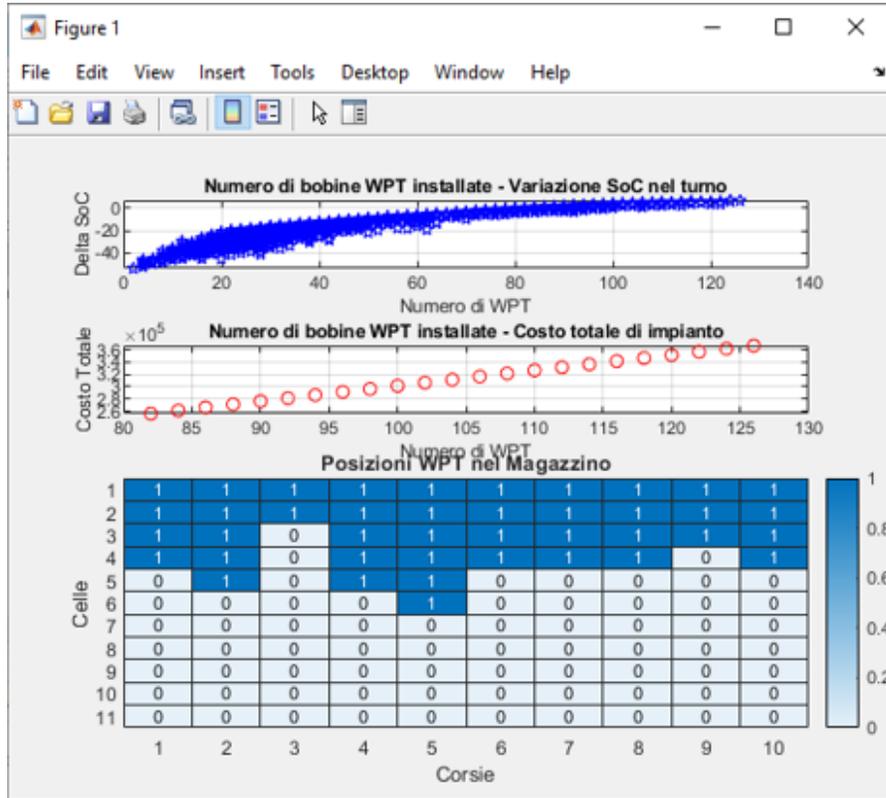
**Tabella 4: Tabella delle probabilità per 8h**

Questi tempi sono stati poi inseriti nel modello di ottimizzazione in Matlab che ha permesso appunto, di ricavare l'ottimale posizionamento delle bobine, in funzione del costo dell'impianto, necessarie a soddisfare con questi tempi un certo valore di Soc (State of charge), ovvero di stato di carica della batteria. In particolare di ogni simulazione sono stati analizzati anche qui tre scenari, il primo rappresenta una condizione di carica continua del veicolo, mentre le altre due sono soluzioni più "rischiose":

- 1)  $\Delta Soc=0\%$ : ovvero a fine simulazione lo stato di carica della batteria deve essere identico allo stato iniziale e questo si verifica durante tutta la simulazione essendo il veicolo continuamente in uno stato di ricarica;
- 2)  $\Delta Soc=90\%$ : ovvero a fine simulazione lo stato di carica della batteria deve essere del 10%;
- 3)  $\Delta Soc=95\%$ : ovvero a fine simulazione lo stato di carica della batteria deve essere del 5%.

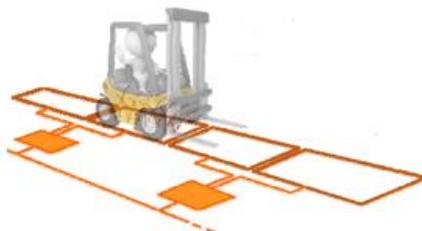
Dal modello in matlab è stata ricavata la matrice di zero e uno che colloca o meno una bobina nell'ubica in questione, ovvero la matrice di ottimizzazione per capire dove e quante bobine utilizzare nell'impianto in funzione del valore di carica da ottenere a fine simulazione.

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=0\%$  per la simulazione di 8h:**



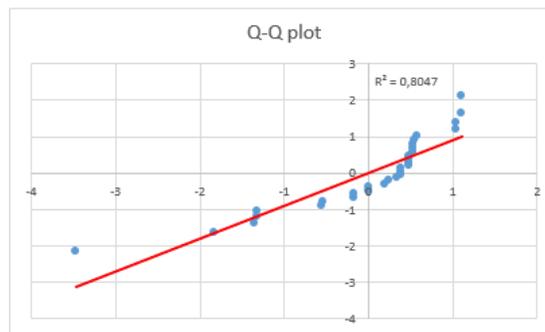
**Figura 56: Matrice delle postazioni delle bobine per 8h con  $\Delta Soc=0\%$**

Con i tempi ricavati dal modello simulativo il modello di ottimizzazione ha fornito questa disposizioni di bobine. Per questo scenario sono state inserite 82 bobine. Dall'immagine se ne contano solo la metà in realtà il sistema di inserimento delle bobine trasmettenti tra uno scaffale e l'altro prevede due corse elettrificate avendo una struttura rettangolare.



**Figura 57: Bobine rettangolari**

Una volta nota la disposizione delle bobine, con il modello simulativo è stato ricavato lo stato di carica della batteria utilizzata durante tutta la simulazione. Per ogni scenario sono stati eseguiti 30 run in modo da poter effettuare delle statistiche sul raggiungimento dell'obiettivo cioè sul livello di Soc impostato. A tal proposito si sono utilizzati dei test di ipotesi sulla media della popolazione per determinare se una data ipotesi è validata da una evidenza empirica. È stato necessario valutare la distribuzione della popolazione che, derivante da dati ottenuti da diverse simulazioni, non ha restituito una distribuzione normale, essenziale però per condurre test parametrici come quello condotto. Avendo però, ottenuto un numero sufficientemente elevato di dati, la distribuzione è stata approssimata ad una normale. Sono stati effettuati dei Q-Q plot per valutarne la distribuzione:

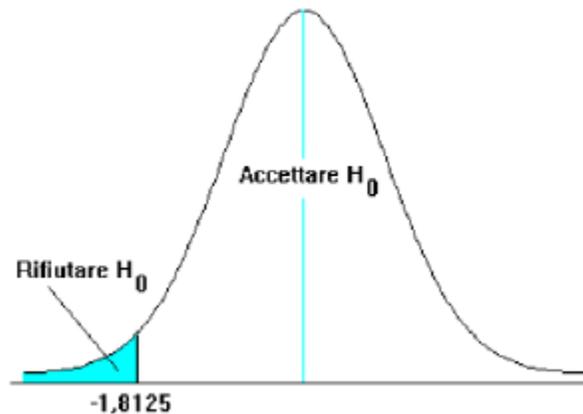


**Diagramma 1: Q-Q plot per valutare la distribuzione normale**

Come test di ipotesi è stato condotto un t-test anche detto t di Student ovvero una distribuzione di probabilità continua che si basa sul confronto tra medie. In particolare nel caso in esame il test è servito per confrontare la media di un campione di dati con una generica media attesa ovvero il valore di State of Charge che si vuole ottenere a fine simulazione. Quella che si vuole verificare è l'ipotesi nulla  $H_0$  ovvero che il Soc finale che viene impostato in ognuno degli scenari sia uguale a quello che si ottiene realmente dalle 30 simulazioni. Di contro a questa ipotesi viene impostata una ipotesi alternativa  $H_a$  ovvero che lo stato di carica che si ottiene è diverso a quello ipotizzato. In questo passo però si parla di test a una coda o unilaterale ovvero la parte di rifiuto è solo da una parte della distribuzione, cioè a sinistra:

$$\begin{cases} H_0: \mu = \mu_0 \\ H_a: \mu < \mu_0 \end{cases}$$

dove  $\mu_0$  indica il particolare valore ipotizzato.



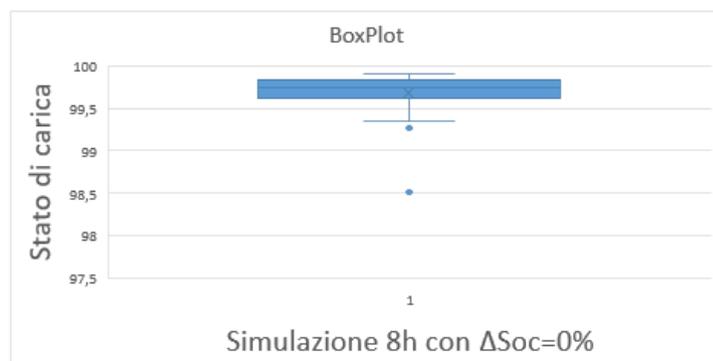
**Figura 58: T-test unilaterale sinistro**

Dove il valore impostati rappresenta il valore di t critico oltre il quale si definisce la regione di rifiuto. Nella seguente simulazione quindi l'ipotesi nulla è  $\mu=100\%$  e quella alternativa è  $\mu<100\%$ .

	<i>Variabile 1</i>	<i>Variabile 2</i>
Media	99,67916801	100
Varianza	0,070166326	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	-6,63397645	
P(T<=t) una coda	1,42177E-07	
t critico una coda	1,699127027	

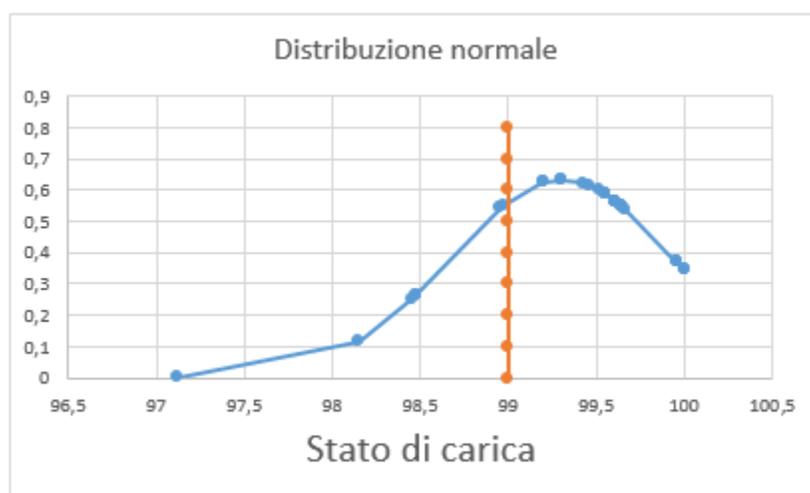
**Tabella 5: T-test per la simulazione di 8h con  $\Delta Soc=0\%$**

Essendo il valore della statistica test maggiore in modulo del valore t critico significa che ricade nella regione di rifiuto, questo ci porta a dire che la media della prima variabile cioè della popolazione è “significativamente” diversa dalla media del valore atteso cioè della seconda variabile. L'ipotesi nulla deve essere quindi rifiutata. Risultato ovvio data l'impossibilità di avere esattamente per ogni simulazioni un valore di carica finale pari al 100%. Tramite un boxplot è stato possibile valutare l'andamento dei dati in funzione del loro stato di carica:



**Diagramma 2: Boxplot per la simulazione di 8h con  $\Delta Soc=0\%$**

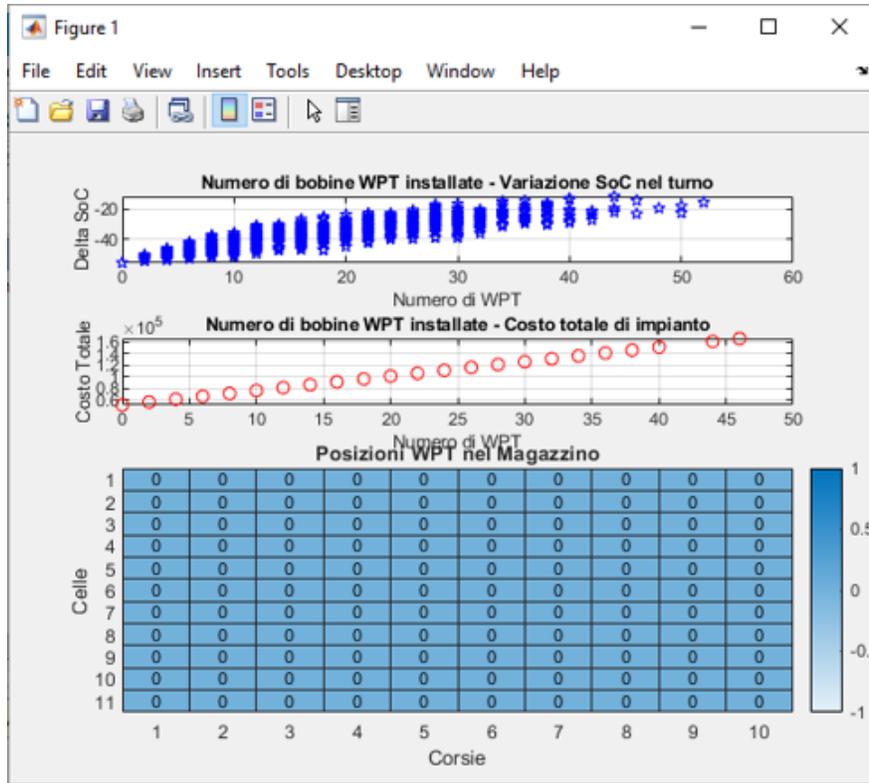
In particolare per la seguente simulazione è visibile come i dati si accentrino intorno al valore medio del 99.7% con soli due valori di outliers ovvero due valori valutati significativamente lontani dalla media ovvero di 99.2% e 98.5%, quindi assolutamente accettabili. Se volessimo valutare i dati che si trovano sotto una certa soglia ad esempio del 99% potremmo valutare come questi riguardano solo lo 0.23% dei casi totali:



**Diagramma 3: Distribuzione normale per la simulazione di 8h con  $\Delta Soc=0\%$**

Dalla statistica condotta è quindi possibile validare il modello analitico, in quanto fornisce dei risultati altamente accettabili e soddisfacenti. Lo stesso procedimento è stato utilizzato per tutte le altre simulazioni, potendo dimostrare per tutte la potenza del modello analitico.

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=90\%$  e  $\Delta Soc=95\%$  per la simulazione di 8h:**



**Figura 59: Matrice delle postazioni delle bobine per 8h con  $\Delta Soc=90\%$  e  $\Delta Soc=95\%$**

Dato il fatto che la batteria utilizzata si scarica in un tempo totale di 12h, nel caso della simulazione di 8h, sia per un  $\Delta Soc=90\%$  che per un  $\Delta Soc=95\%$  la matrice delle bobine restituisce un'informazione alquanto ovvia ovvero la necessità di non inserire nessuna bobina di ricarica. Con questa configurazione è stato analizzato il livello di carica durante i run, e per entrambi gli scenari lo stato di carica non scende mai sotto il 33% come ci si aspettava. Su questi particolari due scenari non è stato quindi necessario condurre nessuna statistica test, essendo non così rilevante.

- Simulazione a 16h (due turni)

**Tempi di impiego del magazzino per la Simulazione di 16h e matrice di probabilità:**

	Unloading Area 1177					Loading Area 11951				
Corridoio	635	2289	2338	2688	2522	2871	1883	1722	1127	800
1	508	613	431	695	615	820	674	504	416	439
2	486	548	489	505	564	517	448	462	439	364
3	386	297	399	385	470	426	341	382	346	328
4	307	215	261	321	250	404	314	272	307	307
5	244	258	190	298	301	472	223	268	200	291
6	170	182	172	235	226	346	234	220	190	225
7	151	156	153	213	170	198	163	163	169	153
8	133	134	135	146	155	151	153	137	135	135
9	0	0	0	0	135	135	24	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corsie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

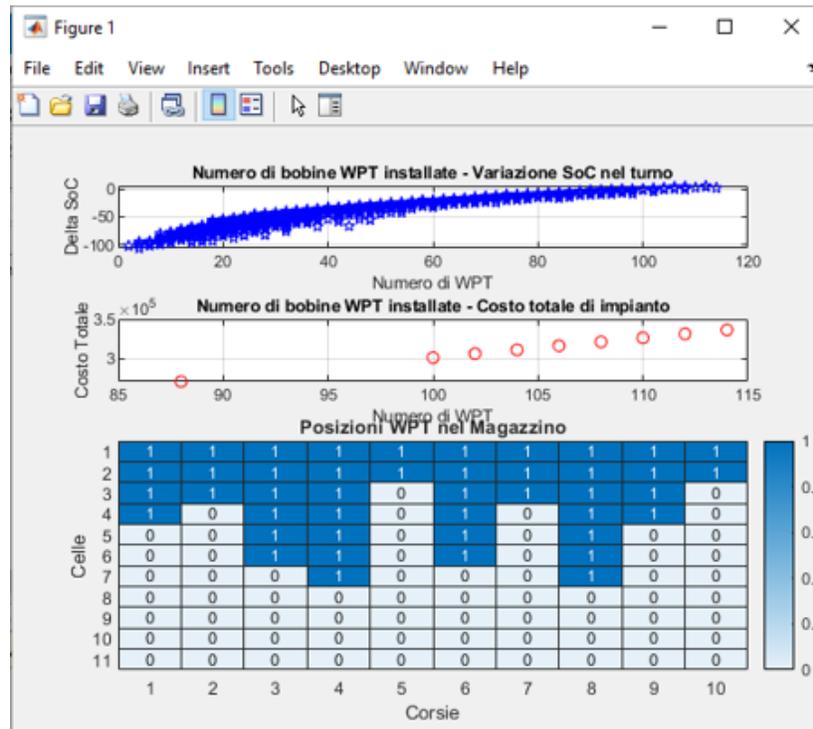
**Tabella 6: Tabella dei tempi del carrello in ogni ubica per 16h**

	Unloading Area 2,04 %					Loading Area 20,75 %				
Corridoio	1,102	3,97	4,06	4,67	4,38	4,98	3,27	2,99	1,96	1,39
1	0,882	1,06	0,75	1,21	1,07	1,42	1,17	0,88	0,72	0,76
2	0,844	0,95	0,85	0,88	0,98	0,90	0,78	0,80	0,76	0,63
3	0,670	0,52	0,69	0,67	0,82	0,74	0,59	0,66	0,60	0,57
4	0,533	0,37	0,45	0,56	0,43	0,70	0,55	0,47	0,53	0,53
5	0,424	0,45	0,33	0,52	0,52	0,82	0,39	0,47	0,35	0,51
6	0,295	0,32	0,30	0,41	0,39	0,60	0,41	0,38	0,33	0,39
7	0,262	0,27	0,27	0,37	0,30	0,34	0,28	0,28	0,29	0,27
8	0,231	0,23	0,23	0,25	0,27	0,26	0,27	0,24	0,23	0,23
9	0	0	0	0	0,23	0,23	0,04	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corsie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabella 7: Tabella delle probabilità per 16h**

Inserendo la matrice dei tempi all'interno dell'algoritmo di ottimizzazione, impostando un  $\Delta Soc=0\%$ , la disposizione di bobine che ne viene fuori è la seguente.

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=0\%$  per la simulazione di 16h:**



**Figura 60: Matrice delle postazioni delle bobine per 16h con  $\Delta Soc=0\%$**

In questo scenario sono state inserite 88 bobine, necessarie a raggiungere la richiesta di carica da ottenere e che minimizzano il più possibile la funzione obiettivo di minimizzazione del costo dell'impianto.

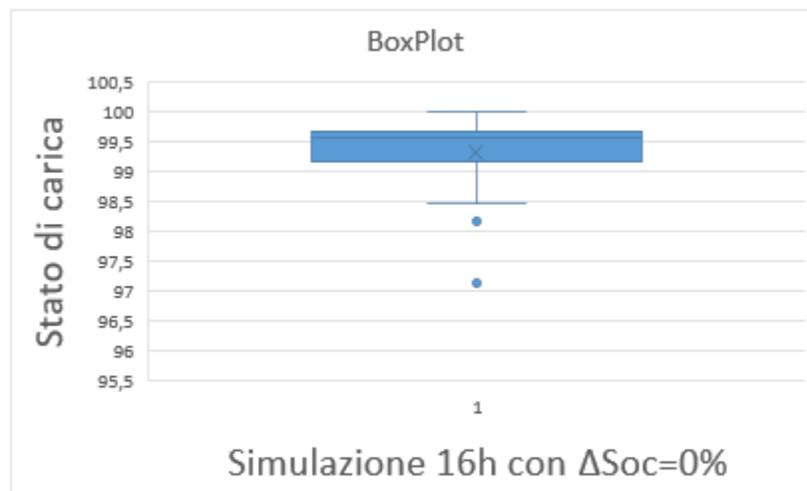
Per condurre il t-test nella seguente simulazione l'ipotesi nulla è  $\mu=100$  e quella alternativa è  $\mu<100$ .

	Variabile 1	Variabile 2
Media	99,3101007	100
Varianza	0,402279322	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	-5,957752768	
P(T<=t) una coda	8,94E-07	
t critico una coda	1,699127027	

**Tabella 8: T-test per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=0\%$**

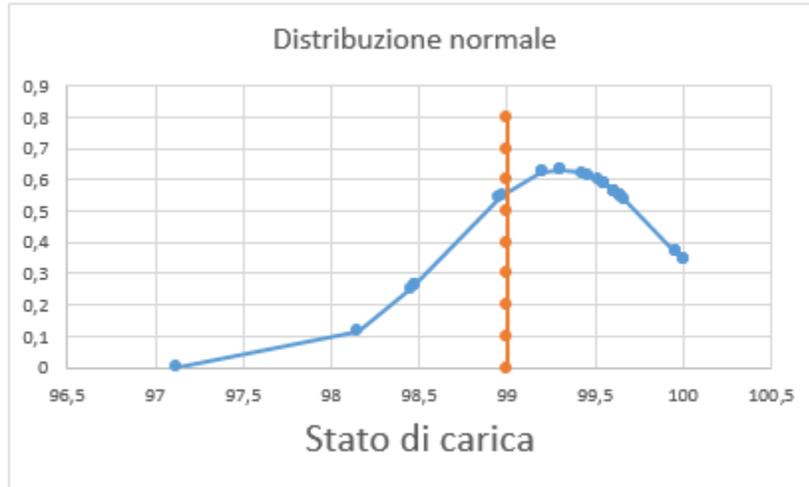
Anche in questo caso l'ipotesi nulla deve essere quindi rifiutata.

Tramite un boxplot è stato possibile valutare l'andamento dei 30 valori di carica finale:



**Diagramma 4: Boxplot per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=0\%$**

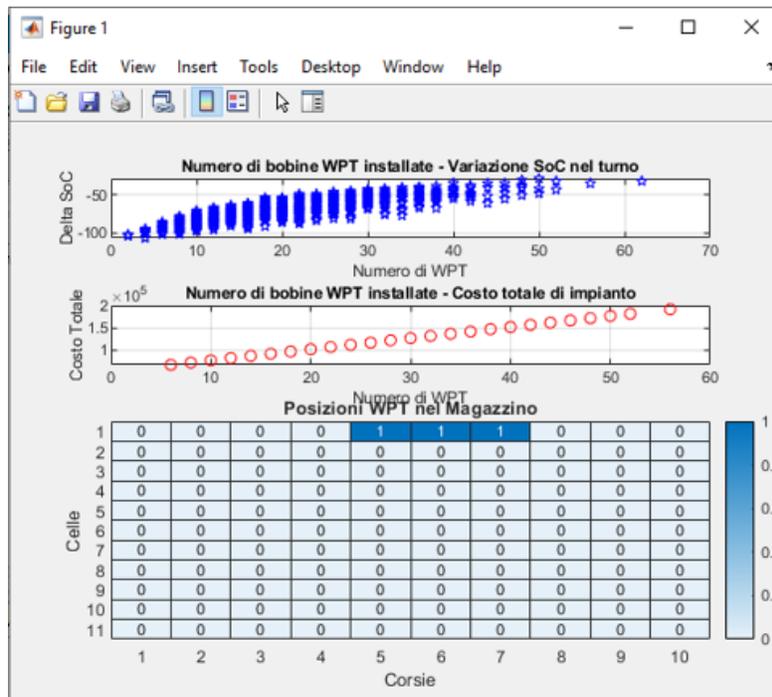
I valori si accentrano intorno ad una media 99.3% con due valori di outliers anche in questo caso assolutamente trascurabili. Riportando la distribuzione normale dei dati se dovessimo impostare un valore di carica sotto il quale rifiutare dei dati, allora se il valore a fare da soglia è il 99% di carica, solo lo 0.23% dei dati sarebbero da scartare:



**Diagramma 5: Distribuzione normale per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=0\%$**

Impostando nel modello di ottimizzazione in matlab un valore da ottenere di  $\Delta Soc=90\%$  dove e quante bobine inserire è rappresentato dalla matrice sottostante:

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=90\%$  per la simulazione di 16h:**



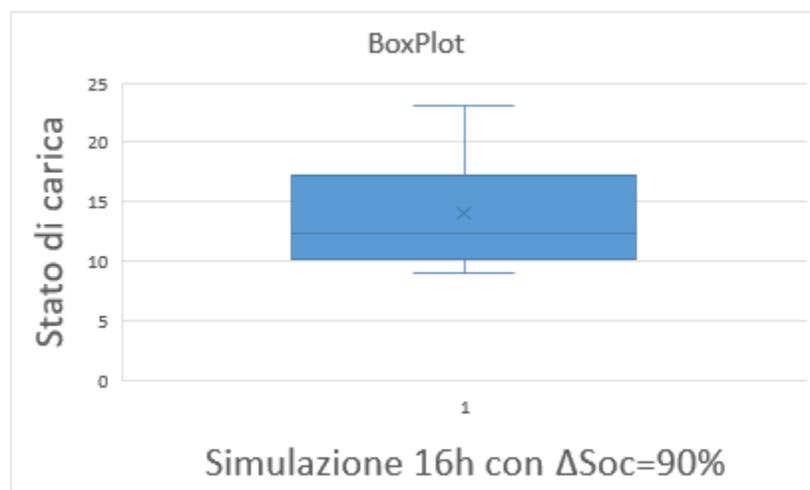
**Figura 61: Matrice delle postazioni delle bobine per 16h con  $\Delta Soc=90\%$**

Per realizzare la seguente configurazione sono state inserite 6 bobine di ricarica, nelle aree evidenziate. Il t-test condotto prevede come ipotesi nulla  $\mu=10$  e come ipotesi alternativa  $\mu \neq 10$ .

	Variabile 1	Variabile 2
Media	14,04799565	10
Varianza	17,96201025	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	5,231463438	
P(T<=t) una coda	6,66535E-06	
t critico una coda	1,699127027	

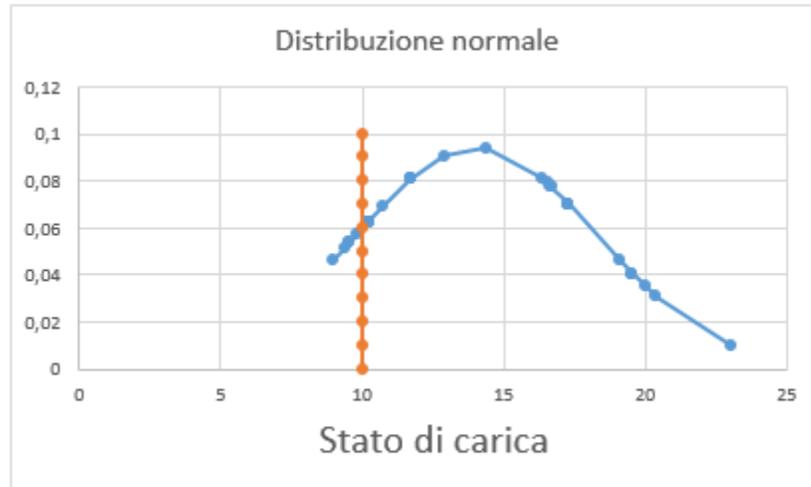
**Tabella 9: T-test per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=90\%$**

Anche in questo caso il test presenta come risultato un valore della statistica test maggiore del t critico allora ricade nella regione di rifiuto e l'ipotesi nulla deve essere rifiutata, ovvero la media delle 30 simulazioni pari alla variabile 1 è significativamente differente alla media del valore atteso. Ovvero la disposizione di bobine è ancora più performante di quanto ci si aspettasse. Vantaggio osservabile tramite il boxplot:



**Diagramma 6: Boxplot per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=90\%$**

In questa simulazione la media dei valori è del 14% di ricarica rispetto alla richiesta del 10%. Anche in questo caso però ci sono dei dati nella popolazione che non hanno raggiunto l'obiettivo. Rappresentando la distribuzione normale dei dati, usando come valore di soglia il 10% di carica solo lo 0.16% dei dati sarebbe da scartare:

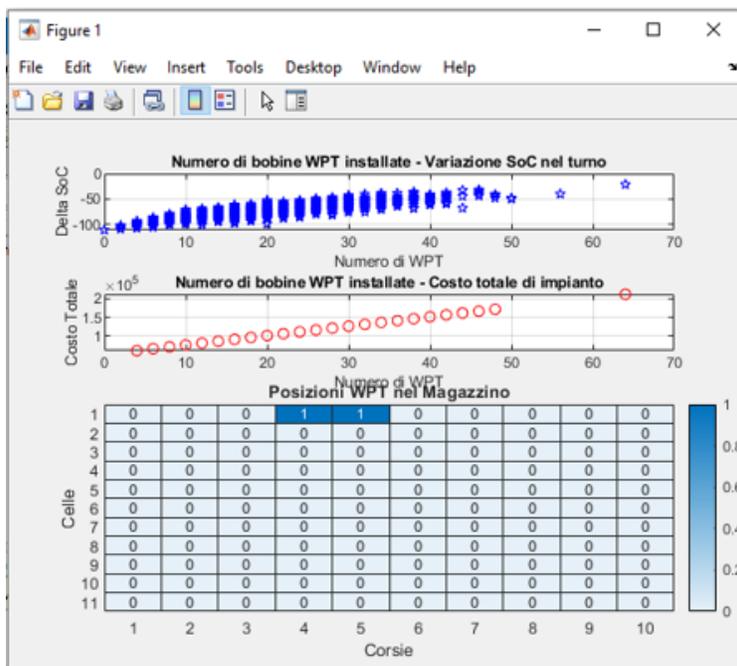


**Diagramma 7: Distribuzione normale per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=90\%$**

Dati che potrebbero non essere scartati semplicemente inserendo anche una sola bobine in più rispetto all'ottimo trovato.

La matrice di ottimizzazione per la simulazione di 16h con un  $\Delta Soc=90\%$  ha restituito questa configurazione di bobine:

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=95\%$  per la simulazione di 16h:**



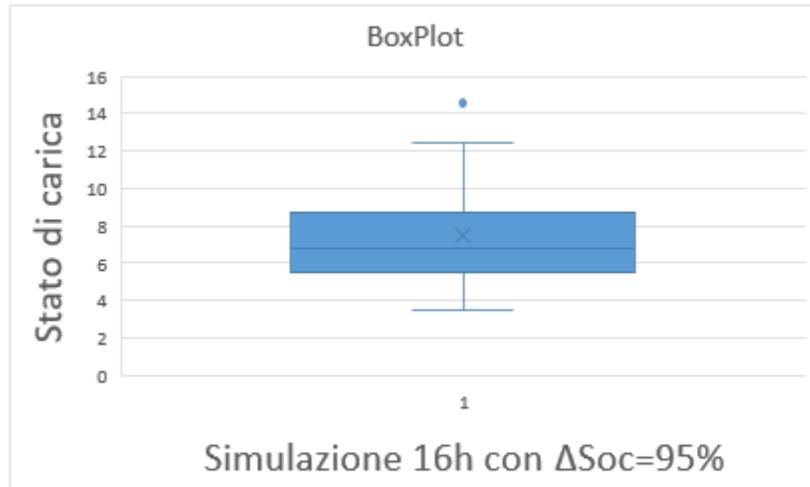
**Figura 62: Matrice delle postazioni delle bobine per 16h con  $\Delta Soc=95\%$**

Per realizzare la seguente configurazione sono state inserite 4 bobine di ricarica. Il t-test prevede un'ipotesi nulla di  $\mu=5\%$  e un'ipotesi alternativa  $\mu \neq 5$ .

	Variabile 1	Variabile 2
Media	7,495972533	5
Varianza	8,548371797	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	4,675830159	
P(T<=t) una coda	3,12028E-05	
t critico una coda	1,699127027	

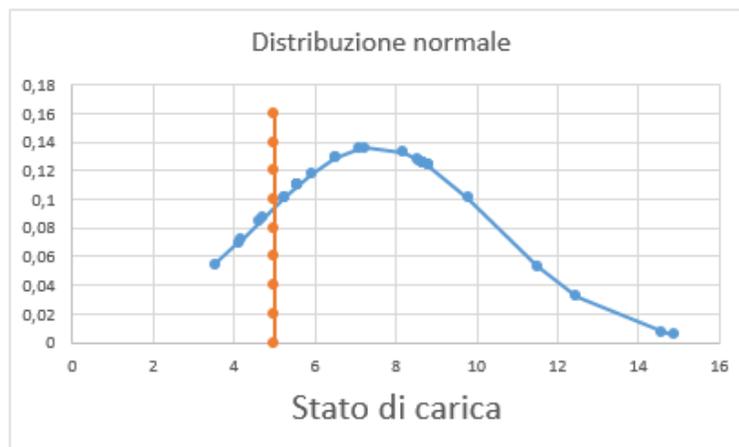
**Tabella 10: T-test per la simulazione di 16h con  $\Delta Soc=95\%$**

Anche in questo caso l'ipotesi nulla è da rifiutare ma come nel caso precedente la media della popolazione è maggiore del valore atteso, riuscendo non solo a validare il modello ma ad affermare come questo sia ancora più conservativo rispetto a quanto si poteva pensare, soprattutto nelle due situazioni più "rischiose" analizzate. Il tutto è valutabile tramite il boxplot:



**Diagramma 8: Boxplot per la simulazione di 16h per ΔSoc=95%**

In cui compare solo un outlier ma nella zona superiore al massimo quartile, ovvero un valore che si allontana in modo significativo dalla media ma in valore crescente. All'interno della popolazione sono inevitabili dati che si trovano sotto la soglia ipotizzata del 5% di carica.



**Diagramma 9: Distribuzione normale per la simulazione di 16h con ΔSoc=95%**

In questo caso i dati sotto la soglia sono solo lo 0.16% dei dati totali.

- Simulazione di 24h (tre turni)

**Tempi di impiego del magazzino per la Simulazione di 24h e matrice di probabilità:**

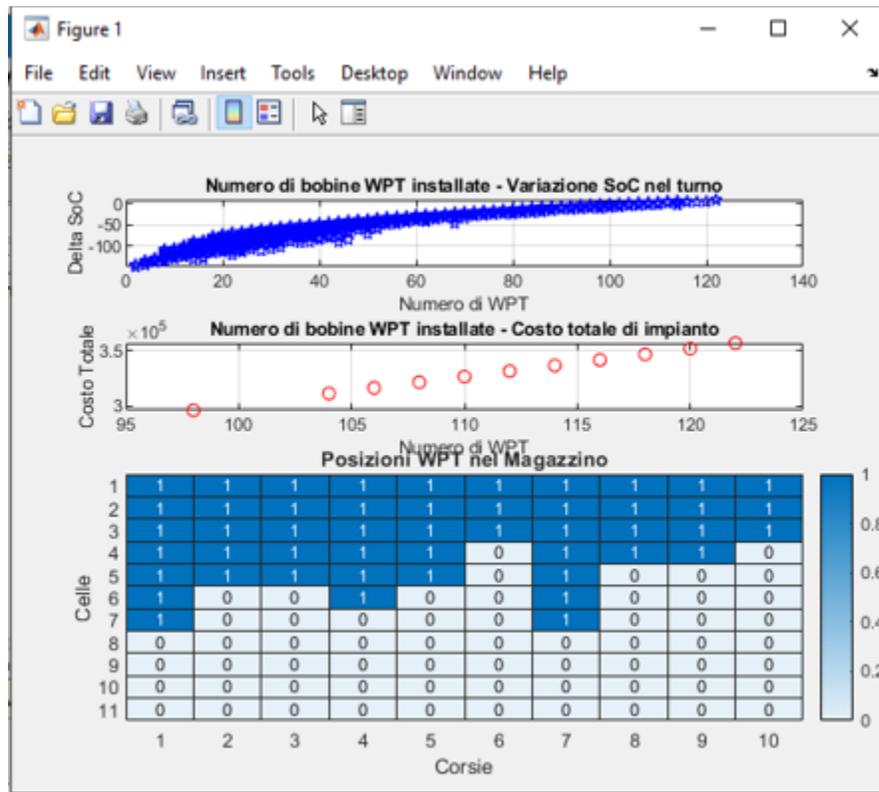
	Unloading Area 1855					Loading Area 23444				
Corridoio	742	3347	3313	3684	3461	3782	2682	2446	1561	1082
1	596	677	692	841	803	835	956	867	673	929
2	501	592	792	586	616	727	528	538	636	405
3	324	328	443	522	699	468	550	477	429	344
4	384	326	419	353	517	459	432	440	417	265
5	290	344	468	441	336	375	276	285	354	291
6	305	330	228	232	275	281	363	287	283	201
7	174	179	172	191	240	253	329	230	179	183
8	187	174	157	175	184	270	179	193	187	223
9	132	170	136	152	155	222	226	164	135	134
10	0	0	2	148	134	133	133	135	0	0
Corsie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabella 11: Tabella dei tempi del carrello in ogni ubica per 24h**

	Unloading Area 2,15 %					Loading Area 27,13 %				
Corridoio	0,859	3,87	3,83	4,26	4,01	4,38	3,10	2,83	1,81	1,25
1	0,690	0,78	0,80	0,97	0,93	0,97	1,11	1,00	0,78	1,08
2	0,580	0,69	0,92	0,68	0,71	0,84	0,61	0,62	0,74	0,47
3	0,375	0,38	0,51	0,60	0,81	0,54	0,64	0,55	0,50	0,40
4	0,444	0,38	0,48	0,41	0,60	0,53	0,50	0,51	0,48	0,31
5	0,336	0,40	0,54	0,51	0,39	0,43	0,32	0,33	0,41	0,34
6	0,353	0,38	0,26	0,27	0,32	0,33	0,42	0,33	0,33	0,23
7	0,201	0,21	0,20	0,22	0,28	0,29	0,38	0,27	0,21	0,21
8	0,216	0,20	0,18	0,20	0,21	0,31	0,21	0,22	0,22	0,26
9	0,153	0,20	0,16	0,18	0,18	0,26	0,26	0,19	0,16	0,16
10	0	0	0	0,17	0,16	0,15	0,15	0,16	0	0
Corsie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabella 12: Tabella delle probabilità per 24h**

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=0\%$  per la simulazione di 24h:**



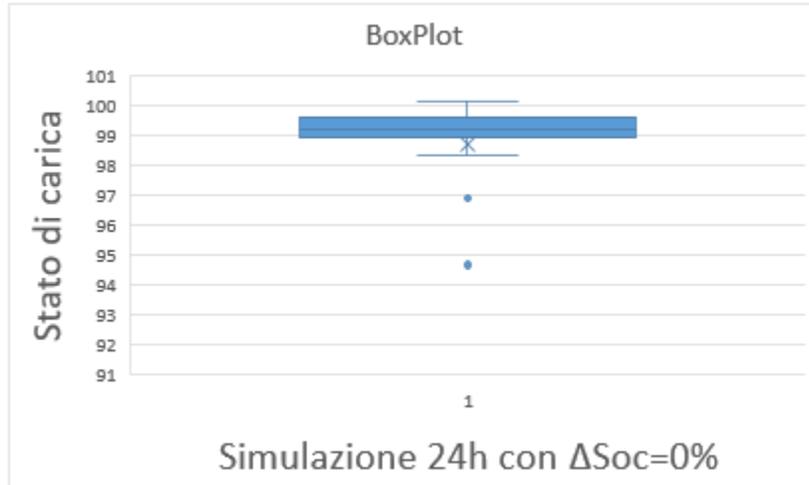
**Figura 63: Matrice delle postazioni delle bobine per 24h con  $\Delta Soc=0\%$**

Per realizzare la seguente configurazione sono state inserite 98 bobine di ricarica. Il t-test prevede una ipotesi nulla di  $\mu=100$  e ipotesi alternativa di  $\mu<100$ :

	Variabile 1	Variabile 2
Media	98,67121448	100
Varianza	2,82953987	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	-4,32670818	
P(T<=t) una coda	8,18677E-05	
t critico una coda	1,699127027	

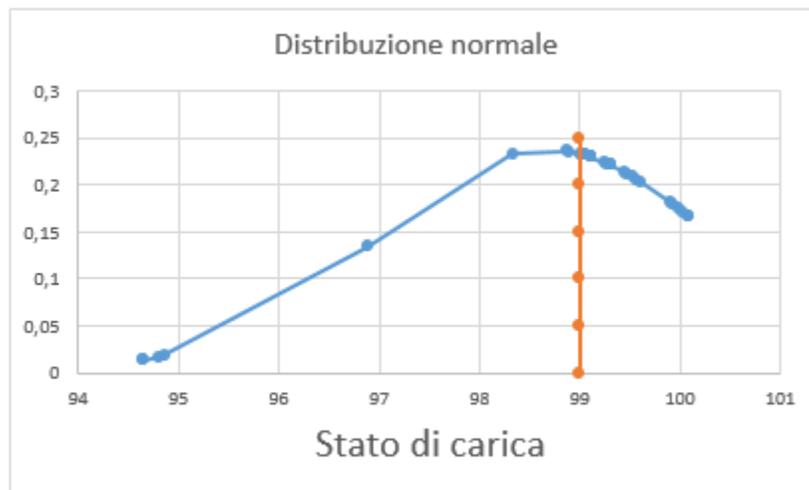
**Tabella 13: T-test per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=0\%$**

L'ipotesi nulla è da rifiutare.



**Diagramma 10: Boxplot per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=0\%$**

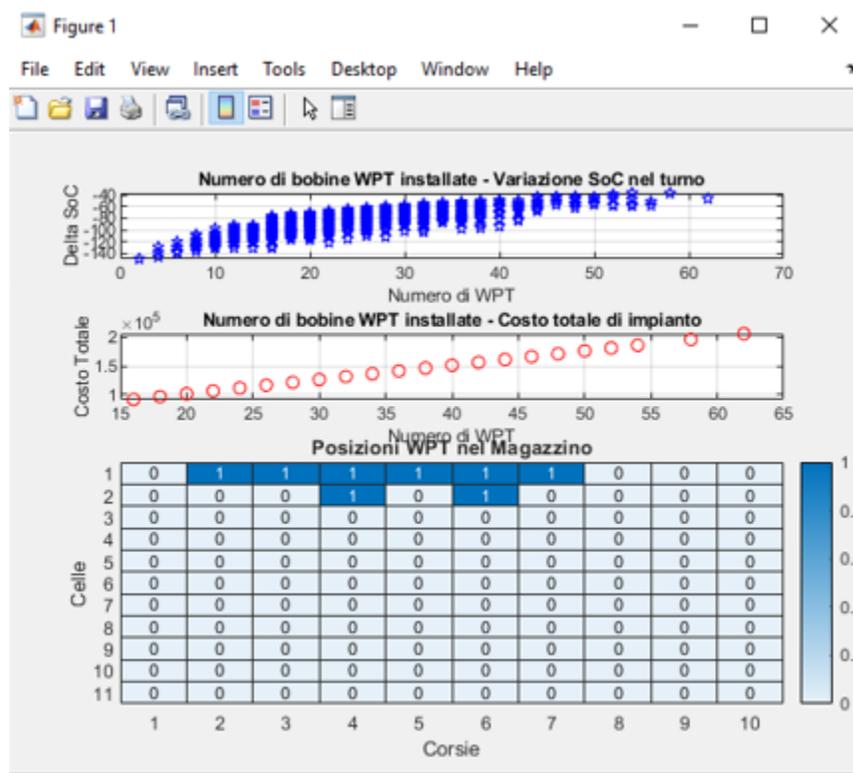
I valori sono tutti addensati in prossimità di una media dello stato di carica del 98.7%. Con soli due valori anomali anche in questo caso trascurabili. All'interno della popolazione sono inevitabili dati che si trovano sotto la soglia ipotizzata del 99% di carica.



**Diagramma 11: Distribuzione normale per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=0\%$**

I dati al di sotto della soglia del 99% di carica sono lo 0.26% dei dati totali.

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=90\%$  per la simulazione di 24h:**



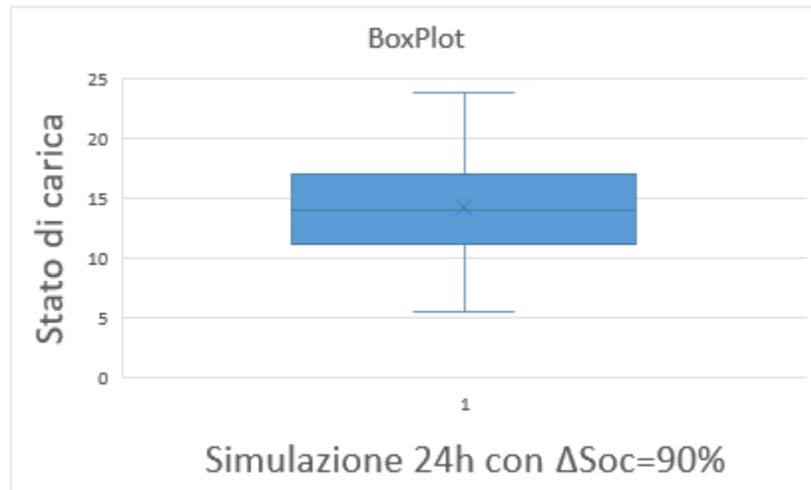
**Figura 64: Matrice delle postazioni delle bobine per 24h con  $\Delta Soc=90\%$**

Per realizzare la seguente configurazione sono state inserite 16 bobine di ricarica. Il t-test prevede un valore di ipotesi nulla pari a  $\mu=10$  e un'ipotesi alternativa  $\mu \neq 10$ .

	Variabile 1	Variabile 2
Media	14,18688199	10
Varianza	17,58526619	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	5,468609021	
P(T<=t) una coda	3,45103E-06	
t critico una coda	1,699127027	

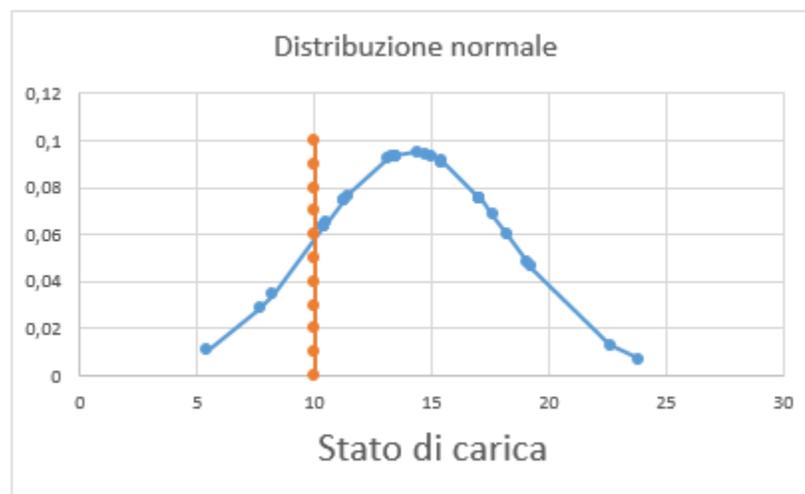
**Tabella 14: T-test per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=90\%$**

Anche in questo caso l'ipotesi nulla è da rifiutare ma perché la media della popolazione è maggiore di quella attesa, un aspetto sicuramente favorevole. I risultati sono visibili in un boxplot:



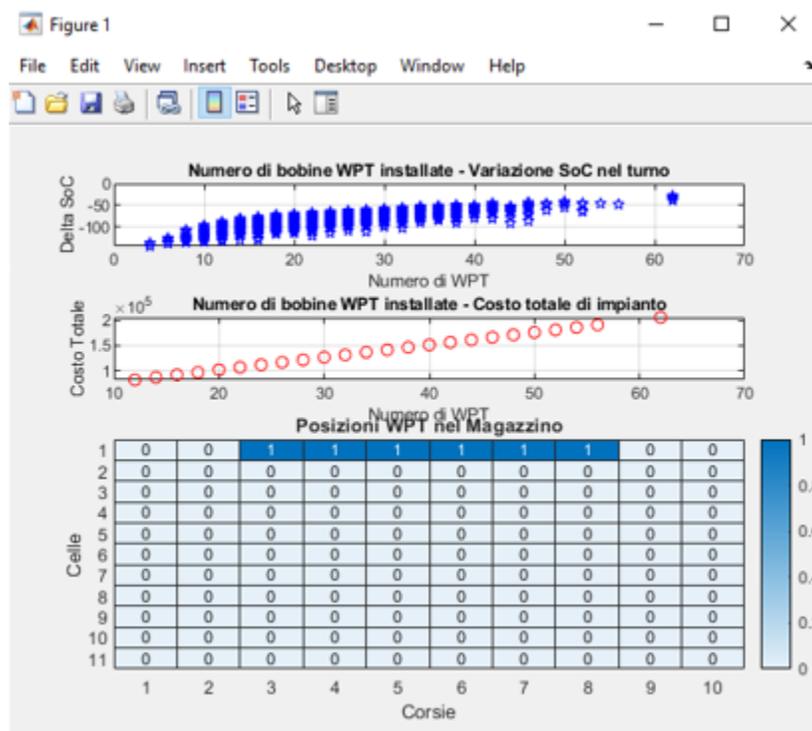
**Diagramma 12: Boxplot per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=90\%$**

In cui si può notare come i dati sotto la soglia del livello di carica del 10% sono solo lo 0.1%, risultati che si potrebbero eliminare semplicemente aggiungendo un'ulteriore bobina a quelle previste:



**Diagramma 13: Distribuzione normale per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=90\%$**

**Matrice delle posizioni delle bobine con un  $\Delta Soc=95\%$  per la simulazione di 24h:**

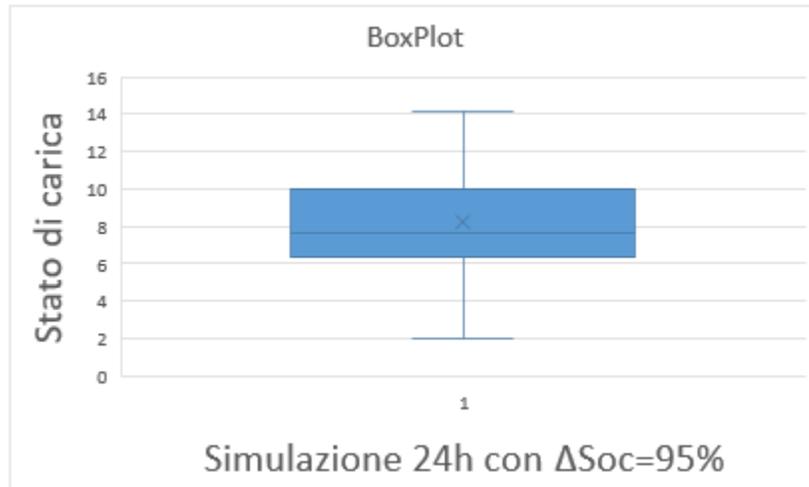


**Figura 65: Matrice delle postazioni delle bobine per 24h con  $\Delta Soc=95\%$**

Per realizzare la seguente configurazione sono state inserite 12 bobine di ricarica. Il t-test prevede un'ipotesi nulla di  $\mu=5$  e un'ipotesi alternativa di  $\mu \neq 5$ . Anche in questo caso è da rifiutare l'ipotesi nulla, ottenendo però un valore calcolato maggiore di quello atteso.

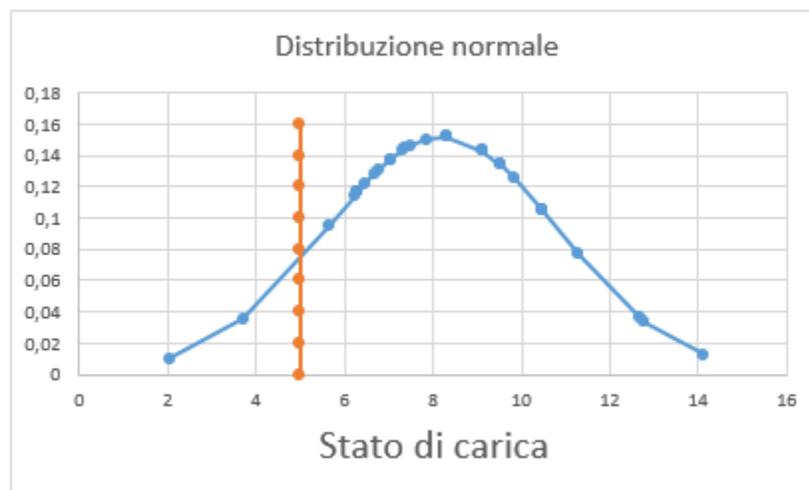
	Variabile 1	Variabile 2
Media	8,215167588	5
Varianza	6,919098616	0
Osservazioni	30	30
gdl	29	
Stat t	6,694828901	
P(T<=t) una coda	1,20737E-07	
t critico una coda	1,699127027	

**Tabella 15: T-test per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=95\%$**



**Diagramma 14: Boxplot per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=95\%$**

La media della popolazione è di uno stato di carica di circa l'8%, maggiore a quello richiesto, con inevitabilmente dei dati che si presentano inferiori alla soglia del 5% impostata. Anche in questo caso però i dati che sarebbero da scartare sono una percentuale molto bassa ovvero dello 0.06%.



**Diagramma 15: Distribuzione normale per la simulazione di 24h con  $\Delta Soc=95\%$**

## CONCLUSIONI

L'obiettivo del progetto di tesi è stato la realizzazione di un modello simulativo tramite il programma Anylogic, per valutare l'ottimale posizionamento delle bobine trasmettenti per la ricarica dinamica dei carrelli elevatori all'interno di un magazzino industriale. Il software ha permesso di realizzare graficamente un reparto produttivo aziendale utilizzando la libreria grafica del programma, consentendo di animare tutti gli agenti creati tramite l'utilizzo di un linguaggio grafico a blocchi. Una volta validato il modello è stato utilizzato per l'installazione di una tecnologia di avanguardia come il Wireless Power Transfer per l'alimentazione del pacco batterie del veicolo elettrico industriale. Il primo obiettivo è stato valutare le zone del magazzino maggiormente trafficate dal carrello, in modo da avere una prima idea su dove posizionare le bobine trasmettenti. Per capire però dove e quante bobine inserire è stato necessario impostare il livello di carica che si vuole raggiungere a fine simulazione. Se il modello simulativo è l'esecuzione di un precedente modello analitico, allora inevitabile è stato un confronto dei risultati trovati dai due modelli. Con il modello simulativo sono state simulate tre realtà industriali ovvero uno, due e tre turni lavorativi, quindi la simulazione è stata lanciata per un tempo di 8h, 16h e 24h. Di ogni scenario è stato confrontato il livello finale di carica della batteria impostato dal modello analitico con quello ottenuto dalla simulazione ottenendo per ogni simulazione risultati concordanti tra i due modelli. Un progetto così complicato nella realizzazione come quello di decidere dove installare delle bobine trasmettenti sotto la pavimentazione di un reparto aziendale, è sicuramente pane per i denti per un modello simulativo. Questo infatti ci consente di riprodurre complicate realtà aziendali e di trovare l'ottimo di molte situazioni quando queste sono impossibili da realizzare se non con previa analisi di ogni possibile scenario. È questa la potenza di un software simulativo come Anylogic. Consente di sviluppare un efficiente metodo di analisi che può essere facilmente validato e compreso, fornendo, in molti settori, soluzioni preziose e informazioni chiare su sistemi complessi.

## BIBLIOGRAFIA e SITOLOGIA

- [1] «FIA\_E-mobility.pdf». [http://www.aci.it/fileadmin/immagini/Notizie/Mobilita/FIA\\_E-mobility.pdf](http://www.aci.it/fileadmin/immagini/Notizie/Mobilita/FIA_E-mobility.pdf).
- [2] «Carrello Elevatore e Muletto Elettrico per Copicar srl». <https://copicar.it/carrello-elevatore/>
- [3] «QI\_15\_CarrelloElevatore.pdf». [https://www.uniroma1.it/sites/default/files/QI\\_15\\_CarrelloElevatore.pdf](https://www.uniroma1.it/sites/default/files/QI_15_CarrelloElevatore.pdf).
- [4] «Carrello elevatore Diesel o Elettrico: differenze e migliori soluzioni». <https://www.mgacarrellielevatori.com/carrello-elevatore-diesel-elettrico/>
- [5] «I requisiti minimi di sicurezza dei carrelli elevatori» <https://www.puntosicuro.it/sicurezza-sul-lavoro-C-1/tipologie-di-rischio-C-5/attrezzature-macchine-C-45/i-requisiti-minimi-di-sicurezza-dei-carrelli-elevatori-trasportatori-AR-13185/>
- [6] «Batterie ioni di litio: cosa sono, vantaggi e soluzioni migliori - IoT Edge». <https://www.iotedge.it/ups/batterie-ioni-di-litio/>
- [7] «Caratteristiche tecniche di una batteria | Ralph DTE». <https://www.ralphdte.eu/2012/09/15/caratteristiche-tecniche-di-una-batteria/>
- [8] G. Buja e M. Bertoluzzo, «Studio e progetto preliminare per un sistema di ricarica dinamica wireless» [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/mobilita-elettrica/rds\\_par2015-209.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/mobilita-elettrica/rds_par2015-209.pdf)
- [9] Hui, S.Y.R. (2016), "Past, present and future trends of non-radiative wireless power transfer", CPSS transactions on Power Electronics and Applications, Vol.1 No. 1, pp. 83-91.
- [10] «Home - Enermove srl». <http://www.enermovesrl.it/>
- [11] «Enermove, l'innovazione nei sistemi di ricarica e alimentazione wireless per veicoli elettrici industriali - TCE Magazine». <https://blog.tuttocarrellielevatori.it/25615/enermove-innovazione-ricarica-alimentazione-wireless-per-veicoli-elettrici-industriali/>
- [12] F. Cavallo, P. Guglielmi, e V. Cirimele, «Dynamic Wireless Charging» [https://www.affidabilita.eu/RepositoryImmaginiEventi/AetCms/file/2020\\_Furio\\_Enermove\\_Energy\\_SparkUp%20-%20Extended%20version.pdf](https://www.affidabilita.eu/RepositoryImmaginiEventi/AetCms/file/2020_Furio_Enermove_Energy_SparkUp%20-%20Extended%20version.pdf)
- [13] «AnyLogic: strumenti e soluzioni software di modellazione di simulazione per le aziende». <https://www.anylogic.com/>

- [14] «Big Book of Simulation Modeling – AnyLogic Simulation Software». <https://www.anylogic.com/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/>
- [15] A. M. Law, *Simulation modeling and analysis*, Fifth edition. Dubuque: McGraw-Hill Education, 2013.