POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Sviluppo di un modello Battery Swap per veicoli commerciali elettrici circolanti sulla rete autostradale italiana

RELATORI CANDIDATO

Prof.ssa Giulia Bruno

Ramona Nardone

Prof. Franco Lombardi

Ing. Alberto Faveto

Ing. Emiliano Traini

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la Professoressa Giulia Bruno e l'Ing. Faveto Alberto per avermi aiutato nella realizzazione di questo lavoro di tesi.

Ringrazio mia madre e mio padre, per avermi sempre sostenuto psicologicamente ed economicamente.

Ringrazio mio fratello Marco, per tutti gli insegnamenti, di programmazione e di vita.

Ringrazio il mio fidanzato Mariano, per l'amore ed il coraggio.

Ringrazio i miei amici Alessia e Michele, perché grazie a loro questo viaggio è stato indimenticabile.

Abbiamo bisogno di tre semplici cose nella vita: qualcosa da fare, qualcuno da amare, qualcosa in cui sperare...

Immanuel Kant

ABSTRACT

Al fine di diminuire l'impatto che i veicoli hanno sull'ambiente, recentemente si è assistito ad un incremento della ricerca legata al passaggio dei veicoli a combustione interna ai veicoli elettrici. Tale passaggio è particolarmente urgente per i veicoli elettrici commerciali. Il progetto di tesi consiste nella progettazione di una rete di stazioni innovative per la ricarica delle batterie dei mezzi commerciali (sistema di Battery Swap). I vantaggi dei sistemi di Battery Swap consistono nel poter sostituire una batteria esaurita con una completamente carica, eliminando i tempi di attesa per i clienti, e nel ridurre i costi del veicolo dovuti alla batteria, che diventa proprietà del gestore del sistema e viene solo noleggiata dai clienti. Le stazioni di ricarica sono dotate di magazzini con un numero di batterie cariche stabilite dal fabbisogno giornaliero richiesto e che vengono scambiate con delle batterie scariche da ricambiare durante i periodi della giornata di bassa richiesta energetica.

Il progetto riguarda in particolare i percorsi dei veicoli commerciali elettrici in viaggio lungo le due dorsali principali italiane (adriatica e tirrena). Lo scenario è stato implementato usando il software AnyLogic. Utilizzando il modello è stato possibile analizzare i risultati delle performance ottenute variando i parametri di input (ad es. il numero di batterie nelle stazioni e la frequenza dei veicoli) in termini di tempi di attesa in coda per l'accesso alla stazione e picchi di consumi energetici richiesti dalle stazioni.

INDICE

INDICE	V
INDICE DELLE FIGURE	VI
INDICE DELLE TABELLE	VII
CAPITOLO 1: CONTESTO DI SVILUPPO DEI VEICOLI ELETTRICI	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Scenario ambientale: Emissioni inquinanti e Gas Serra	
1.3 NORMATIVE E CICLI OMOLOGATIVI PER VEICOLI LEGGERI (LD)	7
1.4 Normative e cicli omologativi per veicoli pesanti (HD)	9
CAPITOLO 2: IL MONDO DEI VEICOLI ELETTRICI	13
2.1 CENNI SULLA STORIA DELLA MACCHINA ELETTRICA	
2.2 VEICOLI TRADIZIONALI E VEICOLI IBRIDI	
2.3 VEICOLO ELETTRICO	
2.4 Ricarica della batteria	
2.4 Diffusione Battery Swap System nel mondo	
2.5 ANALISI DEL BATTERY SWAP SYSTEM	
2.5.1 Vantaggi del Battery Swap System	
2.5.2 Svantaggi del Battery Swap System	
2.6 MERCATO DEL BATTERY SWAP SYSTEM	
CAPITOLO 3: I MODELLI SIMULATIVI	
3.1 PERCHÉ UTILIZZIAMO I MODELLI?	
3.2 System Dynamics	
3.3 DISCRETE EVENT	
3.4 AGENT BASED	
3.5 AnyLogic - Cenni storici	
3.6 IL LINGUAGGIO DI PROGRAMMAZIONE DI ANYLOGIC: OPP E JAVA	
CAPITOLO 4: LA CREAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE	
4.1 Analisi del modello	
4.1 ANALISI DEL MODELLO	
4.2 Scelte progettuali per la realizzazione delle stazioni e la decisione delle città di partenza 4.3 Modellazione dell'e-Truck con carico da 8t	
4.4 MODELLAZIONE DELLA BATTERIA PER L'E-TRUCK DA 81	
4.5 MODELLAZIONE DELLA DATTERIA FER LE-TRUCK DA OT	
4.6 MODELLAZIONE DELLE BATTERY SWAP STATION	
CAPITOLO 5: SIMULAZIONI EFFETTUATE	71
5.1 Assunzioni di simulazione	71
5.2 Simulazioni e-Truck 8t	
5.3 Simulazioni e-truck 26t	
CAPITOLO 6: POSSIBILI SVILUPPI FUTURI E CONCLUSIONI	7 9
5.1 Organizzazione della Battery Swap Station	79
5.2 Conclusioni	
DIDI IOCDATIA E CITOLOCIA	09

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: STEPS E SDS SU DOMANDA DI PETROLIO 2030/2040	3
Figura 2: Processo radiazione solare	4
FIGURA 3: CORRELAZIONE TRA EMISSIONI INQUINANTI E SETTORI PRODUTTIVI	5
FIGURA 4: DIMINUZIONE DELLE EMISSIONI ATTESE SECONDO GLI SCENARI STEPS E SDS	6
FIGURA 5: CICLO OMOLOGATIVO WLTP	8
FIGURA 6: LIMITI EMISSIVI NORMATIVE HD	10
FIGURA 7: MODI DEL CICLO OMOLOGATIVO WHSC	
FIGURA 8: LIMITI EMISSIVI SUL CICLO OMOLOGATIVO WHTC	11
FIGURA 9: ANDAMENTO CONSUMO DI COMBUSTIBILE PER VEICOLI HD	
Figura 10: Calcolo baseline	
FIGURA 11: STRUTTURA DI UN VEICOLO TRADIZIONALE, VEICOLO IBRIDO E VEICOLO ELETTRICO	
Figura 12: Architettura veicolo ibrido in serie	
Figura 13: Architettura veicolo ibrido in parallelo	
FIGURA 14: ARCHITETTURE VEICOLO IBRIDO PARALLELO	
FIGURA 15: ARCHITETTURA VEICOLO ELETTRICO	
FIGURA 16: STRUTTURA DEL MOTORE ELETTRICO	
Figura 17: Ricarica conduttiva cablata	
Figura 18: Ricarica per induzione	
FIGURA 19: RICARICA TRAMITE BATTERY SWAP SYSTEM	
Figura 20: Ricarica automatica conduttiva al lato	
FIGURA 21: RICARICA AUTOMATICA CONDUTTIVA DAL BASSO	
Figura 22: Nio Battery Swap Station	25
Figura 23: Ape E-City	
Figura 24: Punti di vista per l'analisi del Battery Swap System	
Figura 25: e-Truck MAN	
Figura 26: e-Force ONE AG	
Figura 27: Potenzialità del modello di simulazione	
FIGURA 28: MODELLAZIONE IN SYSTEM DYNAMICS	
Figura 29: Modellazione in Discret Event	
FIGURA 30: MODELLAZIONE IN AGENT BASED	
FIGURA 31: LOGO ANYLOGIC	
Figura 32: Gli elementi della OOP	
Figura 33: Gli Agenti creati	
FIGURA 34: AMBIENTE DI SIMULAZIONE	
FIGURA 35: DATABASE	
Figura 36:	
FIGURA 37: CODICE SORGENTE CHE PERMETTE AL VEICOLO DI FERMARSI E ALLA BATTERIA DI INTERROMPERE IL PRO	
DI SCARICA	
FIGURA 38: EVENTO CHE PERMETTE AGLI E-TRUCK DI PARTIRE AD ORARI DIFFERENTI	
FIGURA 39: STATECHART RAPPRESENTATIVO DELLA MOVIMENTAZIONE DELL'E-TRUCK	
FIGURA 40: CODICE SORGENTE ALL'AVVIO DEL PROGRAMMA CHE ASSOCIA AD OGNI E-TRUCK UNA BATTERIA	
FIGURA 41: CODICE SORGENTE NELLA TRANSIZIONE DESTINATION_CITY CHE PERMETTE AD OGNI E-TRUCK DI SCEGLI	
UNA DESTINAZIONE E INIZIARE IL VIAGGIO VERSO LA STESSA	
FIGURA 42: CODICE SORGENTE ALL'INTERNO DELLA TRANSIZIONE BATTERY_DISCHARGE CHE PERMETTE AD OGNI E-T	
SCARICO DI RAGGIUNGERE LA BATTERY SWAP STATION PIÙ VICINA	
FIGURA 43: CODICE SORGENTE CHE PERMETTE AD OGNI BATTERY SWAP STATION DI PRENDERE IN CARICO L'E-TRUC	
ARRIVA PER UNO SCAMBIO	58
FIGURA 44: CODICE SORGENTE ALL'INTERNO DELLA TRANSIZIONE RESTART_TOCITY CHE PERMETTE AL VEICOLO DI	_
RIPRENDERE LA MARCIA DOPO LO SCAMBIO	
FIGURA 45: CODICE SORGENTE ALL'INTERNO DELLA TRANSIZIONE RESTART_FROMCITY CHE PERMETTE AL VEICOLO I	
RIPARTIRE DOPO IL TEMPO DI SCARICO E RICARICO MERCI	
FIGURA 46: CODICE SORGENTE ALL'AVVIO DEL PROGRAMMA CHE ASSOCIA LE BATTERIE E STAZIONI	
Figura 47: Inserimento delle batterie da Database nelle stazioni	60

FIGURA 48: STATECHART RAPPRESENTATIVO DELLE BATTERIE	62
FIGURA 49: CODICE SORGENTE NELLA TRANSIZIONE NIGHTCHARGE CHE PERMETTE LA RICARICA NOTTURNA	63
FIGURA 50: FLUSSI DI CARICA E SCARICA DELLA BATTERIA	64
FIGURA 51: EQUAZIONE RAPPRESENTATIVA DELLA SCARICA DELLA BATTERIA	65
FIGURA 52: EQUAZIONE RAPPRESENTATIVA DEL PROCESSO DI CARICA DELLA BATTERIA	65
FIGURA 53: STATECHART RAPPRESENTATIVO DELLA MOVIMENTAZIONE DELL'E-TRUCK 26T	67
FIGURA 54: STATECHART RAPPRESENTATIVO DELLE BATTERIE PER E-TRUCK 26T	67
FIGURA 55: FLOWCHART RAPPRESENTATIVO DEL PROCESSO DI SCAMBIO NELLA BATTERY SWAP STATION	
FIGURA 56: CODICE SORGENTE ALL'INTERNO DEL BLOCCO DELAY_8T CHE PERMETTE LO SCAMBIO DELLA BATTERIA S	
Truck 8t	69
FIGURA 57: SCHEMA DELLA BATTERY SWAP STATION	79
FIGURA 58: MAGAZZINO VERTICALE ROTANTE	80
FIGURA 59: FLOWCHART RAPPRESENTATIVI DI E-TRUCK E BATTERIE NELLA MODELLAZIONE DELLA BATTERY SWAP	
STATION	81
INDICE DELLE TABELLE	
INDICE DELLE TABELLE TABELLA 1: LE CITTÀ	48
TABELLA 1: LE CITTÀ	49
TABELLA 1: LE CITTÀ	49 73
TABELLA 1: LE CITTÀ TABELLA 2: LE STAZIONI TABELLA 3: DATI DI TRAFFICO REALI DEGLI E-TRUCK 8T	49 73 73
TABELLA 1: LE CITTÀ TABELLA 2: LE STAZIONI TABELLA 3: DATI DI TRAFFICO REALI DEGLI E-TRUCK 8T TABELLA 4: DATI DI TRAFFICO ADATTATI PER IL MODELLO DI SIMULAZIONE	49 73 73
TABELLA 1: LE CITTÀ TABELLA 2: LE STAZIONI TABELLA 3: DATI DI TRAFFICO REALI DEGLI E-TRUCK 8T TABELLA 4: DATI DI TRAFFICO ADATTATI PER IL MODELLO DI SIMULAZIONE TABELLA 5: PRIMA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T	49 73 73 74
TABELLA 1: LE CITTÀ TABELLA 2: LE STAZIONI TABELLA 3: DATI DI TRAFFICO REALI DEGLI E-TRUCK 8T TABELLA 4: DATI DI TRAFFICO ADATTATI PER IL MODELLO DI SIMULAZIONE TABELLA 5: PRIMA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T TABELLA 6: SECONDA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T TABELLA 7: TERZA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T TABELLA 8: QUARTA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T	49 73 74 75 75
TABELLA 1: LE CITTÀ TABELLA 2: LE STAZIONI TABELLA 3: DATI DI TRAFFICO REALI DEGLI E-TRUCK 8T TABELLA 4: DATI DI TRAFFICO ADATTATI PER IL MODELLO DI SIMULAZIONE TABELLA 5: PRIMA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T TABELLA 6: SECONDA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T TABELLA 7: TERZA SIMULAZIONE E-TRUCK 8T	49 73 74 75 75
TABELLA 1: LE CITTÀ	49 73 74 74 75 76 76
TABELLA 1: LE CITTÀ	49 73 74 74 75 76 77

CAPITOLO 1: CONTESTO DI SVILUPPO DEI VEICOLI ELETTRICI

1.1 Introduzione

Questo lavoro di tesi ha come obiettivo la realizzazione di un modello di simulazione che sia rappresentativo di una mobilità elettrica futura. Nel nostro caso sono stati osservati solo i veicoli commerciali elettrici avente un carico di 26t e 8t. Tramite il software di modellazione AnyLogic, sono state utilizzate le mappe di OpenStreetMap per rappresentare il percorso dei veicoli che attraversano l'Italia da Nord a Sud. Sono state ricreate le condizioni di traffico, analizzando i dati di traffico dell'Anas del 2019, ultimo anno rappresentativo dei normali ritmi di vita. Sono state progettate delle stazioni all'interno delle quali l'e-Truck può effettuare uno scambio batteria: scarica la batteria esausta per montarne una carica. Per fare ciò dovrà aspettare un lasso di tempo dato dalla somma di un tempo variabile, ovvero la coda che dipenderà dal numero di veicoli già presenti in attesa e quindi dal traffico, e un tempo fisso ovvero il tempo per lo scambio, pari a sette minuti. Successivamente sono state fatte delle simulazioni per osservare il tempo che impiegherebbe un veicolo per andare da una città all'altra, a seconda del traffico e del numero di volte che si ferma per effettuare un Battery Swap.

L'attuale sistema di trasporto ha un impatto negativo sull'ambiente e sulla salute umana in quanto è incentrato su un elevato consumo di petrolio; le automobili alimentate con gasolio e benzina hanno generato nel tempo un'elevata concentrazione di emissioni inquinanti e gas serra. A tal proposito è nata la necessità di introdurre delle regolamentazioni, ovvero le normative, che stabiliscono i livelli accettabili di emissioni inquinanti a seconda del veicolo e del paese dal quale vengono emesse. Per permettere il rispetto delle normative e l'abbassamento delle concentrazioni di inquinanti nell'aria, si pone l'attenzione verso una mobilità sostenibile con particolare interesse ai veicoli elettrici e ibridi.

1.2 Scenario ambientale: Emissioni inquinanti e Gas Serra

Nei prossimi 5 anni, la mobilità e il trasporto su strada saranno tenuti a ridurre del 30% il consumo di carburante conseguentemente a regolamentazioni stringenti sui limiti emissivi. È previsto che nel 2040/2050 gli obiettivi di efficienza saranno raggiunti grazie ad un mix di soluzioni tecnologiche (misure di efficienza migliorate, elettrificazione, biocarburanti). Nello specifico si prevede:

- Oltre l'80% delle vendite avrà a bordo un ICE (motore a combustione interna)
 capace di funzionare con combustibili alternativi/biocombustibili e saranno integrati
 con un'architettura ibrida/elettrica del propulsore;
- Il settore dei trasporti è destinato ad espandere la domanda di gas naturale a ritmo più veloce;
- Crescita della flotta automobilistica dell'80% rispetto al 2018;
- I biocarburanti rappresenteranno l'8% del consumo di energia su strada;
- Ci saranno 300 milioni di auto elettriche in circolazione, 740 milioni di biciclette elettriche, 30 milioni di camion leggeri e pesanti, 4 milioni di autobus elettrici;
- Gli HEV (Hybrid Electric Vehicle) rappresenteranno una soluzione a medio e lungo termine.

Previsioni future in termini di emissioni inquinati, concentrazione di gas serra, utilizzo di petrolio vengono effettuate tramite lo *scenario* che si basa su ipotesi legate ad intenzioni e politiche che verranno messe in atto. Sono utilizzati due scenari differenti:

- STEPS (Stated Policies Scenario);
- SDS (Sustainable Development).

Il primo scenario riflette meglio l'impatto di tutte le politiche legate all'energia che i vari governi del mondo hanno implementato e gli effetti probabili espressi in modo ufficiale nei documenti che si traducono in obiettivi e piani ufficializzati. Il secondo scenario è uno scenario vero e proprio, si suppone che venga raggiunto tutto ciò che si è prefissato. Nel 2040 si raggiungeranno, probabilmente, valori intermedi tra i due scenari. Nell'immagine seguente si osserva la domanda di petrolio attesa nel 2030 e nel 2040 secondo i due scenari.

			Stated Policies		Sustai Develo		Current Policies	
	2000	2018	2030	2040	2030	2040	2030	2040
Road transport	30.1	42.2	45.5	44.5	36.7	22.8	48.9	53.4
Aviation and shipping	8.3	12.0	14.5	16.8	11.2	9.4	15.7	19.2
Industry and petrochemicals	14.4	18.3	21.5	22.9	18.9	18.5	21.5	23.0
Buildings and power	14.3	12.3	10.5	9.2	8.4	5.8	11.5	11.1
Other sectors	10.2	12.0	13.3	13.1	12.0	10.4	13.8	14.2
World oil demand	77.4	96.9	105.4	106.4	87.1	66.9	111.5	121.0
Asia Pacific share	25%	33%	36%	37%	37%	38%	36%	37%
World biofuels	0.2	1.9	3.5	4.7	6.3	7.7	2.8	3.6
World liquids demand	77.6	98.8	108.9	111.1	93.4	74.6	114.3	124.6
Conventional crude oil	64.5	67.1	65.1	61.9	52.7	36.9	68.5	70.6
Existing fields	64.5	67.1	39.6	25.9	39.6	25.9	39.6	25.9
New fields	-	-	25.5	36.0	13.1	11.0	28.9	44.7
Tight oil		6.3	12.0	13.4	10.1	9.2	13.1	15.5
Natural gas liquids	9.0	17.3	20.4	21.7	17.7	14.8	21.2	23.1
Extra-heavy oil and bitumen	1.0	3.8	4.0	4.9	3.3	2.9	4.3	6.3
Other production	0.6	0.8	1.3	1.6	1.2	1.2	1.5	2.2
World oil production	75.1	95.4	102.8	103.5	85.0	65.1	108.7	117.7
OPEC share	41%	39%	37%	39%	37%	37%	37%	39%
World processing gains	1.8	2.3	2.6	2.9	2.2	1.8	2.8	3.3
World oil supply	76.9	97.7	105.4	106.4	87.1	66.9	111.5	121.0
EA crude oil price (\$2018/barrel)	40	68	88	103	62	59	111	134

Notes: Other production includes coal-to-liquids, gas-to-liquids, additives and kerogen oil. Historical supply and demand volumes differ due to changes in stocks. See Annex C for definitions.

Figura 1: STEPS e SDS su domanda di petrolio 2030/2040

Il petrolio svolge un ruolo importante nella società moderna e le variazioni di prezzo di quest'ultimo influenzano ogni aspetto di sviluppo del paese soprattutto per il settore dei trasporti pubblici e le industrie, che ricadono poi sui costi di produzione e qualità della vita. Il settore dei trasporti sta sviluppando nuove tecnologie per cercare di diminuirne l'utilizzo o completamente sostituirlo ad altre risorse energetiche.

L'aumento di utilizzo di petrolio negli anni ha portato ad un aumento di emissioni di gas serra. Sebbene presenti in minime quantità nell'atmosfera, i gas serra prodotti dall'uomo sono ritenuti principali responsabili del surriscaldamento globale tanto da regolamentarne l'emissione. Anche se l'effetto serra viene considerato un fenomeno naturale, l'emissione incontrollata di questi gas nell'atmosfera da parte di industrie, mezzi di trasporto e combustibili fossili, determina un aumento delle temperature globali. Tra i gas serra nocivi, l'anidride carbonica (CO₂) è il gas che più incide sul surriscaldamento globale.

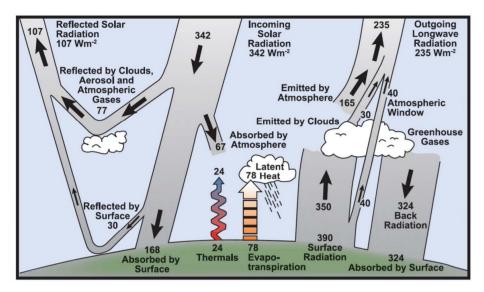


Figura 2: Processo radiazione solare

La radiazione solare arriva sulla terra: parte viene riflessa dalle nuvole, parte viene assorbita dall'atmosfera e parte viene riflessa dalla superficie terrestre (neve, ghiacciai). In media, se il sole emette 342 Wm², 168 Wm² vengono assorbiti dalla superficie terrestre. La terra assorbe la radiazione portandosi ad una certa temperatura. Un sistema ad una certa temperatura irradia. La presenza nell'atmosfera dei gas serra (anidride carbonica, monossido di azoto, metano e acqua) ha causato un aumento della temperatura del globo terrestre perché permettono alla radiazione emessa di tornare indietro, sono quindi responsabili della "back radiation".

Il petrolio non è responsabile solamente della produzione di gas serra ma anche prodotti inquinanti solidi, liquidi e gas che rimangono in sospensione nell'aria generando un impatto negativo sull'ambiente e chi lo abita. Gli inquinanti si possono dividere in primari e secondari, a seconda se sono direttamente il risultato di un processo chimico oppure se sono prodotti di reazione tra inquinanti primari e luce solare. Gli inquinanti primari prodotti in un motore a combustione interna sono:

- CO (monossido di carbonio), gas prodotto da reazioni di combustione in difetto di aria;
- HC (idrocarburi incombusti), idrocarburi che non prendono parte alla combustione a causa di meccanismi di occultamento in camera ed espulsi allo scarico;

- NO_X (ossidi di azoto), gas prodotto dalla combustione di azoto e ossigeno ad elevate temperature;
- PM (particolato), sostanze solide e liquide generate durante il processo di combustione;
- Derivati di additivi presenti nel combustibile;
- Derivati da olio lubrificante.

Tra gli inquinanti secondari, un'attenzione particolare viene posta alle reazioni che avvengono tra gli ossidi di azoto e gli idrocarburi in presenza di luce solare. La catena di reazioni porta all'ossidazione del monossido di azoto (NO) in diossido di azoto (NO₂), produzione di ozono (O₃) e all'ossidazione degli idrocarburi. L'insieme di questi prodotti genera una delle forme di inquinamento più dannose per l'ecosistema: lo smog fotochimico. Il nome deriva dal condizionamento della radiazione luminosa alla sua formazione.

Nell'immagine seguente si osserva la correlazione tra inquinanti prodotti e settori d'interesse. il settore dei trasporti è il principale responsabile della produzione di CO_2 e NO_X .

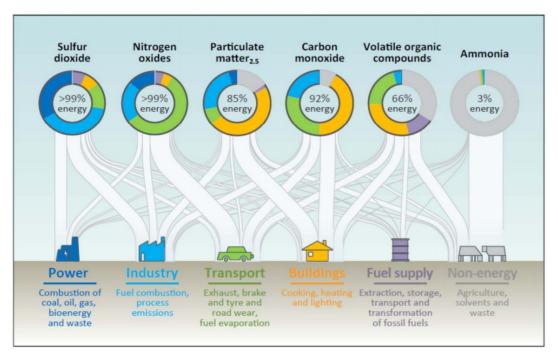


Figura 3: Correlazione tra emissioni inquinanti e settori produttivi

Lo STEPS e l'SDS ci permettono di osservare anche per gli inquinanti primari la diminuzione attesa per il decennio 2030-2040.

Se i gas serra sono responsabili di un aumento della temperatura terrestre, le emissioni inquinati sono responsabili di un peggioramento della qualità dell'aria e dell'aumento di malattie alle vie respiratorie incentivato dalla capacità da parte di particelle inquinanti di veicolare virus.

		Stated	Policies Sce	nario				
		Ву	Share	CAAGR (%				
	2018	2025	2030	2035	2040	2018	2040	2018-40
SO ₂ emissions from al	l energy activities (N	1t)			7-			
Total	62.7	51.7	47.7	47.6	48.3	100	100	-1.2
Power	21.7	16.5	12.6	12.5	13.0	35	27	-2.3
Industry*	28.2	26.0	26.3	26.9	27.4	45	57	-0.1
Transport	6.6	3.9	4.1	4.3	4.4	10	9	-1.8
Buildings	5.1	4.0	3.4	2.8	2.5	8	5	-3.2
Agriculture	1.1	1.3	1.3	1.1	1.1	2	2	-0.3
NO _x emissions from a	Il energy activities (N	/t)				.,		-
Total	105.2	97.0	92.7	91.4	91.9	100	100	-0.6
Power	15.9	13.2	12.5	12.0	11.9	15	13	-1.3
Industry*	25.1	24.7	24.7	25.8	26.8	24	29	0.3
Transport	56.5	51.8	48.2	46.6	46.3	54	50	-0.9
Buildings	4.7	4.7	4.6	4.5	4.5	4	5	-0.3
Agriculture	3.0	2.7	2.6	2.5	2.4	3	3	-0.9
PM _{2.5} emissions from	all energy activities	(Mt)						
Total	29.6	28.3	27.4	27.4	27.3	100	100	-0.4
Power	1.9	1.5	1.3	1.3	1.3	6	5	-1.9
Industry*	7.9	8.3	8.6	9.3	9.9	27	36	1.0
Transport	3.5	2.8	2.6	2.6	2.7	12	10	-1.2
Buildings	15.5	14.9	14.1	13.3	12.5	52	46	-1.0
Agriculture	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	2	3	0.8

* Industry	also	includes	other	transformatio	on.
------------	------	----------	-------	---------------	-----

		Current Policies Scenario					Sustainable Development Scenario					
	Ву	energy sec	tor	Shares (%) CAAGR (%)		By energy sector			Shares (%)	CAAGR (%)		
	2025	2030	2040	2040	2018-40	2025	2030	2040	2040	2018-4		
SO ₂ emissions from a	Ill energy activities	(Mt)										
Total	52.5	49.6	52.6	100	-0.8	39.2	28.7	16.8	100	-5.8		
Power	16.8	13.7	15.5	29	-1.5	10.0	4.9	2.3	13	-9.8		
Industry*	25.7	26.1	27.4	52	-0.1	21.8	18.2	11.5	69	-4.0		
Transport	4.3	4.6	5.4	10	-0.9	3.2	2.9	2.0	12	-5.2		
Buildings	4.4	3.9	3.2	6	-2.2	3.2	2.0	0.8	5	-8.3		
Agriculture	1.3	1.3	1.2	2	0.2	1.0	0.7	0.2	1	-7.0		
NO _x emissions from a	all energy activities	(Mt)										
Total	101.1	100.8	107.6	100	0.1	77.0	58.1	31.9	100	-5.3		
Power	13.5	13.3	13.8	13	-0.7	9.8	6.7	3.6	11	-6.5		
Industry*	24.8	25.1	27.6	26	0.4	19.6	15.3	8.2	26	-5.0		
Transport	55.3	54.9	58.7	55	0.2	41.9	32.0	18.0	57	-5.1		
Buildings	4.7	4.8	4.8	4	0.1	3.6	2.6	1.6	5	-4.8		
Agriculture	2.8	2.7	2.7	2	-0.4	2.1	1.5	0.5	2	-7.5		
PM _{2.5} emissions from	all energy activities	es (Mt)										
Total	28.0	27.6	28.2	100	-0.2	18.5	11.0	4.5	100	-8.2		
Power	1.5	1.3	1.4	5	-1.3	1.0	0.6	0.2	4	-10.2		
Industry*	8.0	8.4	9.8	35	1.0	6.5	5.0	2.0	46	-5.9		
Transport	3.2	3.3	3.8	13	0.3	2.4	1.8	1.1	25	-5.2		
Buildings	14.5	13.8	12.3	44	-1.1	8.0	3.1	0.9	20	-12.1		
Agriculture	0.8	0.8	0.9	3	0.8	0.6	0.5	0.2	5	-5.5		

Figura 4: Diminuzione delle emissioni attese secondo gli scenari STEPS e SDS

1.3 Normative e cicli omologativi per veicoli leggeri (LD)

Le normative sono regolamentazioni che stabiliscono i livelli di emissioni inquinanti e gas serra per i veicoli. Il contesto normativo dipende da paese a paese e da veicolo a veicolo in quanto lo stile di guida della vettura dipende anche dall'area geografica. Le normative che interessano il nostro paese sono le Normative Europee, che definiscono le categorie di appartenenza dei veicoli in base ad una serie di parametri relativi all'inquinamento. Sono state introdotte nel 1991 e anno dopo anno, hanno subito modifiche che le hanno rese sempre più restrittive. Queste non stabiliscono solamente i limiti emissivi, ma anche i test da effettuare per l'omologazione dei veicoli, le specie chimiche da misurare e la durata del veicolo. Per un LD, le classi normative sono:

- Euro 0, con immatricolazione precedente al 31/12/1991;
- *Euro 1*, con immatricolazione dal 1/01/1993. Le case automobilistiche sono state costrette a montare sui nuovi veicoli la marmitta catalitica e, nei motori a benzina, l'alimentazione ad iniezione;
- Euro 2, con immatricolazione dal 1/01/1997 e limiti più severi per le emissioni, soprattutto per i veicoli a gasolio;
- *Euro 3*, con immatricolazione dal 1/01/2001. Sui veicoli è stato inserito il sistema EOBD che serve a diagnosticare guasti ai dispositivi antinquinamento che vengono segnalati al guidatore tramite una spia sul cruscotto;
- Euro 4, con immatricolazione dal 1/01/2006;
- Euro 5, con omologazione dal 1/09/2009 e immatricolazione dal 1/01/2001;
- Euro 6, che a sua volta si divide in:
 - o Euro 6a, con immatricolazione al 1/01/2013;
 - o Euro 6b, con immatricolazione al 1/01/2015;
 - o Euro 6c, con omologazione per auto immatricolate fino al 31/08/2017;
 - o Euro 6d temp, con omologazione dal 1/09/2019;
 - Euro 6d standard, evoluzione della normativa precedente per le automobili immatricolate dal 1/01/2020;

L'ultima direttiva obbliga tutti i modelli immatricolati dopo il 1/09/2015 a rispettare limiti emissivi severi. Il limite emissivo viene calcolato come media sulla flotta venduta dal

costruttore. Dal 2020 il limite per la CO₂ è di 147 g/km, con previsione di diminuzione del 15% entro il 2025 e del 30% entro il 2030. I dispositivi per il post-trattamento delle emissioni, progettati per i motori a benzina e a gasolio, rendono i veicoli molto costosi. In questa normativa rientrano anche i veicoli con motori ibridi e full-electric. Per essere messi in commercio, i veicoli effettuano una serie di test per accertare la conformità alle normative. Questi test vengono eseguiti in laboratorio e si basano su specifici cicli guida, in modo tale che possano essere riproducibili e confrontabili. La procedura attualmente utilizzata è chiamata WLTP (Worldwide harmonised Light-duty vehicles Test Procedure) ed è entrata in vigore dal 1/09/2017 in sostituzione alla proceduta NEDC (New European Driving Cycle). La WLTP, attraverso nuovi cicli guida che rispecchiano maggiormente l'utilizzo quotidiano del veicolo, fornisce ai clienti dati più realistici di emissioni inquinanti, emissioni di CO₂ e consumo di carburante.

Il ciclo si divide in quattro parti che simulano la guida urbana e suburbana, extraurbana e autostradale. Al veicolo viene fatta percorrere su banco prova una distanza di 23,25 km, con una velocità media di percorrenza è 46,5 km/h, una velocità massima di 131,3 km/h per una durata complessiva di 30 minuti.

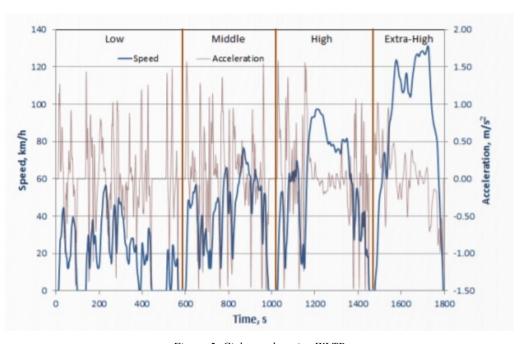


Figura 5: Ciclo omologativo WLTP

Il WLTP però non permette di tenere in considerazione dello stile di guida del guidatore che rende differente un veicolo dall'altro nel ciclo guida. Per questa ragione non è l'unico test effettuato ma viene affiancato dal test RDE (Real Driving Emissions). Il test verifica le emissioni dell'autoveicolo in condizione di guida reale i veicoli vengono equipaggiati di sistemi di misurazione portatili che forniscono un monitoraggio delle emissioni durante la guida.

L'unione dei due test sui veicoli permette di ottenere una stima molto realistica delle emissioni del veicolo per il confronto con i valori stabiliti dalla normativa in vigore.

1.4 Normative e cicli omologativi per veicoli pesanti (HD)

I veicoli commerciali analizzati in questo progetto di tesi sono considerati Heavy-Duty (HD) in quanto il loro peso supera le 3,5t. Per questi veicoli il contesto normativo inizialmente riguardava solo l'air quality ma non la CO₂.

Le classi normative per questi veicoli sono:

- Euro I, immatricolati dal 1992;
- Euro II, immatricolati dal 1996;
- Euro III, immatricolati dal 2000;
- *Euro IV*, immatricolati dal 2005. La normativa prevedeva l'introduzione della sistemistica OBD e la durability.
- Euro V, immatricolati dal 2008;
- *Euro VI*, immatricolati dal 2014. La normativa, oltre che a limiti emissivi più stringenti, ha introdotto nuovi requisiti prova come i test PEMS.

Mentre per le normative per i Light-Duty i valori massimi di emissioni sono espressi in g/km, nelle normative per gli HD i valori massimi di emissioni sono espressi di g/kWh: per quest'ultimi i test non vengono fatti sul veicolo ma sul motore dello stesso.

Con la normativa *Euro VI* sono stati introdotti due test omologativi: il test stazionario WHSC e il test transitorio WHTC.

Il WHSC è un test a 13 modi, ogni modo si diversifica per carico e velocità di percorrenza. Il passaggio da un modo all'altro dura venti secondi, durante il test il motore attraversa tutti i modi in modo tale che la misura delle emissioni li comprenda tutti.

	Date	Test	со	HC	NOx	PM	PN	Smoke
Stage	Date	lest			kWh		1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25		
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15		
Euro III	1999.10 EEV only	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02		0.15
	2000.10		2.1	0.66	5.0	0.10a		0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02		0.5
uro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10 ¹¹	

Figura 6: Limiti emissivi normative HD

Mode	Speed	Load	Weighting Factor	Mode Length†
	%	%		5
0	Motoring	-	0.24	-
1	0	0	0.17/2	210
2	55	100	0.02	50
3	55	25	0.10	250
4	55	70	0.03	75
5	35	100	0.02	50
6	25	25	0.08	200
7	45	70	0.03	75
8	45	25	0.06	150
9	55	50	0.05	125
10	75	100	0.02	50
11	35	50	0.08	200
12	35	25	0.10	250
13	0	0	0.17/2	210
Total			1	1895

Figura 7: Modi del ciclo omologativo WHSC

Il WHTC è un test transitorio della durata di 1800 secondi che deve essere riprodotto su banco di prova dinamico.

Stage Date	Total	co	NMHC	CH ₄ ª	NOx	PMb	PNº	
	Test	g/kWh						
Euro III	1999.10 EEV only	ETC	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02	
	2000.10		5.45	0.78	1.6	5.0	0.16 ^c	
Euro IV	2005.10		4.0	0.55	1.1	3.5	0.03	
Euro V	2008.10		4.0	0.55	1.1	2.0	0.03	
Euro VI	2013.01	WHTC	4.0	0.16 ^d	0.5	0.46	0.01	6.0×10 ¹¹

Figura 8: Limiti emissivi sul ciclo omologativo WHTC

La normativa introduce inoltre i NTE (Not To Excede) test, ovvero test che si occupano di verificare che il veicolo al di fuori dei tredici modi del WHSC non ecceda nelle emissioni, e

i PEMS (Portable Emission System) effettuati su tratte urbane (0-50 km/h), rurali (50-75 km/h) e autostradali (>75 km/h).

Per i veicoli HD si ha un TCO (Total Cost of Ownership) molto elevato e i costruttori focalizzano l'attenzione verso l'abbassamento di tale costo.

Nell'immagine sottostante si osserva il consumo di combustibile per gli HD negli anni con un trend in diminuzione. Per questi veicoli una quota importante del TCO è data dal consumo di combustibile, quindi la diminuzione di quest'ultimo è direttamente proporzionale alla diminuzione del TCO. Per questo motivo, un veicolo con un consumo minore, ha una minore emissione di CO₂.

Da questo studio ne deriva che la CO₂ per gli HD non veniva normata in quanto l'e-Truck era già ottimizzato al massimo per diminuire il TCO quindi la CO₂.

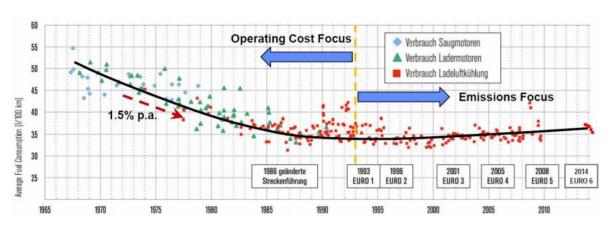


Figura 9: Andamento consumo di combustibile per veicoli HD

Dal febbraio 2019 la Commissione Europea ha stabilito per i veicoli HD dovrà esserci una riduzione delle emissioni di CO₂ del 15% entro il 2025 e del 30% entro il 2030 e per questo è stato necessario inserire una baseline, ovvero un valore di partenza da cui calcolare la diminuzione.

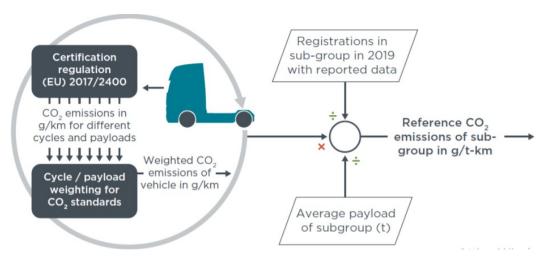


Figura 10: Calcolo baseline

Per il calcolo della baseline, a partire dai dati del motore sono state calcolate le emissioni di CO₂ tramite il software VECTO, distribuito della Commissione Europea.

A partire dal valore di baseline, flotte con valori emissivi superiori verranno penalizzate con multe, mentre flotte con valori emissivi inferiori otterranno degli sconti.

Vengono classificati come ZLEV (Zero and Low Emission Vehicles) quei veicoli con un livello di CO₂ inferiore alla metà del valore di baseline. Per i costruttori di questi veicoli viene effettuato uno sconto sulle emissioni di CO₂ sulla flotta del venduto al fine di incentivare la produzione di ZLEV e conseguentemente diminuire la produzione di CO₂.

CAPITOLO 2: IL MONDO DEI VEICOLI ELETTRICI

2.1 Cenni sulla storia della macchina elettrica

Il BEV (Battery Electric Vehicle) non rappresenta una tecnologia recente, la prima carrozza elettrica fu costruita negli anni '30 dell'Ottocento da Robert Anderson. Con un'autonomia di 50 km/h, la richiesta di queste vetture era elevata per la circolazione urbana per la semplicità di guida, scarsa necessità di manutenzione e soprattutto la silenziosità, etichettate soprattutto per un pubblico femminile. La Seconda Rivoluzione Industriale portò un rallentamento dello sviluppo dei veicoli elettrici a scapito di veicoli a benzina con motore a combustione interna. Durante gli anni del grande boom industriale, le prestazioni delle auto a benzina furono migliorate significativamente portando questi veicoli a diventare leader del mercato in pochi anni. Negli anni '20 del 900 una serie di fattori portarono i motori a benzina in netto vantaggio rispetto ai veicoli elettrici: la scoperta di nuovi giacimenti petroliferi con conseguente abbassamento del prezzo della benzina, silenziatori per le marmitte, la diffusione del motorino di avviamento elettrico che sostituì la scomoda accensione con manovella e il radiatore che risolse il problema del surriscaldamento. Le auto elettriche, rispetto alle auto a benzina, divennero di nicchia e furono impiegate all'interno di settori particolari nei quali la velocità non risultava un requisito stringente. A metà del secolo però, le auto elettriche ebbero la possibilità di tornare sulla scena grazie soprattutto alla crisi petrolifera che portò all'aumento del prezzo della benzina e ai movimenti ecologisti. Il problema della scarsa autonomia delle batterie però, non permise ai veicoli elettrici di svilupparsi davvero lasciando il primato ai motori a combustione interna. Agli inizi degli anni 2000, la mobilità sostenibile diventò un tema centrale a causa dei danni ambientali causati dagli inquinanti e dai gas serra. Proprio per questo la maggior parte delle case automobilistiche cominciarono a lavorare costantemente allo sviluppo di nuove tecnologie in grado di ottimizzare i trasporti sostenibili. Uno dei temi principali rimane l'autonomia di queste vetture, attualmente le batterie a litio risultano in grado di percorrere tragitti ampi senza bisogno di ricarica.

2.2 Veicoli tradizionali e Veicoli ibridi

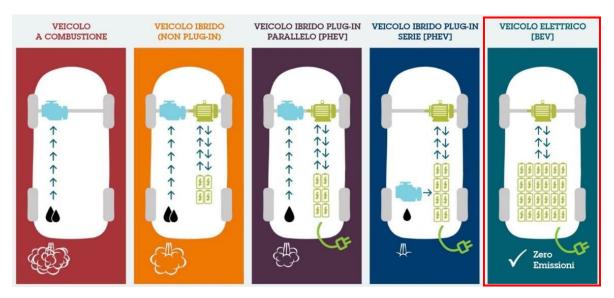


Figura 11: Struttura di un veicolo tradizionale, veicolo ibrido e veicolo elettrico

Nell'immagine si osservano cinque veicoli con cinque architetture differenti:

1) Veicolo equipaggiato esclusivamente da un motore a combustione interna (ICE)

Questi offrono buone prestazioni grazie all'elevata densità energetica dei combustibili che derivano dal petrolio, lavorando lontano dalla curva di massimo rendimento. Gli svantaggi principali sono lo scarso risparmio di carburante e l'inquinamento prodotto;

2) Veicolo ibrido non plug-in (HEV)

Questo veicolo combina due diverse fonti di alimentazione che possono fornire direttamente o indirettamente energia. I componenti di un veicolo ibrido sono:

- Motore a combustione interna, generalmente più piccolo rispetto ad un veicolo tradizionale che utilizza tecnologie avanzate per ridurre le emissioni inquinanti e aumentare l'efficienza;
- Serbatoio di carburante;
- Una o più macchine elettriche, che possono funzionare come motori per accelerare
 l'auto e come generatori per recuperare energia durante la frenata rigenerativa;

- Batterie, le quali a differenza del carburante che viene utilizzato solamente per erogare energia, possono erogare energia o stoccarla dalle macchine elettriche;
- La trasmissione che consente di fornire energia dalle sorgenti alle ruote.

L'ibridazione ci permette di ottenere una serie di vantaggi, uno fra tutti la frenata rigenerativa che permette di recuperare energia durante la frenata (energia che altrimenti andrebbe dissipata) e immagazzinarla grazie al generatore. È possibile ottenere un miglioramento dell'efficienza del motore a combustione interna grazie alla fonte secondaria di energia che gli impedisce di operare in condizione di inefficienza. Attualmente questi veicoli sono più costosi dei veicoli tradizionali, più pesanti a causa della seconda fonte di energia montata a bordo, dotati di sistemi di controllo più complessi e hanno un elevato costo anche dei componenti aggiuntivi, ovvero batterie e macchine elettriche.

Un veicolo ibrido è denominato *ibrido plug-in* se permette la ricarica delle batterie via cavo. Sono generalmente progettati per percorrere distanze relativamente lunghe con un aiuto minimo o nullo dell'ICE.

3) Veicolo ibrido plug-in serie (PHEV)

In un veicolo ibrido in serie la trazione è assicurata esclusivamente da un motore elettrico, alimentato da un ICE. L'unità tra le due fonti energetiche aiuta quando la richiesta di potenza è elevata, quando la richiesta è bassa l'ICE ricarica il pacco batteria. L'applicazione maggiore è quella di Range Extender, il veicolo è in funzionamento puro elettrico e il motore termico produce l'energia necessaria per estendere il range di chilometraggio. Il motore termico, il generatore e il pacco batterie sono relativamente piccoli: il grosso vantaggio è che il range non è più legato alla batteria perché il motore termico a bordo consente di fare la differenza.

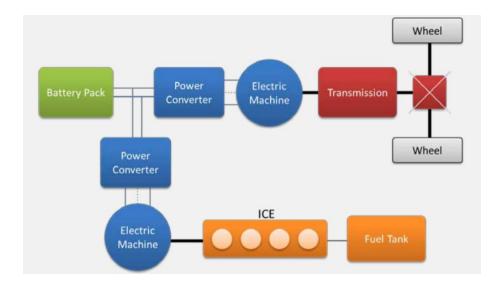


Figura 12: Architettura veicolo ibrido in serie

Questa configurazione ha basse emissioni ed elevate efficienze perché ottimizza la guida soprattutto durante il funzionamento stop-end-go riducendo al minimo il funzionamento inefficiente del motore e massimizzando l'energia recuperata durante la frenata rigenerativa.

L'applicazione Range Extender è strettamente legata alla missione considerata e non è detto che possa garantire le stesse prestazioni per tutte le missioni. Se il veicolo venisse usato per una missione non prevista in sede di progetto, si rischierebbe che la batteria si scarica e il motore termico può o ricaricare la batteria o dare un minimo di potenza, ma non riesce a soddisfare entrambe le richieste. Quindi o il veicolo viene fermato per aspettare il tempo di ricarica, oppure si procede con la marcia ma con prestazioni ridotte.

4) Veicolo ibrido plug-in parallelo (PHEV)

L'architettura di questo veicolo prevede che alle ruote sono collegate meccanicamente sia la macchina termica che la macchina elettrica, quindi entrambe sono in grado di trasferire potenza meccanica alle ruote. Sono considerati veicoli molto flessibili perché possono sostenere:

 Funzionamento in puro elettrico, in questo caso il motore termico viene staccato tramite una frizione. Questo permette un aumento dell'efficienza del sistema perché si evita di "trascinare" il motore termico;

- Funzionamento puro termico;
- Frenata rigenerativa;
- Funzionamento ibrido.

Dall'immagine seguente vediamo che la struttura è priva di un generatore elettrico, l'unica macchina elettrica è collegata sia al generatore termico che alle ruote.

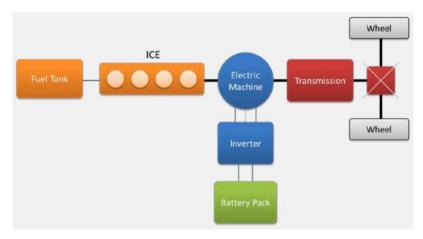


Figura 13: Architettura veicolo ibrido in parallelo

La potenza alle ruote viene ripartita tra motore termico e macchina elettrica, quindi le due sorgenti possono "sommare" la loro potenza e questo può essere fatto per mezzo di varie architetture.

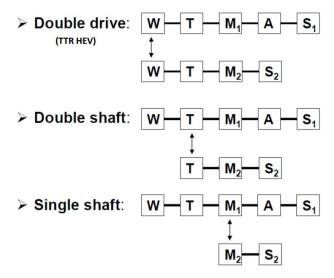


Figura 14: Architetture veicolo ibrido parallelo

- Con l'architettura Double Drive la connessione è a livello delle ruote: il powertrain termico è montato sull'assale anteriore, il powertrain elettrico è montato sull'assale posteriore. Questa soluzione mi permette di ottenere quattro ruote motrici;
- L'architettura Double Shaft prevede un collegamento a valle della trasmissione, questa soluzione non è molto utilizzata a causa dell'incremento dei costi;
- L'architettura Single Shaft prevede una connessione a livello dei due motori, la macchina elettrica è collegata al motore tramite una cinghia oppure tramite un volano.

2.3 Veicolo Elettrico

La struttura di un veicolo elettrico è più semplice di un veicolo termico, si risparmia sul sistema di avviamento, lubrificazione e raffreddamento. La batteria si ricarica collegando il veicolo alla rete elettrica e durante la frenata rigenerativa. Un componente importante di questi veicoli è il caricabatterie, la cui efficienza varia tra il 60% e il 97%, dissipando in calore dal 3% al 40% dell'energia elettrica.

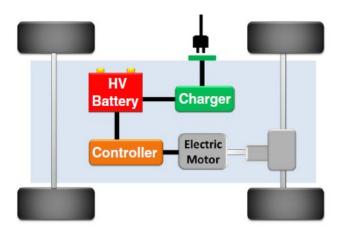


Figura 15: Architettura veicolo elettrico

Il motore elettrico

Il motore elettrico rappresenta il cuore del sistema in grado di convertire l'energia elettrica in energia meccanica per il movimento. Un motore elettrico è composto principalmente da due elementi, il rotore e lo statore. Lo statore, parte fissa del motore elettrico, è composto da un conduttore che genera campi magnetici variabili che si oppongono a quelli generati

dal rotore. Quest'ultimo è dotato di magneti permanenti che, insieme allo statore, trasmettono alle ruote l'energia necessaria per il movimento.

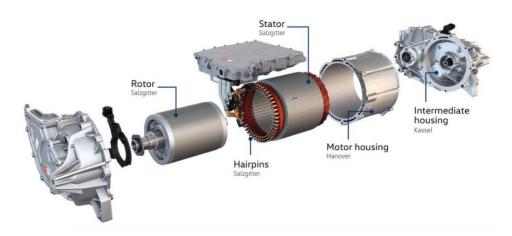


Figura 16: struttura del motore elettrico

Possiamo suddividere i motori in sincroni e asincroni, nel primo la velocità di rotazione dell'asse è rigidamente vincolata alla frequenza della tensione di alimentazione, nel secondo la velocità di rotazione dell'asse è sempre minore della velocità di rotazione del campo rotante legata alla frequenza della tensione di alimentazione. Sulla maggior parte delle auto elettriche vengono utilizzati i motori sincroni a magnete permanente.

Batterie

È ancora possibile equipaggiare auto elettriche con batterie a piombo, già utilizzate negli anni '90 in California in quanto fornivano delle prestazioni di guida paragonabili al motore ICE. Ad oggi le auto elettriche di gamma più piccole, progettate per la guida in città sono dotate di batterie al piombo, come anche piccoli camion elettrici. La batteria al piombo è economicamente vantaggiosa, ma ha una serie di svantaggi. La fase di ricarica delle batterie ha enormi restrizioni e diversi punti critici. Le ricariche rapide o parziali rovinano la batteria al piombo, i tempi di ricarica richiedono dalle 6 alle 8 ore, il caricabatteria non ha tutte le informazioni della batteria ma controlla solo la tensione e questo non basta: una scelta sbagliata di quest'ultimo o un settaggio sbagliato potrebbe ridurre la vita della batteria. Le batterie al piombo negli anni sono state sostituite dalle batterie al litio che, oltre ad avere una densità energetica superiore alle batterie al piombo, hanno un'efficienza del

96%, sono progettate per ricariche parziali e ricariche rapide. Si può ricaricare la batteria del 50% in 30 minuti e l'elettronica di queste batterie richiede al caricabatterie l'esatta corrente di cui ha bisogno in funzione dei parametri interni, quindi se il collegamento non fosse adatto la carica non partirebbe proteggendo la batteria.

2.4 Ricarica della batteria

Per un BEV o per un HEV plug-in ci sono differenti tecnologie per ricaricare la batteria: la ricarica conduttiva, la ricarica wireless, la ricarica conduttiva automatica al lato e dal basso e il sistema Battery Swap. Quest'ultima è la tecnologia di ricarica utilizzata per questo lavoro di tesi, nonostante nello scenario attuale è poco diffusa, si prevede che il suo utilizzo si intensificherà nel momento in cui alcuni punti critici, come la standardizzazione delle batterie e i costi dell'infrastruttura, verranno a mancare con lo sviluppo sempre incalzante delle batterie utilizzate. L'utilizzo del Battery Swap System in questo progetto è ulteriormente giustificato dall'aver analizzato una categoria specifica di veicoli, ovvero i veicoli commerciali. Per questi veicoli le missioni sono definite e immutabili e questo rende più semplice il dimensionamento della batteria e la standardizzazione della stessa per veicoli di case differenti.

Ricarica conduttiva via cavo

La ricarica conduttiva via cavo, o ricarica cablata, consiste nel collegare il veicolo ad un terminale di alimentazione attraverso un cavo direttamente connesso al pacco batteria, può essere utilizzata corrente continua AC o alternata DC. Questo metodo è il più semplice e intuitivo e generalmente viene utilizzato per ricaricare le batterie all'interno dei magazzini di scambio batteria, i costi dell'infrastruttura non sono eccessivi e le emissioni elettromagnetiche sono praticamente nulle. Il metodo però è impossibile da automatizzare, è necessario l'intervento dell'uomo per il collegamento. Il tempo di ricarica è molto variabile, va da poche ore a dieci ore a seconda della tecnologia di ricarica cablata utilizzata dalla batteria stessa.

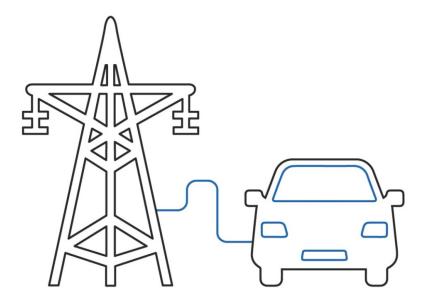


Figura 17: Ricarica conduttiva cablata

Ricarica per induzione

La ricarica per induzione potrebbe rappresentare una valida alternativa per il futuro. Questa consiste nel ricaricare la batteria di un'autovettura senza l'ausilio del cavo ma tramite campi magnetici. Il circuito di alimentazione è incorporato nel terreno nel punto di parcheggio dell'auto. Per questo motivo il parcheggio deve essere estremamente preciso per garantire il perfetto allineamento delle bobine di ricarica ed evitare ulteriori perdite. Vengono sfruttate due bobine: una bobina di terra sfrutta il fenomeno dell'induzione elettromagnetica generando campi molto forti che inducono delle correnti sulla bobina del veicolo che permettono la ricarica della batteria. Per come viene strutturata, la ricarica induttiva potrebbe essere effettuata ai semafori, all'interno di parcheggi di supermercati e di autogrill. Durante queste soste temporanee denominate "snack charging", la batteria al litio può raggiungere un livello pari al 60/70% di carica e solo in previsione di lunghe percorrenze sarà necessario collegare il veicolo al caricabatterie per effettuare una supercharger. Per quanto la ricarica induttiva elimina la necessità dell'intervento umano, attualmente il suo utilizzo non è molto esteso. La ricerca tecnologica da anni cerca soluzioni concrete a problemi di infrastrutture e di efficienza. I primi causati dalla complessità e dal costo di infrastrutture capaci di generare forti correnti alternate ad alte frequenze. I secondi dovuti al fatto che i campi magnetici che passano liberi nell'aria non solo sono particolarmente inefficienti ma generano anche emissioni pericolose in prossimità del veicolo.

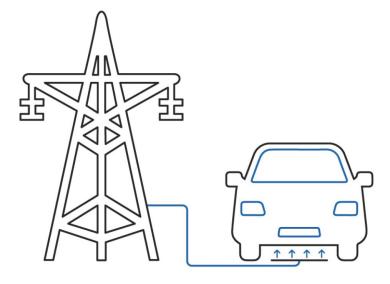


Figura 18: Ricarica per induzione

Ricarica tramite Battery Swap

Il Battery Swap non rappresenta una vera e propria tecnologia di ricarica ma di sostituzione della batteria in punti dedicati. La batteria scarica viene sganciata dall'autovettura tramite un sistema automatizzato per essere posizionata all'interno di un magazzino. Da un secondo magazzino viene prelevata una batteria completamente carica e compatibile con la precedente e montata sull'autovettura. Tutto questo avviene in cinque minuti, lo stesso tempo necessario per riempire un serbatoio di combustibile fossile. Successivamente tutte le batterie scariche che vengono accumulate nel corso della giornata vengono ricaricate.

Nonostante la rapidità dei "tempi di ricarica", è ad oggi un sistema poco sviluppato a causa del costo dell'infrastruttura e soprattutto la necessità di uno standard comune delle batterie delle auto.

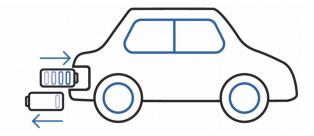


Figura 19: Ricarica tramite Battery Swap System

Ricarica automatica conduttiva al lato

Per la ricarica automatica conduttiva al lato viene installato un robot antropomorfo in prossimità dell'aria di parcheggio che inserisce un connettore standard nella presa di ricarica del veicolo. Sono sistemi ingombranti e più complessi rispetto ad una ricarica automatica conduttiva dal basso. Mentre per quest'ultima è sempre noto l'orientamento della stessa rispetto al terreno, l'orientamento rispetto al terreno per una presa classica deve essere misurato tramite sistemi di visione con telecamera. Il robot deve perciò avere un numero di gradi di libertà sufficienti a permettere l'allineamento in ogni condizione.

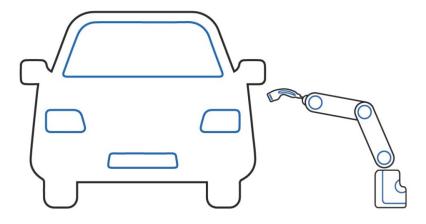


Figura 20: Ricarica automatica conduttiva al lato

Ricarica automatica conduttiva dal basso

Questa tecnologia prevede l'installazione di un robot al centro dell'area di parcheggio di dimensioni sufficientemente piccole da permettere alla macchina di parcheggiarci sopra. Posizionata l'autovettura, il robot può muoversi e connettersi. A causa delle piccole dimensioni imposte dal posizionamento sottostante al veicolo, i livelli di potenza raggiungibili durante la ricarica non sono elevati come quelli che possono essere raggiunti durante la ricarica al lato. Questi sistemi generalmente vengono posti come alternativa ai sistemi di ricarica wireless in quanto eliminano le emissioni di campi elettromagnetici, non ci sono esposte piastre ad elevata temperatura e i costi dell'infrastruttura non sono elevati.

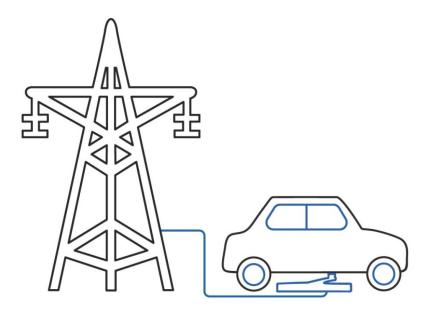


Figura 21: Ricarica automatica conduttiva dal basso

2.4 Diffusione Battery Swap System nel mondo

Tra le tre tecnologie di ricarica per un BEV la tesi si concentra sul Battery Swap System, considerata la soluzione che meglio potrebbe adattarsi al mercato moderno e alle esigenze di consumatori e fornitori.

Il Battery Swap System prevede una sostituzione della batteria scarica con una completamente carica in una stazione dedicata.

La più grande stazione BSS nel mondo è stata ufficialmente messa in funzione a Pechino, in Cina, nel 2011 dall'israeliano Shai Agasso. Dopo due anni, è stato dichiarato fallimento a causa di un elevato costo per la realizzazione delle infrastrutture e per la standardizzazione di dimensioni e tecnologie degli accumulatori tra i costruttori difficile da raggiungere.

Il governo cinese, però, ha insistito sulla standardizzazione del processo di scambio e della tecnologia della batteria su qualsiasi auto, così la casa automobilistica Nio ha attualmente 125 stazioni di servizio per la sostituzione rapida delle batterie ed il gruppo BAIC, uno dei più grandi produttori di auto elettriche in Cina, ha installato 187 stazioni di Battery Swap in 15 città per taxi elettrici. Anche l'Europa si affaccia su questo scenario, ma i pareri contrari

sono molti di più dei favorevoli perché le batterie sono componenti chiavi nelle auto elettriche e standardizzarle significherebbe rinunciare alla possibilità, da parte del costruttore, di diversificazione tra le auto.



Figura 22: Nio Battery Swap Station

Il Battery Swap ha particolare interesse per i veicoli commerciali. È stato infatti utilizzato per i bus elettrici nella Cina Orientale nella città di Qingdao con i connettori di Phoenix Contact. I due punti critici per un BEV sono prezzo e autonomia, ma l'applicazione su veicoli commerciali è differente rispetto ad un'autovettura normale in quanto non percorrono lunghe distanze e la missione è definita e immutabile. Il XJ Group Corporation, l'azienda che si occupa del trasporto pubblico nel Qingdao, permette l'utilizzo di autobus elettrici con grande successo. Alle stazioni di cambio batteria, quest'ultima viene sostituita con quella carica su corridoi di scambio dotati di robot su entrambi i lati. Per lo scambio sono necessari sette minuti e l'autobus riprende le sue funzioni. La batteria di circa 450 bus viene sostituita due o tre volte al giorno. Ad oggi sono state sostituite 800.000 batterie ricoprendo 18 milioni di km.

Questo sistema si sta sviluppando anche in Polonia, il progetto è portato avanti dal produttore di autobus Autosan e il Centro Nazionale per la Ricerca e lo Sviluppo e il consorzio Lukasiewicz-PIMOT. La loro idea prevede che la batteria sia collocata esternamente al veicolo per diminuire i tempi di sostituzione. Ciò che ci si aspetta è che il sistema Battery Swap permetta l'uso di autobus elettrici non solo nel trasporto urbano locale ma anche regionale e nazionale.



Figura 23: Ape E-City

A New Delhi in India L'Ape E-City del gruppo Piaggio in versione full-electric del tre ruote Piaggio rappresenta l'ingresso del Gruppo nel mercato indiano dei veicoli commerciali elettrici. Il sistema Battery Swap consente la sostituzione in pochi minuti della batteria scarica con una carica presso stazioni di servizio automatizzate. Viene prodotta nello stabilimento del gruppo Piaggio nello stato del Maharashtra ed è disponibile sul mercato indiano ad un prezzo in linea con la versione a gas naturale.

L'India prevede entro il 2030 di raggiungere il 70% della totalità dei veicoli a due ruote/tre ruote e del trasporto pubblico.

2.5 Analisi del Battery Swap System

2.5.1 Vantaggi del Battery Swap System

Una stazione di Battery Swap è una stazione in cui un veicolo elettrico scarica la propria batteria esausta per sostituirla con una batteria carica e, conseguentemente, le batterie esauste vengono accumulate in magazzini per essere ricaricate. Grazie a questa tecnologia, i

veicoli possono effettuare un rapido scambio e quindi una ricarica rapida. Il tempo di ricarica rappresenta, infatti, per i veicoli elettrici uno degli aspetti più critici per i lunghi tempi di attesa. Per fare ciò è necessario standardizzare le batterie dei vari veicoli elettrici in modo tale che la stessa batteria possa essere installata su differenti veicoli appartenenti tutti alla stessa classe (veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti, veicoli leggeri). In questo modo le batterie vengono noleggiate dal proprietario dell'auto e utilizzate per la missione a cui il veicolo è destinato, questo porta un abbassamento del costo del veicolo stesso in quanto il costo della batteria viene detratto dal costo totale del veicolo.



Figura 24: Punti di vista per l'analisi del Battery Swap System

Il sistema di ricarica, il possessore dell'auto e il possessore della stazione di servizio sono i tre principali "protagonisti" interessati dal nuovo sistema di scambio batteria. Attraverso i tre punti di vista, si analizzano i benefici di questo sistema:

Prospettiva del sistema di ricarica

- Possibilità di programmare il tempo di ricarica della batteria ottimizzando la strategia di ricarica. Ad esempio, per evitare di sovraccaricare il sistema di distribuzione di energia elettrica è possibile ricaricare la batteria in orari notturni;
- Controllare il tempo di carica e scarica della batteria, in modo che picchi di sovraccarico possono essere evitati;

Prospettiva del proprietario del veicolo

- Riduzione del costo del veicolo con la batteria a noleggio;
- Riduzione dei tempi di attesa, il sistema di scambio batteria avviene più velocemente rispetto al sistema di ricarica della batteria;
- Trasferimento del costo di manutenzione delle batterie dal proprietario dell'auto al proprietario dell'azienda che ha in gestione le stazioni di scambio;

- Non è necessario dotare la propria casa di caricatori di alta potenza;
- Il proprietario non deve più preoccuparsi per viaggi lunghi: con un'adeguata infrastruttura di scambio è più semplice affrontarli.

Prospettiva del possessore della Battery Swap Station

- Minimizzazione del costo dell'elettricità programmando il processo di ricarica della batteria;
- Massimizzazione dei profitti partecipando a mercati elettrici;
- Riduzione dei costi di infrastrutture in quanto non è necessario avere un parcheggio dotato di elevata superficie;
- La durata della batteria viene preservata in quanto non è necessario effettuare una ricarica rapida che potrebbe consumare la batteria riducendone la vita utile.

2.5.2 Svantaggi del Battery Swap System

Per quanti possano essere i vantaggi sui vari punti di vista, ci sono però altrettanti svantaggi di cui dobbiamo tenere conto.

- Primo tra tutti il design del pacco batteria. Le batterie devono essere facilmente accessibili e collocate in un unico pacco e questo deve essere progettato in modo tale da poter essere rimosso facilmente e rapidamente dal veicolo e ricollegato altrettanto rapidamente;
- 2) È fondamentale che le varie batterie siano compatibili tra loro. Affinché il sistema di Battery Swap abbia successo, è necessario trovare pacchi di batteria intercambiabili tra i vari produttori di veicoli differenti. Questa standardizzazione andrebbe però a limitare la flessibilità e l'innovazione del produttore che sarebbe costretto a seguire delle regole;
- 3) L'infrastruttura richiesta per i pacchi batteria è complessa e costosa. Tutte le stazioni di cambio batteria devono caricare i loro pacchi batteria, quindi esercitano sulla rete la stessa richiesta delle stazioni di ricarica tradizionali, con la differenza di poter gestire questa domanda in diversi orari a seconda dei picchi di richiesta di energia. Bisogna avere a disposizione un numero di pacchi batteria sufficientemente elevato da poter soddisfare il fabbisogno giornaliero di ogni stazione e prevedere

- eventuali richieste aggiuntive. Tutto ciò grava sull'aspetto economico di questa modalità di ricarica;
- 4) Un altro aspetto importante è la degradazione della batteria nel tempo. Considerando che le varie auto utilizzeranno lo stesso formato e potenza del pacco batterie, ci saranno batterie con capacità di accumulo di energia diverse all'interno della stessa stazione a causa del degrado. Ovviamente la maggior parte delle persone effettuerà una sostituzione con un pacco più recente poiché offrono una maggiore autonomia mentre gli altri che avranno a disposizione delle batterie con un livello di degrado superiore otterranno delle prestazioni inferiori quindi cicli operativi più brevi. Per evitare questo inconveniente, le batterie che hanno un degrado più elevato verrebbero sostituite più rapidamente aumentando i costi di riciclaggio;
- 5) La proprietà della batteria può essere stabilita in due modi differenti. Se la batteria appartiene al guidatore, quando il veicolo si reca in una stazione di scambio batteria, la batteria posseduta viene posizionata all'interno della stazione di ricarica e sul veicolo ne viene installata un'altra. Il veicolo deve poi tornare all'interno della stessa stazione per riacquisire la batteria oramai carica. Questo è limitante in quanto obbliga a ritornare nella stazione precedente indipendentemente dalla missione di viaggio. Il vantaggio è che il proprietario del veicolo è anche proprietario della batteria ed ha accesso alle altre batterie con possibilità di noleggio di esse per accelerare i suoi viaggi. È molto probabile però che per evitare di tornare nella stessa stazione, il guidatore scelga di caricare la batteria in maniera tradizionale. Inoltre, questo sistema comporta un maggior costo del pacco batteria che deve essere sovradimensionato rispetto al fabbisogno giornaliero perché le batterie possedute dai proprietari dei veicoli non possono essere utilizzate da altre vetture e rimangono all'interno del magazzino fin quando il suo proprietario non andrà a ritirarla. Un'altra possibilità è che la batteria non sia di proprietà del guidatore, in questo caso avremo una serie di vantaggi. Il prezzo del veicolo sarebbe più accessibile e il conducente non ha la necessità di tornare nella stazione precedente per recuperarla. Poiché la batteria non è di proprietà, ogni qual volta essa viene sostituita il proprietario del veicolo pagherà una tassa di noleggio;

6) Il costo totale del sistema è aggravato dal trasporto delle pesanti batterie.

2.6 Mercato del Battery Swap System

Il sistema di Battery Swap era già stato introdotto nel 1896 per risolvere gli stessi problemi che abbiamo oggi, ovvero autonomia e tempi lunghi di ricarica. In quel tempo la compagnia Hartford Electric Light Company mise a disposizione un servizio grazie al quale l'acquirente poteva compare l'auto priva di batterie e pagare una tariffa mensile per il noleggio della stessa. Veicoli e batterie furono modificati affinché fossero adatti ad una rapida sostituzione e il servizio fu a disposizione dal 1910 al 1924 comprendo oltre 6 milioni di miglia.



La prima azienda a mettere a disposizione un sistema per il cambio batteria è stata la Better Place, azienda fondata da Shai Agassi nel 2007. Il modello dell'azienda prevedeva la stipulazione con il consumatore di un contratto basato su quote di chilometraggio, simile a quelli che vengono utilizzate dalle compagnie di telefonia mobile basati su quote di minuti di conversazione. Il modello aveva l'obiettivo di abbassare i costi dell'autovettura in quanto il contratto copriva mensilmente i costi del pacco batteria, energia, manutenzione, sicurezza, vita della batteria. Il meccanismo di sostituzione prevedeva che l'auto entrasse in un corridoio, agganciata a delle guide e un sistema automatizzato provvedeva allo scarico della batteria sul veicolo e al suo immagazzinamento e alla ricarica della nuova batteria. Tale sistema aveva però dei punti critici, quali il costo di ogni stazione (circa 500.000 dollari) e il modello di auto supportato, ovvero l'unico possibile era la Renault Fluence Z.E. Nei suoi sei anni di vita, la Better Place non era stata in grado di convincere nessun altro costruttore a progettare un veicolo che fosse compatibile con la stazione di scambio da lei ideata e per questo dichiarò fallimento nel maggio 2013.



Tesla Motors è la compagnia americana dell'imprenditore seriale Elon Musk, già fondatore di PayPal e SpaceX. Si occupa di progettare, fabbricare e vendere veicoli elettrici e componenti per i motori di quest'ultimi. L'obiettivo di questa compagnia è quello di riuscire ad abbassare i prezzi dei veicoli elettrici in modo tale che possano essere acquistati dalla classe media. In attesa di questo traguardo, produce auto elettriche di alta gamma vendute ai pionieri del mercato, ai leader e ai trend setter. Dopo un mese dal fallimento della Better Place, Tesla ha presentato al pubblico il proprio meccanismo di Battery Swap in grado di effettuare la sostituzione in soli 90 secondi. Ogni stazione avrebbe un costo di circa 500.000 dollari con 50 batterie disponibili. La batteria si attesterebbe di proprietà del consumatore, questo potrebbe scambiare la propria batteria scarica con una carica e tornare poi a recuperarla pagando la tariffa per lo scambio e per l'energia, oppure si può scegliere di tenere la nuova batteria pagando una differenza di prezzo in base al differente degrado delle due. Un'altra soluzione potrebbe essere quella di spedire la batteria a casa del proprietario addebitandogli i costi di trasporto. Differentemente da Better Place i quali profitti erano basati solamente sui canoni d'affitto delle batterie, Tesla trae i suoi profitti dalla vendita dei veicoli. Comunemente con Batter Place però ha la possibilità di servire un solo modello di autovetture. Ad entrambe manca la flessibilità che potrebbe permettere l'utilizzo delle stazioni di Battery Swap da parte di modelli di autovetture differenti.



Ecospazio è un'azienda italiana con sede a Rovereto leader nel settore della progettazione e realizzazione degli impianti di movimentazione per magazzini. Sono già stati realizzati una serie di prodotti come colonnine di ricarica per bici, scooter e auto elettriche, ciclostazioni per la ricarica e bike sharing. Tra i vari progetti si annovera anche la realizzazione di una stazione automatizzata per il Battery Swap con magazzino di stoccaggio per la ricarica Energy Exchange Station (EES).

La stazione progettata da Ecospazio è facile da trasportare via camion o nave, non necessita di opere edili per il piazzamento ed è pronta per essere usata in due giorni di lavoro. È disponibile in due versioni che si differenziano per la grandezza del magazzino, divisa in due aree, una dedicata al prelievo e deposito delle batterie e una dedicata all'attesa. L'obiettivo di Ecospazio è quello di diffondere uno standard di batterie utilizzate da più case automobilistiche in modo che queste possano usare le loro stazioni di scambio batteria. Il business di Ecospazio prevede la vendita diretta di veicoli compresi di batteria più un costo per un eventuale sostituzione del pacco batterie. In questo senso i veicoli scelti per la produzione sono una microcar E-FOX e una vettura cittadina E3 ma attualmente l'azienda è alla ricerca di partner per mandare in porto il progetto. I prezzi delle vetture non sono ancora disponibili al pubblico ma Ecospazio potrebbe abbassare il prezzo delle vetture stesse sganciando da queste il costo della batteria e legandolo ad un canone mensile come il modello Better Place.

greenway

Greenway è un'azienda con sede Repubblica Ceca che si occupa di noleggio a lungo termine di veicoli commerciali leggeri ad aziende di trasporto e consegna merci. L'azienda stabilisce con il cliente un canone mensile che comprende il noleggio del veicolo, la fornitura di corrente, l'utilizzo del sistema di Battery Swap, il monitoraggio online, la manutenzione e altri costi. In questo modo solleva dal costo della vettura l'ansia dell'autonomia e la possibilità della ricarica. L'azienda fornisce una stazione di sostituzione della batteria semi-automatica che necessita di un operatore specializzato nella pratica di cambio batteria. Il sistema di Battery Swap della GreenWay è pensato esclusivamente per i veicoli che loro stessi mettono a disposizione per il noleggio e nel complesso è un sistema ben coordinato.

2.7 Veicoli elettrici commerciali

Come per i LD, anche per gli HD il limite principale per l'elettrificazione è l'autonomia della batteria. Confrontando un veicolo commerciale elettrico con un veicolo con motore a combustione interna, la densità energetica messa a disposizione è inferiore ma l'efficienza è superiore. Dal 1999 al 2010 però la densità energetica delle batterie a litio è raddoppiata e i prezzi sono scesi del 20%, favorendo l'espansione di questa tecnologia.

MAN Truck & Bus è stato uno dei primi produttori europei di veicoli commerciali elettrici e dall'autunno 2018 insieme al consorzio CNL Council for Sustainable Logistics conduce test su e-Truck (autocarri elettrici) per la successiva introduzione di questi veicoli sul mercato al fine di contribuire ad una mobilità sostenibile.

I costruttori di camion elettrici mirano ad ottenere un'autonomia almeno di 300 km corrispondente alle 4-5 ore di guida prima del riposo obbligatorio del camionista.

MAN TGM 26.360 E LL

Nel dicembre 2019 MAN Truck & Bus ha lanciato la produzione del veicolo MAN TGM 26.360 E LL nello stabilimento austriaco. L'e-Truck, completamente elettrico, è capace di trasportare un carico di 26t alimentato da un motore elettrico da 264 kW, dotato di frenata rigenerativa capace di aumentare l'autonomia del veicolo che si attesta ad essere di circa 200km, variabile a seconda dell'area geografica e delle condizioni climatiche. Sul veicolo vengono montate batterie a litio prodotte dal gruppo Volkswagen, posizionate dove convenzionalmente i veicoli hanno il propulsore diesel.

MAN eTGE

A novembre 2019 la Man Truck & Bus ha iniziato la commercializzazione anche di furgoni elettrici che consente la consegna merci all'interno dei centri urbani a zero emissioni, inquinanti e sonore, di notte e di giorno. Questi furgoni sono dotati di un motore robusto che consente un'usura ridotta e un'elevata efficienza energetica soprattutto in tratte con frequenti fermate intermedie. Di pari passo con lo sviluppo della mobilità elettrica, è nata la necessità di avere officine dedicate. In tal senso la MAN ha iniziato il processo di adeguamento delle proprie officine agli standard strutturali richiesti e alla formazione del personale tecnico per assistenza e manutenzione. Inoltre, ha costruito un gruppo di

consulenti specializzati denominato *Transport Solution*, con il compito di sostenere ed aiutare i consumatori nel passaggio alla mobilità elettrica, fornendo soluzioni alle esigenze di trasporto di ognuno.

E-Force On AG EF18 SZM

La E-Force One AG è stata fondata nel 2012 allo scopo di spianare la strada alla mobilità elettrica per carichi pesanti. Nel 2013 è stato lanciato il primo camion da 18 tonnellate completamente alimentato a batteria agli ioni a litio Ecovolta, con una densità energetica molto elevata capace di ridurre il peso della batteria rendendo l'e-Truck più leggero nel suo complesso. Ogni veicolo è stato progettato in modo da poter essere equipaggiato con batterie di dimensioni differenti in base al tragitto da percorrere e due diversi meccanismi di trasmissione. L'EF18 SZM è dotato di motori sincroni permanenti in grado di erogare 440 kW o 550 kW di potenza, con una capacità della batteria compresa tra 105 kWh e 630 kWh.

Tesla Semi, Nikola One & Nikola Two

Tesla Semi è il camion elettrico lanciato da Elon Musk nel 2019 si spinge ad avere fino agli 800 km di autonomia con una sola ricarica che, grazie alla ricarica Supercharger può avvenire in soli 30 minuti. Dotato di quattro motori elettrici collegati alle ruote posteriori capaci di una potenza complessiva di 1084 CV e batterie che consentono un'accelerazione in 5 secondi da 0 a 100 km/h.

Nikola One e Nikola Two sono due camion elettrici, con grandi capacità di carico, che entreranno nel mercato da quest'anno che differiscono solo per la cabina di guida. Oltre al motore elettrico e alla batteria sono dotati di una *fuel cell*, una pila a combustibile alimentata con idrogeno immagazzinato in un serbatoio. Con un rifornimento di 15 minuti è possibile percorrere fino a 2000 chilometri.

In questo progetto, infatti, è stato preso in analisi l'e-Truck e-TRUCK MAN, presentato nel settembre 2016, con 200 km di autonomia e una batteria di 264 kWh e un carico utile di 8t. Il secondo veicolo analizzato è un e-Force One AG, presentano nel 2012 con un'autonomia di 500 km e un carico utile di 26t.

In basso le immagini rispettivamente dei due veicoli.



Figura 25: e-Truck MAN



Figura 26: e-Force ONE AG

CAPITOLO 3: I MODELLI SIMULATIVI

3.1 Perché utilizziamo i modelli?

La simulazione è potente mezzo che ci permette di analizzare i problemi che abbiamo nel mondo reale con costi molto bassi. Affrontare il problema in maniera diretta nel mondo reale, significherebbe costruire, modificare, distruggere e spesso questa modalità potrebbe essere costosa oppure impossibile da realizzare. In questo senso il modello ci viene incontro.

Si possono distinguere i modelli analitici dai modelli di simulazione. Nel mondo analitico, o statico, la soluzione al nostro problema potrebbe essere difficile o addirittura impossibile da trovare. Generalmente il modello è implementato su un foglio di calcolo e il risultato ottenuto dipende dall'input imposto. Il mondo della simulazione, dinamico, è considerato come un insieme di regole che definiscono i cambiamenti del problema che si sta modellando. La simulazione è il processo attraverso il quale possiamo osservare i cambiamenti del modello nel tempo. Per problemi complessi la modellazione tramite simulazione è considerata la strada migliore per l'analisi.

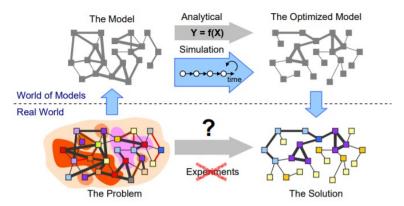


Figura 27: Potenzialità del modello di simulazione

I tre principali modi di strutturare un sistema di modellazione sono:

- 1) System Dynamics (SD)
- 2) Dynamics System (DS)
- 3) Agent Based (AB)

La scelta del modello non è casuale ma dipende dal sistema che stiamo analizzando e dallo scopo della modellazione.

3.2 System Dynamics

Sviluppato dall'ingegnere elettrico Jay W. Forrester negli anni '50. Il System Dynamics è "the study of information-feedback characteristics of industrial activity to show how organizational structure, amplification (in policies), and time delays (in decisions and actiones) interact to influence the success of the enterprise" [Forrester 1958 and 1961], ovvero lo studio dei feedback dell'attività industriale per mostrare in che modo il successo dell'impresa è influenzata dall'interazione dei tempi di ritardo, dalla struttura dell'organizzazione e dall'amplificazione. Per la strutturazione di un modello in SD bisogna modellare il sistema come una serie di blocchi (stocks) che interagiscono tra loro tramite flussi opportunamente direzionati (flow) e informazioni che determinano il futuro valore degli output.

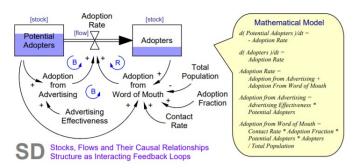


Figura 28: Modellazione in System Dynamics

In questo esempio, il nostro problema reale è strutturato secondo due blocchi: potenziali adottanti e adottanti effettivi. Il flusso tra i due stabilisce la velocità con la quale i potenziali adottanti diventano adottanti effettivi e questo flusso è influenzato da una serie di fattori. I blocchi sono rappresentati come vasi comunicanti e rappresentano lo stato del sistema. I flussi rappresentano la velocità con la quale lo stato del sistema cambia, infatti oltre ad effettuare uno schema che rappresenta il sistema, bisogna definire le interazioni matematiche che permettono la variazione dello stato del sistema e tali interazioni vanno definite all'interno del flusso stesso. Il sistema di astrazione della modellazione in System Dynamics è molto elevata, nei modelli sociali le singole persone non vengono rappresentate come tali ma aggregati in compartimenti e a volte anche differenziati per sesso, educazione

così come i singoli eventi come, ad esempio, la perdita di un lavoro, prendere una decisione, non sono considerati singolarmente ma sono aggregati all'interno dei flow.

3.3 Discrete Event

La modellazione ad eventi discreti risale agli anni '60, quando Goeffrey Gordon introdusse la prima versione del GPSS ovvero General Prupose Simulation System considerato il primo metodo di implementazione software di modellazione ad eventi discreti. Il sistema viene modellato come una sequenza di operazioni rappresentate graficamente da blocchi all'interno del diagramma di flusso del processo. Generalmente tale diagramma inizia con una sorgente che genera entità che vengono inserite nel processo e termina con un blocco di chiusura che ha il compito di rimuovere le entità dal processo. Le entità possono rappresentare clienti, pazienti, chiamate, documenti, prodotti, pallets progetti e idee. Le risorse invece rappresentano lo staff, i dottori, i lavoratori, gli operatori. I tempi di servizio delle operazioni, quindi i modelli stessi, sono stocastici. Ciò significa che tale modello prima di produrre un output significativo deve essere ripetuto un certo numero di volte. Generalmente gli output che otteniamo riguardano l'uso delle risorse, i tempi di attesa, lunghezza delle cose, costo del processamento delle entità.

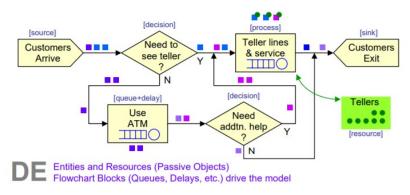


Figura 29: Modellazione in Discret Event

Nell'esempio seguente, le risorse sono i consumatori di una banca che vengono generati dalla *source* e inseriti all'interno del processo. Il primo blocco comporta la scelta, da parte di questi, se hanno bisogno o meno di parlare con un operatore. A seconda della decisione presa, possono essere inviati allo sportello con un consulente oppure inviati all'ATM. Nel primo caso, il blocco successivo è la *sink* che si occupa di rimuovere i consumatori dal

modello in quanto hanno raggiunto il loro obiettivo. Nel secondo caso, dopo aver utilizzato l'ATM, se hanno bisogno di parlare con un operatore vengono inviati prima all'operatore e successivamente rimossi, altrimenti vengono direttamente rimossi.

In questo caso il livello di astrazione è decisamente più basso rispetto al caso precedente, il diagramma rispecchia i passaggi sequenziali che avvengono nel sistema fisico. Differentemente dal System Dynamics qui ogni oggetto è rappresentato da un'entità o una risorsa e mantiene la sua individualità ma sono delle risorse passive perché semplicemente rappresentano il dato che gli viene assegnato. Ciò che accade è definito dal diagramma di flusso del processo. I modelli possono essere deterministici o stocastici.

3.4 Agent Based

La modellazione Agent Based è uno dei metodi di modellazione più recenti. I professionisti del settore hanno iniziato ad applicarla dal 2002-2003 mossi dal desiderio di ottenere una visione più approfondita dei sistemi che non vengono bene analizzati tramite i modelli tradizionali, dai progressi nella tecnologia di modellazione e dalla crescita della disponibilità della potenza della CPU. Il modello viene creato a partire dall'identificazione degli agenti e dei loro comportamenti. Gli agenti possono essere connessi tra di loro per farli interagire oppure possono essere inseriti in un ambiente con le proprie dinamiche. Il comportamento del sistema globale è ottenuto dai singoli comportamenti degli agenti. Il sistema è graficamente rappresentato da una serie di blocchi e transizioni. I blocchi rappresentano lo stato del sistema in cui l'agente si trova. Le transizioni rappresentano gli eventi che permettono all'agente di passare da uno stato all'altro.

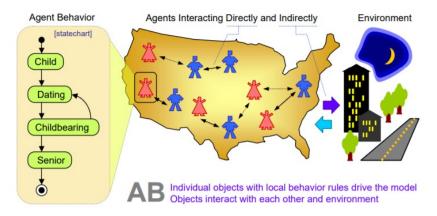


Figura 30: Modellazione in Agent Based

Nell'esempio seguente lo statechart rappresenta graficamente il processo di interazione sociale degli individui e della loro evoluzione. Gli individui, rappresentati dagli agenti, attraversano lo statechart passando per i vari stati attivati dalle transizioni da stato a stato. I bambini, che rappresentano lo stato iniziale dello statechart, crescono e si incontrano. Si sposano, si riproducono e diventano adulti. l'Agent Based non presuppone un particolare livello di astrazione diversamente dall'agente stesso. L'agente oltre a rappresentare persone fisiche, può anche essere un progetto, un'azienda o un'idea.

Questi tre metodi di modellazione sono tre diversi punti di vista che il modellatore può assumere nel momento in cui va a creare, dal problema reale di riferimento, il corrispondente problema nel mondo nei modelli. A volte però non è così chiaro stabilire da subito il livello di astrazione e il metodo corretto per la modellazione del problema, quindi il modellatore potrebbe partire dall'utilizzare un modello con un alto livello di astrazione e rendersi conto, in corso d'opera, di avere invece bisogno di un livello di astrazione più basso e quindi passare da un modello all'altro. Un'altra soluzione potrebbe essere quella di utilizzare modelli diversi per modellare un problema le cui parti possono essere descritte in maniera diversa che altrimenti rimarrebbero fuori dall'ambito del modello. La combinazione dei tre modelli è resa possibile dal software AnyLogic.

3.5 AnyLogic – Cenni storici



Figura 31: Logo AnyLogic

AnyLogic è un software sviluppato da The AnyLogic Company che supporta le tre metodi di modellazione sopra descritti: AB, SD, DE. È considerato un cross-platform simulation software, ovvero un software di simulazione capace che può essere implementato su diverse piattaforme in quanto lavora su Windows, macOS e Linux. Viene utilizzato per simulazioni di negozi, salute, catene di produzione e logistica aziendale, traffico cittadino, dinamica dei pedoni, dinamica dell'ecosistema, processi sociali ed economici.

AnyLogic fu sviluppato nel 1998 dopo che, qualche anno prima, il grande interesse per l'approccio matematico alla modellazione e simulazione di processi paralleli aveva portato allo sviluppo di un sistema software da parte di un gruppo di ricerca dell'Università di San Pietroburgo per l'analisi di programmi. Questo sistema chiamato COVERS (Concurrent Verification and Simulation) consentiva l'analisi della modellazione grafica e del comportamento del sistema. AnyLogic fu sviluppato con l'intento di mettere a disposizione un software new age che permettesse di effettuare analisi di simulazione, di prestazioni, comportamento di sistemi stocastici ottimizzazione e visualizzazione. Il nome AnyLogic derivava proprio dalla capacità del software di supportare tutti gli approcci di modellazione noti e la combinazione di questi approcci all'interno di un unico modello. Poiché è stato considerato un'evoluzione di COVERS nella sua ultima versione 3.0, la prima versione di AnyLogic rilasciata fu AnyLogic 4 e successivamente nel 2003 fu rilasciato AnyLogic 5 con una versione focalizzata sulla simulazione aziendale in diversi settori. Nel 2014 è stato rilasciato AnyLogic 7, dotato di aggiornamenti volti a semplificare la creazione dei modelli e successivamente con AnyLogic 7.1 è stato incluso la nuova implementazione GIS nel software che ad oggi permette di supportare mappe di OpenStreetMap. Dal 2015 è disponibile AnyLogic Personal Learning Edition (PLE) che è quella che ho personalmente utilizzato per la creazione del modello che analizzerò in questo documento in tesi. Nonostante le dimensioni dei modelli creati tramite questa versione sono limitate, ha permesso di effettuare un'analisi attenta del problema in esame. Nel 2018 è stata rilasciata la versione 8.0 integrata con AnyLogic Cloud che permette di avere un supporto web per l'analisi della simulazione.

3.6 Il linguaggio di programmazione di AnyLogic: OPP e Java

AnyLogic è un programma che consente la realizzazione di un modello tramite la programmazione visuale e la programmazione tramite codice sorgente.

I modelli di simulazione sono costituiti basandosi su un approccio alla programmazione specifico, ovvero la programmazione orientata agli oggetti (OPP).

La programmazione orientata agli oggetti è un paradigma di programmazione che prevede di raggruppare in un'unica entità, ossia la classe, sia le strutture dati che le procedure che operano su di esse creando così un'oggetto dotato di proprietà, dati, e metodi, che operano sui dati dell'oggetto stesso.

La programmazione orientata agli oggetti si basa su alcuni concetti fondamentali:

La classe

In questo paradigma di programmazione la classe è il nuovo tipo di dato introdotto. Un oggetto è una variabile appartenente ad una specifica classe. Oggetti dello stesso tipo appartengono alla stessa classe. Tali oggetti sono caratterizzati da attributi e metodi che sono stati definiti all'interno della classe.

Il programma viene visto come un insieme di oggetti che interagiscono tra loro.

Questo concetto è alla base della programmazione ad oggetti e capirlo è fondamentale per comprendere la costituzione del modello analizzato in questa tesi.

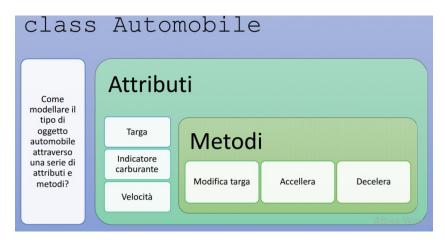


Figura 32: Gli elementi della OOP

Nell'esempio vediamo la classe Automobile. Gli attributi che differenziano un oggetto dall'altro della stessa classe sono la Targa, l'Indicatore del carburante e la Velocità alla quale l'automobile sta procedendo. È possibile agire sull'oggetto stesso modificando gli attributi attraverso i metodi. Accelerando un'automobile cambieremo la sua velocità, ad esempio.

L'incapsulamento

Con incapsulamento si intende la possibilità di un linguaggio di programmazione di accorpare metodi e proprietà all'interno di un'unica area ovvero all'interno dell'oggetto. L'oggetto viene diviso in due parti: l'interfaccia, costituita da una serie di metodi che possono essere invocati dall'utente per accedere alle funzionalità dell'oggetto, e l'implementazione, contenente l'implementazione delle funzionalità dell'oggetto e delle strutture dati necessarie.

L'ereditarietà

L'ereditarietà consente di definire nuove classi per specializzazione o estensione di classi precedenti. In questo modo è possibile far ereditare tutti i metodi e gli attributi di una classe ad un'altra. La classe figlia è chiamata "sottoclasse". La classe madre è chiamata "superclasse".

La programmazione orientata agli oggetti offre una serie di vantaggi. Permette di rappresentare le varie entità suddivide tra loro e coese al loro interno grazie alla classe, il sistema complessivo è realizzabile tramite l'unione di operazione sui diversi oggetti che sono disaccoppiati tra loro. Grazie all'ereditarietà è possibile utilizzare informazioni già presenti e crearne delle nuove.

La creazione di AnyLogic è stata ispirata da Java che è il linguaggio ideale per i modellisti. Java è il linguaggio di programmazione più usato del pianeta, con diverse "sottotecnologie" affermati in diversi ambiti. Oggigiorno miliardi di congegni elettronici utilizzano la tecnologia Java: telefoni cellulari, smartphone, smart card, robot su Marte. Le caratteristiche principali di Java sono:

- 1. La sintassi semplice e simile a quella del C o C++;
- 2. Il codice può essere scritto utilizzando un blocco note senza pagare licenze;

- 3. Il meccanismo di gestione della memoria è automatico, ma il compilatore è molto severo e obbliga il programmatore a risolvere tutte le situazioni di errore garantendo un maggiore possibilità di funzionamento del programma;
- 4. Java è un linguaggio di alto livello soprattutto grazie alle sue librerie di classi standard dettagliatamente documentate, questo permette anche a chi approccia per la prima volta a Java di creare applicazioni complesse;
- 5. La stesura del programma in Java è indipendente dalla piattaforma al quale è destinato;
- 6. L'indipendenza è resa possibile grazie alla Java Virtual Machine (JVM), un software che svolge da interprete per le applicazioni Java. Dopo aver scritto il programma Java bisogna compilarlo ottenendo così un file che contiene la traduzione in un linguaggio macchina chiamato "byte code". Ottenuto questo file, la JVM interpreterà il byte code e il programma andrà in esecuzione. Un esempio è il software Android di Google, dove le applicazioni sono scritte in Java e sono eseguite da diversi modelli di Tablet e Smartphone;
- 7. Gli strumenti forniti da Java obbligano ad una programmazione ad oggetti ma i paradigmi di tale programmazione risultano facilmente apprezzabili e comprensibili in quanto Java è il più chiaro e schematico linguaggio di programmazione orientato agli oggetti.

3.7 AnyLogic – funzionamento

La simulazione tramite AnyLogic consente di visualizzare in maniera diretta il modello creato grazie all'animazione interattiva 2D e 3D e quindi la disponibilità di elementi da poter visualizzare in 3D e 2D. L'animazione ci consente di osservare in maniera immediata in che direzione sta andando il nostro modello e intervenire apportando modifiche in caso ciò che stiamo ottenendo non è conforme con ciò che ci eravamo prefissati. I processi vengono graficati tramite diagrammi che sono differenti a seconda del tipo di modello scelto. I principali in AnyLogic sono:

- Stock & Flow Diagrams, utilizzati per la modellazione in System Dynamics;
- Statecharts, utilizzati per la modellazione in Agent Based;
- Process flowcharts, utilizzati per la modellazione in Discret Event.

AnyLogic mette a disposizione una serie di librerie, ognuna delle quali dispone di elementi per la modellazione di uno specifico problema.

- The Process Modeling Library utilizzata soprattutto per la modellazione ad Eventi Discreti, per la simulazione di catene di montaggio, logistica aziendale, ospedali grazie alla messa a disposizione di elementi quali veicoli, clienti, prodotti, risorse che possiamo rappresentare graficamente e osservare poi nella simulazione. I blocchi che rappresentano il processo includono ritardi, file, servizi, utilizzo di risorse e sono disposti in modo da strutturare un flowchart;
- The Pedestrian Library dedicata alla simulazione di modelli che simulano un flusso di pedoni come la stazione della metropolitana o i controlli di sicurezza o strade;
- The Rail Library che supporta la modellazione di stazioni ferroviarie;
- The Fluid Library che consente la modellazione di processi di stoccaggio e
 trasferimento fluidi. Gli elementi a disposizione consentono la rappresentazione di
 serbatoi, condotte, valvole e oggetti per instradamento. Questa offre l'opportunità di
 utilizzare AnyLogic anche per la progettazione di sistemi per il settore
 manifatturiero e petrolifero, del gas e minerario;
- The Road Traffic Library che consente di simulare il traffico urbano consentendo una modellazione dettagliata del veicolo. Ogni veicolo rappresenta un agente dotato di un comportamento e si muove all'interno di una rete stradale che tiene conto delle regole di guida come semafori, attraversamenti pedonali, movimenti dei mezzi pubblici;
- The Material Handling Library che consente una modellazione di processi all'interno di fabbriche e magazzini. Dispone di elementi quali nastri trasportatori e carrelli per la movimentazione.

Un altro potente strumento messo a disposizione da AnyLogic e che è stato ampiamente utilizzato per il progetto andrò successivamente ad analizzare, sono le mappe. Come già detto in precedenza AnyLogic supporta le mappe di provider gratuiti come OpenStreetMap, vengono utilizzate soprattutto per la modellazione di percorsi geo spaziali per agenti.

CAPITOLO 4: LA CREAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE

4.1 Analisi del modello

Il modello ci permetterà di visualizzare i due e-Truck differenti per carico muoversi sulla mappa dell'Italia, raggiungere le città che rappresentano l'obiettivo, il punto di arrivo del truck, nel loro percorso fermarsi nelle stazioni preposte per effettuare un Battery Swap per completare la loro missione.

Nella modellazione sono stati assunti due punti di vista differenti, del veicolo e della batteria.

Punto di vista dell'e-Truck → La missione è stata analizzata e strutturata dal punto di vista dell'e-Truck. All'avvio del programma, ad ogni veicolo viene associata una batteria attraverso comandi dati con codice sorgente. L'e-Truck sceglie una città casualmente come destinazione e per raggiungerla segue il percorso tracciato sulla mappa. Se l'autonomia della batteria non basta per raggiungere la città scelta, l'e-Truck si fermerà ad una stazione di ricarica quando la batteria arriva ad una percentuale di carica inferiore ad una baseline. Una volta giunto a destinazione, partirà per una nuova missione e ogni qual volta il

guidatore vedrà che la batteria è scarica, si fermerà nella stazione più vicina per effettuare il Battery Swap.

Punto di vista della batteria → All'interno del modello avremo due categorie di batterie: batterie che sono all'interno del magazzino e batterie che sono montate sul veicolo. Le batterie che sono nel magazzino possono essere cariche, scariche o in fase di carica. All'inizio tutti i magazzini avranno solo batterie cariche che durante la simulazione verranno utilizzate per i veicoli che necessitano di un Battery Swap. Alla fine della simulazione i magazzini avranno un maggior numero di batterie scariche, a causa delle sostituzioni effettuate, rispetto a quelle cariche.

4.2 Scelte progettuali per la realizzazione delle stazioni e la decisione delle città di partenza

Il primo passo effettuato per la realizzazione del modello è stato lo studio della rete autostradale e il posizionamento delle Battery Swap Station.

Sono state scelte 14 città dalle quali gli e-Truck partiranno per svolgere la loro missione e in prossimità di queste sono state posizionate le Battery Swap Station, quindi avremo 14 città e 14 stazioni. Mentre per l'individuazione della città sono state ricavate le coordinate di latitudine e longitudine del centro della città in maniera rappresentativa, considerando che l'e-Truck dovesse svolgere una missione al centro della città stessa, per le stazioni sono state analizzate le aree geografiche in prossimità della città. La posizione della stazione è stata scelta in modo da avere a disposizione uno spazio ampio che possa ospitare due postazioni di scambio per entrambi gli e-Truck. Tale area è stata scelta anche considerando che la distanza dalla città non fosse troppo elevata in quanto una stazione di Battery Swap necessità di una rete elettrica per ricaricare le batterie scariche, possibilmente nell'orario notturno, che durante la giornata si accumulano. Di seguito l'elenco delle città scelte da cui gli e-Truck partono e le rispettive Battery Swap Station nella periferia della città stessa. Il posizionamento delle stazioni è stato studiato in modo tale che l'e-Truck percorrerà un chilometraggio leggermente inferiore alla sua autonomia, questo perché la scarica della batteria non è dettata solo dai chilometri percorsi ma è influenzata anche da altri fattori come ad esempio le condizioni climatiche che potrebbero portare lo stesso a raggiungere il livello soglia prima del previsto.

Quello che è stato preso in considerazione è quindi il caso più gravoso.

Città	Latitudine	Longitudine
Torino	45.086579	7.679268
Piacenza	45.052619	9.70204
Bologna	44.504342	11.345647
Arezzo	43.464224	11.875775
Roma	41.901553	12.559343
Caserta	41.076666	14.341778
Salerno	40.676653	14.784073
Cosenza	39.342071	16.251965
Reggio Calabria	38.093376	15.654293
Pesaro e Urbino	43.79707	12.856384
Pescara	42.459276	14.212477
Foggia	41.456402	15.551179
Bari	41.108963	16.868805
Lecce	40.355177	18.174638

Stazione	Latitudine	Longitudine
Fermata BOSSO,10024,	45.009634	7.671783
Moncalieri (TO)		
Autogrill Trebbia Nord (PC)	45.062254	9.65213
Eni Station, via nuova	44.491902	11.261236
Bassanese (BO)		
Autogrill Loc. Battifolle,	43.454038 Tabella 1: Le città	11.808646
SS679 (AR)	Tuvena 1. Le cma	
Via Tiberina, 00065 Fiano	42.166471	12.588065
Romano (RM)		
Eni Station, 81059 Vairano	41.312642	14.109279
Pantenora (CE)		
Butan Gas, via Annia 33 (SA)	40.510741	15.515066
Enel X, Stazione di ricarica,	39.305556	16.242112

Via dell'accoglienza 66 (CS)		
Dist.Carburanti IP Matic, Via	38.133226	15.656521
Nazionale 89122 (RC)		
Parcheggio Casello Marotta-	43.760198	13.136818
Mandolfo (PU)		
Martina gas SRL,	42.518648	14.134201
Str.Lungofino 4 (PE)		
Vs Carburanti Gas-Benzina-	41.690776	15.398744
Diesel SS272 (FG)		
Suditalia Gas, Viale Europa	41.123831	16.829017
18/b, 70132 (BA)		
Esso, Accesso Superstrada	40.374631	18.215787
Le/Br, 73100 (LE)		

Quando si vuole realizzare un modello in AnyLogic, la prima scelta da fare è la base temporale: per questo modello è stato scelto come unità di tempo l'ora piuttosto che i minuti o i secondi. Questo perché se l'e-Truck non facesse nessuna fermata presso le Battery Swap Station, impiegherebbe comunque più di dieci ore ad andare da Torino, che è la città più a Nord, fino a Reggio Calabria, che è la città più a Sud. Se fosse stato scelto il minuto come unità di tempo, la simulazione sarebbe stata troppo lenta da osservare Tabella 2: Le stazioni considerando che un e-Truck quando

ha percorso la propria missione parte

immediatamente per una successiva. L'ora è quindi l'unità di tempo più adeguata in questo modello.

Nello step successivo è stato creato l'ambiente di simulazione tramite la GIS Map che consente agli utenti di importare il sistema informativo geografico nelle presentazioni. Una volta importata la mappa è possibile gestirne la visualizzazione: nel caso analizzato la mappa è stata zoomata e dimensionata in modo da osservare la penisola italiana.

Definito l'ambiente di simulazione, si creano gli agenti che ne fanno parte, che sono i protagonisti della simulazione.

Come già spiegato nel capitolo precedente, il programma viene visto come un insieme di oggetti che interagiscono tra loro. Ogni oggetto appartiene ad una classe. Sono state quindi definite le classi di cui gli oggetti fanno parte. Ciò che in Java rappresenta la classe, in AnyLogic è rappresentato dall'Agent Type.

Agent Type

Trascinando dalla palette nell'ambiente di lavoro l'Agent Type, possiamo creare un nuovo tipo di Agente.

Un agente può essere rappresentativo di una popolazione o di un singolo, di un'idea o di un progetto. Nell'agente stesso possono essere definite variabili, parametri, funzioni, eventi, diagrammi a blocchi o diagrammi di flusso.

Gli agenti creati nel nostro modello sono:

- Città
- Stazioni
- Veicoli con carico da 8t
- Veicoli con carico da 26t
- Batteria per veicolo da 8t
- Batteria per veicolo da 26t

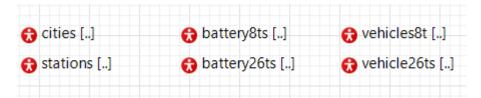


Figura 33: Gli Agenti creati

Tutti sono stati creati come una popolazione in quanto comprendono all'interno una serie di oggetti.

Se per le città e le stazioni sappiamo la loro numerosità ed è fissa perché sono state stabilite precedentemente quante e dove posizionarle, le batterie e i veicoli hanno un numero variabile di oggetti che verranno stabiliti a seconda della simulazione che verrà fatta.

Dopo aver creato due differenti Agent Type per stazioni e città, è stato semplice andare a posizionarle sulla mappa.

È stato creato un foglio Excel che riporta l'elenco delle città e delle stazioni e le rispettive coordinate di latitudine e longitudine, come visto nelle Tabelle 1 e 2.

Per ognuna di esse è stato definito il parametro latitudine e longitudine che ha consentito la geolocalizzazione in maniera univoca.

Città e Stazioni sono state poi inserite all'interno della rete autostradale che i veicoli devono percorrere. È stata creata la rete autostradale, che attraversa le Città e Stazioni, che l'e-Truck può percorrere supponendo che sia l'unica elettrificata sul territorio nazionale. Il percorso è stato disegnato da punto a punto in modo che attraversasse tutte le città, successivamente da ogni città è stato disegnato il percorso che permette all'e-Truck di arrivare alla stazione della corrispondente città.

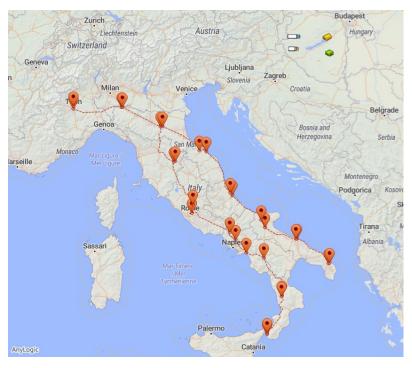


Figura 34: Ambiente di simulazione

4.3 Modellazione dell'e-Truck con carico da 8t

Stabilito le destinazioni dei veicoli, le stazioni dove è possibile effettuare lo scambio e il percorso per muoversi tra queste, sono stati modellati i veicoli.

Il primo veicolo in esame è l'e-Truck con carico di 8t. Come fatto precedentemente per stazioni e città, tramite l'Agent Type è stata creata la popolazione di veicoli. In questo caso la totalità della popolazione di veicoli è data dalla somma delle popolazioni di veicoli che dipartono da una stessa città. È stato possibile ampliare il foglio Excel precedentemente inserito con una colonna che definisce il numero dei veicoli che partono da una stessa città.

	città	latitudine_c	longitudine_c	stazioni_di_battery_swap	latitudine_s	longitudine_s	num_vehicle_8t
	-	-	-	•	-	-	-
1	Torino	45.087	7.679	Fermata BOSSO,10024,Moncalieri	45.01	7.672	15
2	Piacenza	45.053	9.702	Autogrill Trebbia Nord	45.062	9.652	3
3	Bologna	44.504	11.346	Eni Station, via nuova Bazzanese	44.492	11.261	9
4	Arezzo	43.464	11.876	Autogrill Loc.Battifolle, SS 679	43.454	11.809	31
5	Roma	41.902	12.559	Via Tiberina,00065 Fiano Romano	42.166	12.588	20
6	Caserta	41.077	14.342	Eni Station,81059 Vairano Pantenora	41.313	14.109	8
7	Salerno	40.677	14.784	Butan Gas, via Annia 33	40.511	15.515	17
8	Cosenza	39.342	16.252	Enel X, Stazione di ricarica,Via dell'accoglienza 66	39.306	16.242	6
9	Reggio Calabria	38.093	15.654	Dist.Carburanti IP Matic,Via Nazionale 89122	38.133	15.657	9
10	Pesaro e Urbino	43.797	12.856	Parcheggio casello Marotta-Mandolfo	43.76	13.137	19
11	Pescara	42.459	14.212	Martina gas Srl,Str.Lungofino 4	42.519	14.134	23
12	Foggia	41.456	15.551	Vs Carburanti Gas-Benzina-Diesel SS272	41.691	15.399	23
13	Bari	41.109	16.869	Suditalia Gas, Viale Europa 18/b, 70132	41.124	16.829	0
14	Lecce	40.355	18.175	Esso,Accesso Superstrada Le/Br,73100	40.375	18.216	3

Figura 35: Database

In questo modo possiamo stabilire noi volta per volta questo valore a seconda della simulazione che si vuole fare, quindi dall'output che si vuole ottenere. È possibile, ad esempio, stabilire che da Torino partiranno 15 veicoli semplicemente inserendo 15 nella casella avente come colonna il numero dei veicoli e come città Torino. Allo stesso modo è possibile stabilire che da Torino non parta nessun veicolo andando ad inserire 0 nella casella avente per colonna il numero dei veicoli e per riga la città di Torino e così via.



Figura 36:

Per entrambi i veicoli è stata definita apriori una velocità di percorrenza su strada di 90km/h.

Oltre agli attributi e metodi della classe che si generano automaticamente al momento della creazione della stessa, ne sono stati creati altri. Gli attributi si differenziano per tipo di dato a cui si riferiscono. Possono riferirsi ad un tipo di dato intero, decimale, booleano, oppure possono riferirsi ad un tipo di dato di una determinata classe. In questo caso avremo l'attributo di tipo Stazione, Città, Veicolo e Batteria.

Gli attributi corrispondono in AnyLogic ad i *Parameter:*

- *destination_station*, parametro di tipo Station, all'interno del quale viene salvata minuto per minuto la stazione più vicina al veicolo durante la marcia su strada;
- *destination_city*, parametro di tipo City all'interno del quale viene salvata la città di destinazione del veicolo una volta scelta in maniera randomica prima della partenza;
- *battery_8t*, parametro di tipo Battery8t all'interno del quale viene salvata la batteria che viene montata sul veicolo di volta in volta;
- *departure*, parametro di tipo double settato alla partenza del programma in maniera randomica per ogni veicolo. È stato utilizzato per fare in modo che ogni veicolo partisse ad un orario differente dalla città di partenza;
- *start*, parametro booleano settato a *false* per ogni veicolo alla creazione. Quando l'e-Truck parte per la prima volta viene settato a *true*;

- v_arrival, parametro di tipo double all'interno del quale viene memorizzato il tempo di arrivo del veicolo alla destinazione;
- randomWait, parametro di tipo double all'interno del quale viene memorizzato il tempo di fermo dell'e-Truck nella città, a seconda dei tempi di scarico e ricarico merci.

I metodi corrispondono in AnyLogic alle function:

waiting8t

Funzione richiamata nel momento in cui l'e-Truck arriva in stazione per lo scambio, vengono settati una serie di parametri al fine di impedire lo scaricarsi della batteria. L'e-Truck attende in coda il proprio turno per effettuare un Battery Swap.

```
this.battery_8t.set_start_moving(false);
this.battery_8t.set_startFlow(0);
```

Figura 37: Codice sorgente che permette al veicolo di fermarsi e alla batteria di interrompere il processo di scarica

Per l'e-Truck sono stati inoltre creati due eventi. L'evento è il modo più semplice per programmare un'azione, sono generalmente usati per modellare ritardi e time-out. Il primo evento è servito a far partire i veicoli da una stessa città, a differenti orari in modo che il modello sia pertinente con la realtà.

All'avvio della simulazione, l'evento ciclico *set_departure* permette la partenza dei veicoli a seconda del loro valore randomico del parametro *departure*. A tal proposito sono state dichiarate due variabili, *lim_sup* e *lim_inf*, inizializzate rispettivamente a 0 e 1 e vengono incrementate di un punto ad ogni ripetizione.

Per ogni e-Truck della simulazione, l'evento verifica se il parametro *departure* sia compreso tra i due limiti.

In caso affermativo, all'e-Truck in esame viene inviato un messaggio, "start!", che ne permette l'avvio. Successivamente viene settato il parametro della sua batteria start_moving per indicare che l'e-Truck è in marcia e la batteria è in funzione, quindi inizia il processo di scarica secondo la legge stabilita all'interno della stessa.

I veicoli che non partono rimangono fermi, i limiti vengono incrementati e alla successiva lettura del codice altri veicoli potranno partire. Così fino a quando tutti gli e-Truck non sono partiti. Per tutti gli e-Truck partiti viene settato il parametro *start* a *true*, in modo tale che nel momento in cui tutti i veicoli sono partiti per la prima volta, il ciclo non riparte e l'evento non si ripete.

```
//evento che genera la partenza del camion in maniera randomica

for (Vehicle8t v_8 : main.vehicles8t){

   if(this.departure < lim_sup && this.departure > lim_inf && start==false){
      this.battery_8t.set_start_moving(true);
      set_start(true);
      send("start!",this);
   }
}
lim_sup++;
lim_inf++;
```

Figura 38: Evento che permette agli e-Truck di partire ad orari differenti

Un secondo evento *getNearestStation* permette di memorizzare all'interno del parametro *destination_station* ogni minuto la stazione più vicina alla posizione dell'e-Truck in movimento, in modo tale che nel momento percepisce che la sua batteria è scarica (livello di SOC inferiore al 30%), si reca presso questa attraverso la funzione *moveTo(destination station)*.

Per la modellazione della movimentazione dell'e-Truck sulla rete autostradale è stato scelto il sistema di modellazione Agent Based.

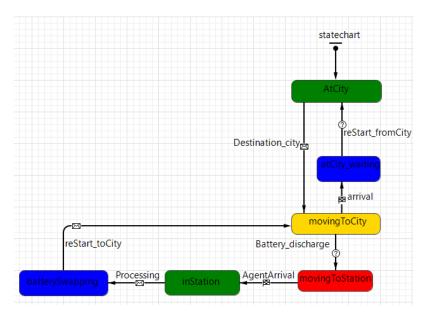


Figura 39: Statechart rappresentativo della movimentazione dell'e-Truck

Lo statechart è formato da stati e transizioni. I primi indicano propriamente lo stato in cui l'e-Truck viene a trovarsi nel tempo, le transizioni indicano ciò che deve avvenire affinché questo passi da uno stato al successivo.

Ciò che è necessario fare prima dell'avvio del programma, è legare la batteria all'e-Truck tramite codice sorgente.

```
On startup:

// genera e associa una batteria per ogni camion;
Battery8t b = main.add_battery8ts(false, this, 33.78, 1, 17.0, 0, null, false);
set_battery_8t(b);

//settaggio valore associato per la partenza del veicolo
set_departure(uniform(1,25));
```

Figura 40: Codice sorgente all'avvio del programma che associa ad ogni e-Truck una batteria

Vengono riportate le descrizioni di stati e transizioni in ordine:

AtCity → Stato rappresentativo dell'e-Truck fermo nella città di partenza;

Destination_city → La transizione è attivata dal messaggio "start!" che arriva all'e-Truck ad un tempo ben preciso a seconda del valore del parametro departure settato casualmente all'avvio della simulazione. All'arrivo del messaggio, la transizione viene attivata, l'e-

Truck sceglie in maniera casuale una città come obiettivo della sua missione e comincia a muoversi in autostrada per raggiungerla;

```
Message: "start!"

// scelta della destinazione
City x = main.cities.random();
moveTo(x);
set_destination_city(x);
```

Figura 41: Codice sorgente nella transizione Destination_city che permette ad ogni e-Truck di scegliere una destinazione e iniziare il viaggio verso la stessa

movingToCity → Stato rappresentativo dell'e-Truck in marcia verso la città obiettivo scelta nella transizione precedente;

Battery_discharge → Transizione attivata dalla condizione sulla SOC (stato di carica) della batteria dell'e-Truck. Nello specifico, quando la SOC < 30%, l'e-Truck si muove verso la stazione memorizzata all'interno del parametro destination_station, che è la più vicina;

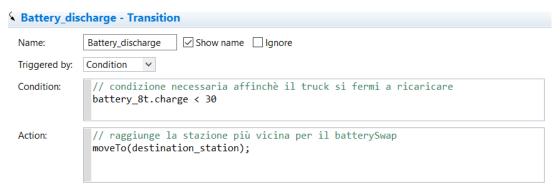


Figura 42: Codice sorgente all'interno della transizione Battery_discharge che permette ad ogni e-Truck scarico di raggiungere la Battery Swap Station più vicina

movingToStation → Stato rappresentativo dell'e-Truck in movimento verso la stazione di Battery Swap;

AgentArrival → Transizione attivata dall'arrivo in stazione dell'e-Truck, viene richiamata la funzione waiting8() che interrompe il processo di scarica della batteria e la movimentazione dello stesso;

inStation → Stato rappresentativo dell'e-Truck in attesa di entrare nell'area di scambio;

Processing → Transizione che si attiva quando il numero di e-Truck in coda per il Battery Swap è inferiore al numero di batterie disponibili (SOC > 89%) nella stazione. Quando ciò accade, la stazione prende in carico l'e-Truck, altrimenti questo aspetta che una nuova batteria sia disponibile;

batterySwapping → Stato rappresentativo dell'e-Truck all'interno della stazione;

```
Entry action: //la stazione prendere in carico il veicolo destination_station.enter_8t.take(this);
```

Figura 43: Codice sorgente che permette ad ogni Battery Swap Station di prendere in carico l'e-Truck che arriva per uno scambio

reStart_toCity → La transizione viene attivata quando viene completata l'azione di Battery Swap e la stazione invia all'e-Truck un messaggio che notifica il completamento dello scambio e a sua volta l'e-Truck invia lo stesso messaggio alla batteria ad esso collegata. Immediatamente dopo, l'e-Truck riparte per la destinazione precedentemente scelta;

```
Message: "swapDone_8t"

//il veicolo riprende la marcia moveTo(destination_city); send("swapDone_8t!",this.battery_8t);
```

Figura 44: Codice sorgente all'interno della transizione reStart_toCity che permette al veicolo di riprendere la marcia dopo lo scambio

movingToCity → La transizione permette il passaggio dallo stato batterySwapping al movingToCity, che fa ricominciare il ciclo chiuso fin quando non viene attivata la transizione arrival;

arrival → La transizione viene attivata quando l'e-Truck arriva nella città scelta;

atCity_waiting → Stato rappresentativo dell e-Truck nella città che aspetta di partire per una nuova destinazione. Ogni veicolo ha un tempo di attesa prima di ripartire variabile, stabilito dal parametro randomWait.

reStart_fromCity → Transizione attivata dopo che è trascorso il lasso di tempo specificato all'interno del parametro randomWait. Il parametro viene risettato allo stesso modo alla ripartenza dell'e-Truck, il suo valore indicherà il tempo di attesa dell'e-Truck alla prossima destinazione. L'e-Truck riparte e lo statechart si ripete.

Figura 45: Codice sorgente all'interno della transizione reStart_fromCity che permette al veicolo di ripartire dopo il tempo di scarico e ricarico merci

4.4 Modellazione della Batteria per l'e-Truck da 8t

Come già fatto per stazioni, città e veicoli, è stata creata la popolazione di batterie tramite l'Agent Type. La totalità delle batterie presenti del modello è data dalla somma delle batterie per ogni singola stazione e dalle singole batterie che sono sul veicolo (ovviamente una per veicolo). È stato possibile ampliare nuovamente il foglio Excel che costituisce il nostro Database e aggiungere una colonna che definisce il numero delle batterie che sono all'interno del magazzino delle stazioni. Per associare le batterie ai magazzini, riempire il database non basta. Per questo motivo, nella *Main page* ovvero la pagina principale dove vengono definiti tutti gli agenti della simulazione, vengono creati due metodi per le due

diverse batterie (8t e 26t) richiamati all'avvio del modello per collegare in maniera biunivoca batterie e stazioni.

fillingRack8t()

Questo metodo per ogni batteria da magazzino (il parametro *inRack_8* è true) ricerca la stazione con parametri di latitudine e longitudine corrispondenti. Quando la stazione viene individuata, viene associata alla batteria tramite il parametro *s_associate_8t* e la batteria stessa viene inserita all'interno della collezione *collection_battery8t* della stazione. Finito questo processo, viene settato il parametro *disp_8t*.

```
for (Battery8t b8 : battery8ts){
    if(b8.inRack_8 == true){
        for (Station s8 : stations){
            if(s8.getLatitude()==b8.getLatitude() && s8.getLongitude()==b8.getLongitude()){
                 b8.set_s_associate_8t(s8);
                 s8.collection_battery8t.add(b8);

                 break;

            }
        }
    }
}

for (Station s8 : stations){
    s8.set_disp_8t(s8.collection_battery8t.size());
    }
}
```

Figura 46: Codice sorgente all'avvio del programma che associa le batterie e stazioni

Name:	battery8ts Show name				
☐ Ignore					
○ Single agent ● Population of agents					
Population is:	O Initially empty				
	Ocontains a given number of agents				
	Load	led from datab	ase		
Table:	foglio1 V				
	Choice conditions:				
	↑ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □				
Mode:	One agent per database record				
	 Multiple agents per record 				
Quantity is contained in column: battery_8t v					
Agent parameters mapping:					
Parameter		Column			
GIS location latitude		latitudine_s			
GIS location longitude		longitudine_s			

Figura 47: Inserimento delle batterie da Database nelle stazioni

Sono stati dichiarati attributi aggiuntivi alla classe:

- *vehicle_8t*, parametro di tipo Vehicles8t che consente di associare l'e-Truck alla batteria. Questo parametro è il duale di battery 8t;
- *inRack_8t*, parametro di tipo booleano. Come precedentemente specificato, le batterie possono essere associate o al magazzino o all'e-Truck. Il parametro assume valore *true* per le batterie all'interno del magazzino, *false* per le batterie all'interno dell'e-Truck;
- *s_associate_8t*, parametro di tipo Station, all'interno del quale viene memorizzata la stazione in cui la batteria viene posizionata;
- *start_moving*, parametro di tipo booleano. Il parametro assume il valore *true* per le batterie associate ad un e-Truck in movimento, *false* per le batterie associate ad un veicolo fermo oppure batterie ferme all'interno del magazzino;
- *chargeRate*, parametro di tipo aliquota oraria che indica la percentuale di ricarica oraria per le batterie all'interno del magazzino di ricarica. A questo parametro è stato associato il valore 17, ciò significa che la batteria si ricarica del 17% ogni ora;
- *dischargeRate*, parametro di tipo aliquota oraria che indica la percentuale di scarica oraria per le batterie sul veicolo. A questo parametro è stato associato il valore di 33,89, ciò significa che la batteria si scarica del 33,89% ogni ora;
- moving, parametro di tipo intero. Può assumere due valori, 0 o 1. Il progettista
 decide il settaggio di questi valori per avviare rispettivamente il processo di scarica
 o di carica della batteria, a seconda se la batteria si trova rispettivamente sul veicolo
 o all'interno del magazzino;
- *startFlow*, parametro di tipo intero. Può assumere due valori, 0 o 1. Il progettista decide il settaggio di questo valore per avviare il processo di carica/scarica quando la batteria si trova o all'interno del magazzino preposto alla ricarica oppure sul veicolo, oppure non avviare nessun processo nel caso in cui la batteria è semplicemente all'interno del magazzino e non è scarica, ma sta aspettando di essere utilizzata;
- *charge*, parametro di tipo double. Rappresenta lo stato di carica della batteria;
- discharge, parametro di tipo double. Rappresenta lo stato di scarica della batteria.

In questo caso sono stati utilizzati due approcci di modellazione differenti. Una modellazione Agent Based per la definizione della collocazione della batteria e una modellazione System Dynamics per il processo di carica e scarica della batteria.

Modello Agent Based

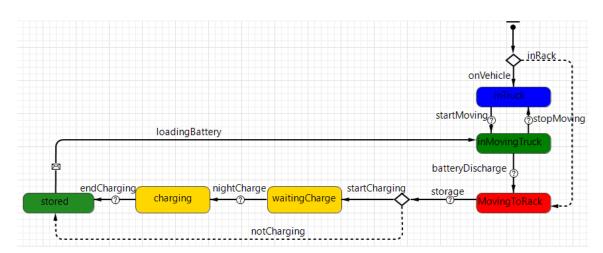


Figura 48: Statechart rappresentativo delle batterie

Si hanno un susseguirsi di stati e transizioni:

Statechart → Transizione iniziale dello statechart, all'interno della quale viene settato il parametro inRack 8 per il successivo blocco decisionale;

onVehicle → Transizione che viene attivata se inRack_8 è false, ovvero se la batteria si trova sull' e-Truck e non nel magazzino;

 $inTruck \rightarrow$ Stato rappresentativo della batteria montata sull'e-Truck fermo;

startMoving → Transizione attivata se il parametro start_moving è true, ciò indica che l'e-Truck è in movimento;

inMovingTruck → Stato rappresentativo della batteria sull'e-Truck in movimento;

inRack → Transizione che viene attivata se inRack_8 è true, ovvero se la batteria si trova nel magazzino e non sull'e-Truck;

batteryDischarge → Transizione che viene attivata da una condizione, ovvero uno stato di carica inferiore a 30. In questo caso la batteria viene sganciata dall'e-Truck in quanto scarica, e il parametro che lega la batteria all'e-Truck viene settato a *null* per indicare che non c'è più un legame tra i due;

MovingToRack → Stato rappresentativo della batteria nel periodo in cui viene staccata dall'e-Truck per essere immagazzinata per la ricarica. In questo stato viene bloccato il processo di scarica;

storage → Quando la batteria è nel magazzino (inRack_8 settato a true) ed è fermo il processo di scarica (startFlow settato a 0), allora la transizione viene attivata;

startCharging → La batteria all'interno del magazzino può essere carica o scarica. Nel caso in cui il valore di carica è inferiore al 30% viene ricaricata. Questa transizione è attivata proprio da quest'ultima condizione;

waitingCharge → Questo stato è stato inserito per le simulazioni che prevedono una ricarica della batteria notturna. In questo caso, la batteria viene messa in uno stato d'attesa finché non viene attivata la transizione successiva a condizione temporale che fa iniziare la carica;

nightCharge → transizione che permette il passaggio della batteria allo stato di charging. Nella ricarica notturna, la batteria viene ricaricata dalle 21:00 alle 06:00 del giorno successivo;

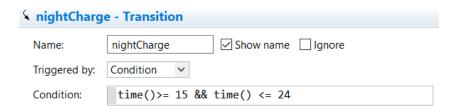


Figura 49: Codice sorgente nella transizione nightCharge che permette la ricarica notturna

Nel caso di simulazioni in cui le batterie vengono ricaricate immediatamente dopo lo scarico dal veicolo, la transizione *nightCharge* e lo stato *waitingCharge* sono eliminati in modo che lo *startCharging* sia direttamente collegato allo stato *charging*.

charging → Stato rappresentativo della batteria che all'interno del magazzino ha bisogno di essere ricaricata per essere utilizzata. In quest'ultimo vengono settati i parametri moving e startFlow in modo da avviare il processo di carica della batteria;

endCharging → Transizione che viene attivata per un valore di stato di carica della batteria superiore all'89%, ovvero quando la batteria ha ultimato il processo di carica;

notCharging → Transizione che viene attivata in caso la batteria ha un valore di carica superiore al 30% e non ha bisogno di essere ricaricata. In questo caso la batteria è immagazzinata nell'attesa di essere utilizzata;

stored → Stato rappresentativo dalla batteria all'interno del magazzino, carica, in attesa di essere utilizzata;

loadingBattery → Transizione che viene attivata dalla notifica "swapDone_8t!" nel momento in cui la batteria dal magazzino, viene prelevata e montata sull'e-Truck per essere utilizzata. Questa transizione collega lo stato rappresentativo della batteria all'interno del magazzino, stored, e lo stato rappresentativo della batteria montata sul veicolo in movimento, inMovingTruck.

Modello System Dynamics

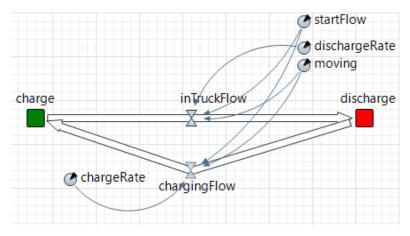


Figura 50: Flussi di carica e scarica della batteria

inTruckFlow → All'interno del blocco è stata inserita l'equazione che permette il flusso di scarica.

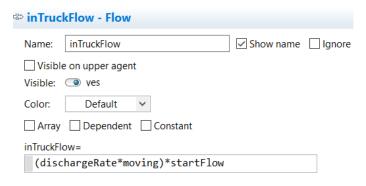


Figura 51: Equazione rappresentativa della scarica della batteria

Quando la batteria è montata sull'e-Truck, *startFlow* e *moving* sono settati in modo tale (cioè con valore unitario) da dare il via al processo di scarica. La scarica oraria della batteria è legata al valore del *dischargeRate*. In questo caso ogni ora la batteria si scarica del 33,89%. Questo valore è stato calcolato impostando una serie di parametri:

- Percorrenza del tratto autostradale di 90km/h;
- L'e-Truck inizia il viaggio con una carica del 90% e viene considerato scarico quando la SOC raggiunge un valore del 25%;
- Il tempo che l'e-Truck impiega a passare dal 90% al 25% è di due ore, tempo che l'e-Truck impiega a percorrere 200km (autonomia massima).

chargingFlow → Flusso di ricarica. L'equazione inserita è rappresentativa di questo processo.

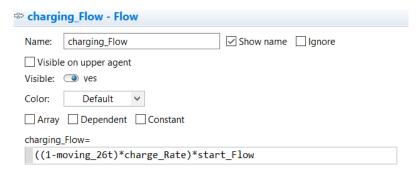


Figura 52: Equazione rappresentativa del processo di carica della batteria

Anche in questo caso il settaggio dei parametri moving e startFlow permette al processo di ricarica di iniziare e il processo stesso è legato al valore di chargeRate. La batteria si ricarica del 17% ogni ora.

4.5 Modellazione dell'e-Truck con carico da 26t e della sua batteria

Per la modellazione della marcia su strada dell'e-Truck 26t non verrà riportata una descrizione nel dettaglio come precedentemente fatto per l'e-Truck 8t in quanto le due logiche sono identiche. Tra i due modelli è possibile individuare solamente due differenze.

La prima è stata l'utilizzo di un di un parametro aggiuntivo denominato *anxiety* che rappresenta l'ansietà del guidatore. Mentre l'e-Truck 8t è obbligato a fermarsi in tutte le Battery Swap Station che incontra nel suo percorso perché queste sono posizionate ad una distanza pari alla sua autonomia, l'e-Truck 26t può scegliere se fermarsi ad ogni stazione oppure no. Il parametro di ansietà del guidatore va a stabilire ciò. Questo può assumere due valori:

- *true*, in questo caso il guidatore è ansioso e si ferma in ogni Battery Swap Station che incontra già con una SOC<50%;
- *false*, il guidatore non è particolarmente ansioso e si ferma nella Battery Swap Station solo quando la SOC<30%.

La seconda differenza risiede nella scarica oraria della batteria legata al parametro *dischargeRate*. In questo caso ogni ora la batteria si scarica del 16,84%. Questo valore è stato calcolato impostando una serie di parametri:

- Percorrenza del tratto autostradale di 90km/h;
- L'e-Truck inizia il viaggio con una carica del 90% e viene considerato scarico quando la SOC raggiunge un valore del 25%;
- Il tempo che l'e-Truck impiega a passare dal 90% al 25% è di quattro ore, tempo che l'e-Truck impiega a percorrere 400/500km (autonomia massima).

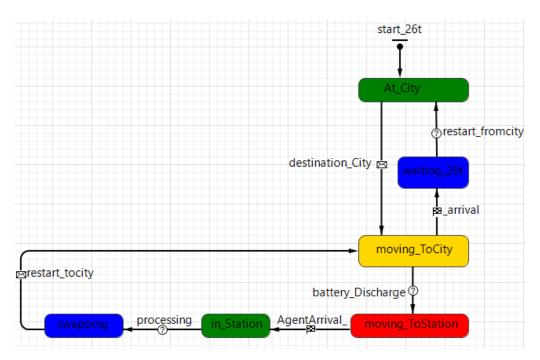


Figura 53: Statechart rappresentativo della movimentazione dell'e-Truck 26t

Se la transizione *battery_Discharge* per l'e-Truck da 8t veniva attivata da un'unica condizione, ovvero quando la SOC<30%, in questo caso può essere attivata da due condizioni:

- SOC<30% e anxiety pari a false;
- SOC<50% e *anxiety* pari a *true*.

Anche per lo statechart della batteria dell'e-Truck da 26t si ha una logica identica alla batteria dell'e-Truck da 8t.

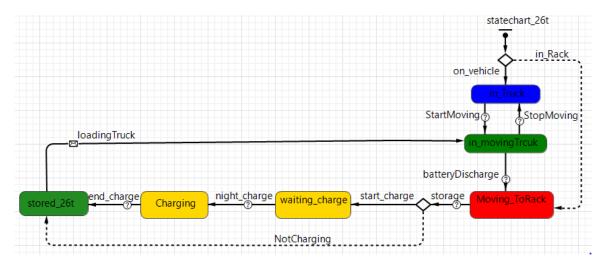


Figura 54: Statechart rappresentativo delle batterie per e-Truck 26t

L'unica differenza è nella condizione dell'attivazione della transizione *batteryDischarge*. In questo caso la transizione viene attivata se:

- La SOC < 30% e il parametro *anxiety* è *false*;
- La SOC < 50% e il parametro *anxiety* è *true*.

4.6 Modellazione delle Battery Swap Station

Per ogni stazione sono stati creati due parametri aggiuntivi:

- collection_battery8t, collezione di batterie inizialmente vuota e riempita all'avvio del programma tramite codice sorgente. Al termine dell'esecuzione del codice avremo che ogni stazione avrà una collection di batterie corrispondente a quelle che sono state inserite tramite Database. Tale collection non è uguale a sé stessa durante il programma: nel momento in cui l'e-Truck effettua un Battery Swap presso una stazione di servizio, una batteria carica viene rimossa dalla collection di quella stazione e sostituita dalla batteria scarica. In questo modo ogni collection avrà sempre lo stesso numero di batterie;
- *disp_8t*, parametro che identifica il numero di batterie all'interno della *collection* con una SOC>89. Quando una batteria viene prelevata dal magazzino per essere caricata sul veicolo, il parametro viene decrementato (*disp_8t--*). Quando una batteria termina il processo di carica all'interno del magazzino, il parametro viene incrementato (*disp_8t++*).

Per il processo di Battery Swap all'interno della stazione è stato utilizzato un modello Discret Event.

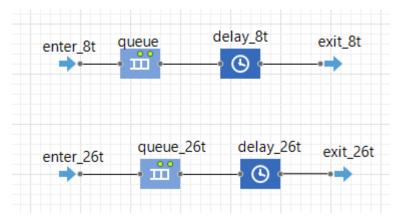


Figura 55: Flowchart rappresentativo del processo di scambio nella Battery Swap Station

enter_ $8t \rightarrow 11$ blocco enter_8t viene richiamato quando l'e-Truck entra nello stato batterySwapping tramite codice sorgente. In questo modo, l'e-Truck viene preso in carico dalla stazione entrando all'interno del flowchart;

 $seize_8t \rightarrow$ Il blocco è rappresentativo di una fila di agenti che attendono le risorse, in questo caso e-Truck che attendono il cambio batteria;

 $delay_8t \rightarrow all'interno del blocco viene realizzato lo scambio batteria. Tramite codice sorgente vengono settati parametri al fine di effettuare correttamente lo scambio;$

```
On enter:
               //associo alla batteria le nuove coordinate di latitudine e longitudine
               agent.battery_8t.setLatLon(this.getLatitude(), this.getLongitude());
               agent.battery_8t.set_s_associate_8t(this);
               //posiziono la batteria nel magazzino
               this.collection battery8t.add(agent.battery 8t);
               agent.battery_8t.set_inRack_8(true);
               agent.battery_8t.set_vehicle_8t(null);
               agent.set_battery_8t(null);
               //carico una nuova batteria
               for (Battery8t b : collection_battery8t){
                   if (b.charge >= 89){
                       agent.set_battery_8t(b);
                       this.collection_battery8t.remove(b);
                       this.disp_8t--;
                       b.set s associate 8t(null);
                       b.set_inRack_8(false);
                       b.set_vehicle_8t(agent);
                       break;
                                                                                     >
```

Figura 56: Codice sorgente all'interno del blocco delay 8t che permette lo scambio della batteria sull'e-Truck 8t

Alla batteria sul e-Truck vengono associate le coordinate di latitudine e longitudine della stazione e la stazione in cui si è fermato. La batteria viene inserita nella *collection* di batterie della stazione e vengono settati i parametri che definiscono la batteria appartenente al magazzino. Successivamente viene scelta la prima batteria carica del magazzino, prelevata e montata sull'e-Truck.

 $exit_8t \rightarrow L$ 'e-Truck passa nel blocco d'uscita una volta completata l'operazione di Battery Swap. Il blocco invia all'agente in questione un messaggio per attestare l'effettivo completamento del cambio batteria. Tale messaggio attiva la transizione dello statechart

reStart toCity e l'e-Truck ricomincia la marcia verso la città obiettivo.

Le stesse considerazioni sono state fatte per gli e-Truck 26t.

CAPITOLO 5: SIMULAZIONI EFFETTUATE

5.1 Assunzioni di simulazione

Per la validazione del modello creato, sono state eseguite delle simulazioni al fine di osservare il comportamento di un veicolo scelto. Per quest'ultimo sono stati osservati i tempi di attesa in stazione per il Battery Swap e la durata del viaggio a seconda del traffico.

I dati relativi al traffico sono stati acquisiti dall'Anas grazie alla rete di sensori del sistema PANAMA ed è stato calcolato il TGMA (Traffico Giornaliero Medio Annuo) sulla base dei dati raccolti dalle singole postazioni. Il TGMA viene calcolato come media aritmetica del traffico misurato nelle giornate valide, una giornata è considerata tale se la centralina non manifesta malfunzionamenti e se sul sistema sono caricati i dati per almeno il 98% dei 288 intervalli da 5 minuti previsti in una giornata. I TGMA acquisiti fanno riferimento all'anno 2019, ultimo anno significativo di ritmi di vita normali.

Per ogni postazione, sono specificati i giorni significativi di acquisizione dati, il numero di veicoli LD e HD che in media annuale attraversano quel tratto autostradale.

Per ogni città è stato acquisito il dato relativo agli HD, nel caso in cui più sensori appartenessero alla stessa città è stato acquisito il valore più elevato tra tutti.

Successivamente all'acquisizione dati sono state necessarie le ipotesi:

- Da ogni città partono un numero di veicoli pari alla metà del dato acquisito, in quanto la misura del sensore è bidirezionale;
- Per consentire una modellazione supportabile dai sistemi posseduti, il traffico è stato diminuito di una %;
- Il dato acquisito fa riferimento alla totalità dei veicoli HD. Nel caso analizzato sono stati considerati solamente i veicoli con un carico di 8t e 26t, ha stimato che nel 2019 sono stati immatricolati il 10,37% di veicoli commerciali da 8t e l'80,37% di veicoli commerciali da 26t. Pertanto, dal valore a monte è stato calcolato il dato dei veicoli d'interesse;
- Non conoscendo il flusso orario dei veicoli che partono da una stessa città, ad ogni veicolo è stato associato un orario casuale di partenza compreso tra le 6:00 e le 00:00;

Per ogni veicolo viene stabilito un tempo di attesa all'interno della destinazione scelta che corrisponderebbe ad un tempo di scarico delle merci trasportate e successivo ricarico. Per effettuare delle simulazioni con dati realistici, è stato effettuato un sondaggio nell'azienda Sitim Srl attualmente impegnata nei settori Automotive, Packaging e Lighting System. È stato dedotto che all'interno dell'azienda affluiscono differenti tipologie di veicoli commerciali che trasportano merci più o meno ingombranti. I veicoli con carico più basso trasportano buste per il packaging e hanno un tempo di fermo variabile dai 30 minuti ai 60

minuti. I veicoli con carico maggiore trasportano semilavorati plastici per l'assemblaggio e hanno un tempo di fermo variabile dai 90 minuti ai 150 minuti.

5.2 Simulazioni e-Truck 8t

In una prima fase simulativa è stato osservato il flusso di e-Truck da 8t. Come già detto nel paragrafo precedente, per consentire un corretto funzionamento del programma, i dati di traffico prelevati dall'Anas sono stati riadattati. Per questi veicoli è stato considerata una condizione di traffico standard corrispondente ad una diminuzione del 70% dei dati acquisiti.

Cità di partenza	Totale veicoli	Giorni dell'anno	Veicoli 8t
Torino	223	312	12
Piacenza	2488	356	129
Bologna	513	354	27
Arezzo	1395	329	72
Roma	1397	360	72
Caserta	944	360	49
Salerno	2622	227	136
Cosenza	340	332	18
Reggio Calabria	729	308	38
Pesaro e Urbino	228	300	12
Pescara	85	361	4
Foggia	226	356	12
Bari	1987	333	103
Lecce	1115	361	58

Tabella 3: Dati di traffico reali degli e-Truck 8t

Cità di partenza	Traftio standard 8t	Aumento del 20%
Torino	4	5
Piacenza	39	47
Bologna	8	10
Arezzo	22	26
Roma	22	26
Caserta	15	18
Salerno	41	49
Cosenza	5	6
Reggio Calabria	11	13
Pesaro e Urbino	4	5
Pescara	1	1
Foggia	4	5
Bari	31	37
Lecce	17	20

Tabella 4: Dati di traffico adattati per il modello di simulazione

Nella **prima simulazione** il modello è stato impostato nel seguente modo:

- Condizioni di traffico standard;
- Ogni stazione è stata dotata di un singolo magazzino (60 batterie);
- Ogni batteria scarica immagazzinata viene subito ricaricata, questo consente una maggiore disponibilità di batterie durante il giorno ed un'agevolazione del traffico nella stazione, diminuendo così i tempi d'attesa;
- La simulazione parte il 16/09/2020 alle 06:00 e termina il 18/09/2020 alle 05:00.

Nella Tabella 1 sono stati riportati i risultati della simulazione osservata per il primo veicolo che parte da Torino. L'e-Truck 8t avendo un'autonomia di 200km si fermerà ad ogni Battery Swap Station che incontra nel suo percorso. Considerando i tempi di attesa nelle stazioni per il Battery Swap e i tempi di scarico e ricarico all'interno città, l'e-Truck riesce a raggiungere quattro città diverse percorrendo 2838 km.

Città di partenza	Torino	Bologna	Pesaro e Urbino	Roma	Salerno
Orario di partenza	10:00	15:12	18:48	03:10	07:17
Data di partenza	16/09/2020	16/09/2020	16/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
Città di arrivo	Bologna	Pesaro e Urbino	Roma	Salerno	Bari
Orario di arrivo	14:38	17:51	02:11	17/09/2020	18/09/2020
Data di arrivo	16/09/2020	16/09/2020	17/09/2020	06:23	00:20
chilometraggio	354	202	547	275	1460
totale percorso	2838				

Tabella 5: Prima simulazione e-Truck 8t

Quello che si osserva è che andando ad effettuare una **seconda simulazione**, aumentando le condizioni di traffico del 20%, aumentano i tempi d'attesa nelle stazioni e questo fa diminuire il numero di città che l'e-Truck riesce a raggiungere e il chilometraggio fatto.

Cità di partenza	Torino	Salerno	Arezzo	Pesaro e Urbino	Pescara
Orario di partenza	10:00	02:13	11:11	18:00	21:07
Data di partenza	16/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
Città di arrivo	Salerno	Arezzo	Pesaro e Urbino	Pescara	Torino
Orario di arrivo	01:41	10:00	17:41	17/09/2020	18/09/2020
Data di arrivo	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	20:16	05:53
chilometraggio	1005	492	145	251	799
totale percorso	2692				

Tabella 6: Seconda simulazione e-Truck 8t

In questo caso l'e-Truck effettua circa 150 km in meno rispetto al caso precedente. Nella **terza simulazione**, il modello viene reimpostato nel modo seguente:

- Condizioni di traffico aumentate del 20% rispetto alla condizione standard;
- Ogni stazione è dotata di un singolo magazzino (60 batterie);
- Tutte le batterie scaricate nelle stazioni vengono ricaricate durante la notte, in modo da evitare un sovraccarico di richiesta al sistema energetico. La ricarica è stata programmata dalle ore 21:00 alle ore 06:00 del giorno seguente;
- La simulazione parte alle ore 06:00 del 16/09/2020 e termina alle ore 05:00 del 18/09/2020.

Cità di partenza	Torino	Cosenza
Orario di partenza	09:00	02:13
Data di partenza	16/09/2020	17/09/2020
Cità di arrivo	Cosenza	Lecce
Orario di arrivo	07:00	/
Data di arrivo	17/09/2020	/
chilometraggio	1266	/
totale percorso	1266	

Tabella 7: Terza Simulazione e-Truck 8t

Il questo caso la simulazione si interrompe prima che l'e-Truck raggiunga la città di destinazione. Il chilometraggio atteso è nettamente inferiore (circa 1000 km in meno) ai precedenti, questo perché le batterie cariche a disposizione vengono utilizzate tutte e l'e-Truck deve aspettare durante la notte il tempo di ricarica. Questa soluzione è la migliore dal punto di vista energetico ma necessita l'aggiunta di un altro magazzino al fine di incrementare le batterie disponibili durante il giorno e diminuire i tempi di attesa, permettendo al veicolo di raggiungere più città possibili.

Nell'**ultima simulazione** sono state mantenute le stesse condizioni di ricarica e di magazzino, decrementando il traffico fino alle condizioni standard. Anche in questo caso l'e-Truck non riesce a raggiungere la destinazione imposta ma il chilometraggio effettuato è superiore al caso precedente: un traffico più snello permette una diminuzione dei tempi di attesa nelle stazioni e una maggiore disponibilità delle batterie stesse. Anche in questa casistica la soluzione ottimale prevederebbe l'introduzione di un secondo magazzino per consentire al veicolo di coprire più commesse possibili.

Cità di partenza	Torino	Bari	Foggia	Bari	Lecce
Orario di partenza	10:00	07:39	09:51	13:41	16:35
Data di partenza	16/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020
Cità di arrivo	Bari	Foggia	Bari	Lecce	Arezzo
Orario di arrivo	06:49	09:08	12:42	15:35	/
Data di arrivo	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	17/09/2020	/
chilometraggio	1001	137	137	151	
totale percorso	1426				

Tabella 8: Quarta simulazione e-Truck 8t

5.3 Simulazioni e-truck 26t

Anche per l'e-Truck con carico 26t, è stata modellata e somulata la marcia su strada. I dati di traffico prelevati dall'Anas sono stati adattati al modello ed è stata considerata una condizione di traffico standard una riduzione del 90% del valore acquisito in quanto di base il traffico di questi veicoli è più elevato rispetto ai precedenti.

Cità di partenza	Totale veicoli	Giorni dell'anno	Veicoli 26t
Torino	223	312	89
Piacenza	2488	356	995
Bologna	513	354	205
Arezzo	1395	329	558
Roma	1397	360	559
Caserta	944	360	378
Salerno	2622	227	1049
Cosenza	340	332	136
Reggio Calabria	729	308	292
Pesaro e Urbino	228	300	91
Pescara	85	361	34
Foggia	226	356	90
Bari	1987	333	795
Lecce	1115	361	446

Tabella 9: Dati di traffico reale e-Truck 26t

Città di partenza	Traffio standard 26t	Aumento del 20%
Torino	9	11
Piacenza	100	120
Bologna	21	25
Arezzo	56	67
Roma	56	67
Caserta	38	46
Salerno	105	126
Cosenza	14	17
Reggio Calabria	29	35
Pesaro e Urbino	9	11
Pescara	3	4
Foggia	9	11
Bari	80	96
Lecce	45	54

Tabella 10: Dati di traffico adattati per il modello di simulazione

La **prima simulazione** viene impostata nel seguente modo:

- Condizioni di traffico standard;
- Ricarica delle batterie diurna, ovvero la ricarica della batteria comincia nel momento in cui questa viene posizionata all'interno del magazzino delle batterie esauste;
- Nella totalità degli e-Truck 26t, la metà dei guidatori sono ansiosi e ricaricano l'e-Truck già con una SOC<50%;
- Ogni stazione è dotata di un magazzino singolo di batterie cariche (60 batterie);
- La simulazione inizia alle 06:00 del 16/09/2020 e termina alle 05:00 del 18/09/2020.

A partire dalle condizioni di traffico standard, si osserva la marcia di un veicolo il cui **guidatore non è ansioso**. Avendo l'e-Truck un'autonomia maggiore del precedente veicolo, questo non sarà obbligato a fermarsi a tutte le stazioni che incontra nel suo tragitto. È possibile affermare che questo veicolo si fermerà per uno scambio ogni due stazioni.

Cità di partenza	Torino	Roma	Bari
Orario di partenza	07:00	21:02	14:13
Data di partenza	16/09/2020	16/09/2020	17/09/2020
Cità di arrivo	Roma	Bari	Piacenza
Orario di arrivo	18:43	12:14	01:45
Data di arrivo	16/09/2020	17/09/2020	18/09/2020
chilometraggio	730	1337	940
totale percorso	3007		

Tabella 11: Prima simulazione e-Truck 26t (non ansioso)

Se invece la stessa simulazione viene effettuata osservando un veicolo pilotato da un **guidatore ansioso**, il chilometraggio effettuato è inferiore rispetto al precedente. Questo perché l'e-Truck si fermerà a tutte le Battery Swap Station interposte tra questo e la destinazione, aumentano così tempi per l'attesa e lo scambio effettivo.

Città di partenza	Torino	Bologna	Arezzo	Lecce
Orario di partenza	10:00	17:46	22:15	09:32
Data di partenza	16/09/2020	16/09/2020	16/09/2020	16/09/2020
Città di arrivo	Bologna	Arezzo	Lecce	Bologna
Orario di arrivo	15:27	19:50	07:51	/
Data di arrivo	16/09/2020	16/09/2020	17/09/2020	/
chilometraggio	333	180	1271	/
totale percorso	1784			

Tabella 12: Prima simulazione e-Truck (ansioso)

Per l'e-Truck 26t non sono state effettuate tutte le simulazioni fatte per l'e-Truck da 8t in quanto si sarebbero ottenuti risultati simili. Le simulazioni fatte sono state utilizzate come strumento di validazione del modello realizzato, che è ciò che ha costituito il cuore del lavoro di tesi.

CAPITOLO 6: POSSIBILI SVILUPPI FUTURI E CONCLUSIONI

5.1 Organizzazione della Battery Swap Station

Per la Battery Swap Station viene proposta un'idea di progettazione dell'organizzazione potenzialmente sviluppabile in AnyLogic.

Lo schema è stato realizzato all'interno della pagina *Main*, tramite lo strumento *Wall*. È stata prima definita l'area (in blu) all'interno della quale poi sono state schematizzate le due stazioni per lo scambio delle due batterie (in arancione).

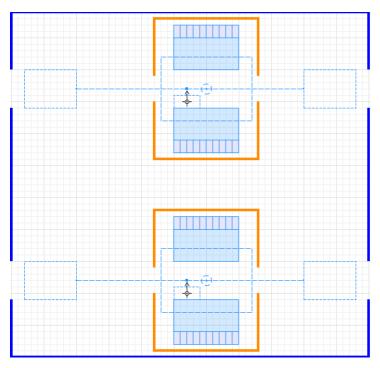


Figura 57: Schema della Battery Swap Station

I veicoli entrano all'interno dell'area e attendono il loro turno per il Battery Swap all'interno del rettangolo tratteggiato, creato tramite il *Rectangular Node*. Da quest'ultimo parte il percorso lungo il quale l'e-Truck si muove per entrare all'interno della stazione. Al momento del Battery Swap l'e-Truck si posiziona sul nodo centrale realizzato con il *Point Node*. Un AGV posizionato all'interno di un *Rectangular Node* in prossimità del veicolo, si muove si muove per effettuare il Battery Swap. Ai lati del veicolo, tramite la funzione *Pallet Rack*, sono stati realizzati due magazzini da 60 postazioni l'uno. Uno, completamente vuoto, è adibito all'immagazzinamento delle batterie scariche. Le batterie cariche, utilizzate per lo scambio, vengono organizzate all'interno del secondo magazzino. L'AGV in primis smonta la batteria scarica dal veicolo posizionandola all'interno della prima scaffalatura del magazzino delle batterie scariche. Solo successivamente preleva dalla prima scaffalatura del secondo magazzino, una batteria carica montandola sul veicolo. Quest'ultimo troverà sempre la scaffalatura più in basso vuota, in quanto le stesse vengono scambiate grazie al meccanismo all'interno del magazzino rotante.



Figura 58: Magazzino verticale rotante

Effettuato lo scambio, l'e-Truck si ferma all'interno dell'*Exit Node*, dove effettua il pagamento del noleggio della batteria per poi uscire dall'area e riprendere la sua marcia. Il modello che realizza ciò può essere strutturato tramite il diagramma a blocchi del Discret Event.

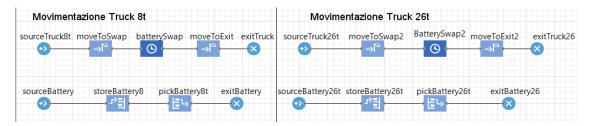


Figura 59: Flowchart rappresentativi di e-Truck e batterie nella modellazione della Battery Swap Station

sourceTruck8t → blocco che genera gli e-Truck da 8t posizionandoli all'interno del Rectangular Node;

moveToSwap → blocco che consente lo spostamento del veicolo all'interno della stazione;

batterySwap → blocco all'interno del quale è stato definito un ritardo di 5 minuti, tempo che l'e-Truck attende per il Battery Swap;

moveToExit → blocco che consente al veicolo lo spostamento verso l'area di uscita, una volta ricevuta la batteria carica;

exitTruck → blocco che permette l'eliminazione del veicolo dall'area di scambio;

sourceBattery → blocco che consente la creazione delle batterie d'interesse, in questo caso quelle per i veicoli da 8t, e l'immagazzinamento delle stesse all'interno del magazzino delle batterie cariche;

 $storeBattery8t \rightarrow blocco che permette l'immagazzinamento della batteria scarica da parte dell'AGV;$

pickBattery8t → blocco che consente all'AGV di prelevare la batteria carica dal magazzino e montarla all'interno del veicolo;
 exitBattery → blocco di chiusura;

5.2 Conclusioni

L'elaborato è stato focalizzato sulla realizzazione di un modello simulativo rappresentativo di una mobilità futura elettrificata, mobilità che potrebbe interessare prima i veicoli commerciali. Per questi, infatti, conoscere apriori le missioni compiute e l'immutabilità delle stesse, permette di raggiungere prima la standardizzazione delle batterie necessaria per un sistema di ricarica basata sul Battery Swap. Il Battery Swap permette di diminuire

drasticamente sia i tempi di ricarica che il costo del veicolo stesso e questi risultano essere i due principali punti critici dello sviluppo dei veicoli elettrici.

Il cuore del lavoro di tesi è stata la realizzazione di un modello atto a simulare il ciclo lavorativo di un ipotetico veicolo commerciale a batteria elettrica. Sulla rete autostradale sono state posizionate le Battery Swap Station ad una distanza tale da permettere al veicolo di camminare sempre con una SOC>30%, evitando scenari critici in cui la batteria non permette al veicolo di continuare nella sua missione. Il grado di complessità del modello è stato via via aumentato per osservare più scenari possibili: è stata possibile simulare un sistema di ricarica delle batterie all'interno delle Battery Swap Station, sia notturno che diurno. Dalle simulazioni sono stati osservati i tempi necessari al veicolo per raggiungere le varie città e in che modo la tipologia di ricarica della batteria, le condizioni di traffico e il guidatore stesso influenzano i chilometraggi percorsi. A tal proposito è possibile affermare che la difficoltà maggiore è stata riscontrata nell'organizzazione di tutto ciò che c'è dietro la realizzazione e la strutturazione del modello stesso in AnyLogic, piuttosto che nelle simulazioni realizzate più per la validazione del modello stesso.

Il modello potrebbe essere ulteriormente ampliato, aumentando il numero di stazioni e la possibilità del veicolo di scegliere la stazione alla quale fermarsi tramite un sistema di previsione del traffico nei tratti autostradali successivi, per ottimizzare al massimo i tempi di attesa del Battery Swap. Tramite AnyLogic è possibile anche strutturare l'architettura della stazione e gli elementi che ne fanno parte, la sua potenzialità permette l'osservazione di tutti gli scenari possibili di questo settore in via di sviluppo.

BIBLIOGRAFIA E SITOLOGIA

[1] «Motore elettrico, com'è fatto e come funzione sulle auto» https://www.newsauto.it/guide/motore-auto-elettrica-2020-251237/

[2] «Batteria a Piombo e Batteria a Litio. Perché passare da una batteria a piombo ad una batteria a litio?»

https://www.flashbattery.tech/perche-passare-da-una-batteria-al-piombo-ad-una-batteria-al-litio

[3] «Why Battery Swapping is not good for electric vehicle» https://www.linkedin.com/pulse/why-battery-swapping-good-electrical-vehicle-omprakash-upadhyay/

[4] «Is Battery Swapping a viable option for public Transportation EVs?» https://pdiwan.medium.com/is-battery-swapping-a-viable-option-for-public-transportation-evs-adb4ced74ff2

[5] «Ricarica per induzione: è così che le auto elettriche si ricaricano al semaforo rosso» https://www.volkswagen.it/it/auto-elettriche-e-ibride/scopri-la-mobilita-elettrica/id-magazine/tecnologia/ricarica-per-induzione.html

[6] «AnyLogic» https://en.wikipedia.org/wiki/AnyLogic

[7] «Facing the future with electric lion» https://www.mantruckandbus.com/en/technology/facing-the-future-with-the-electric-lion.html

[8] «MAN(azienda)» https://it.wikipedia.org/wiki/MAN (azienda)

[9] «Introduzione alla programmazione ad oggetti» http://webuser.unicas.it/destefano/slides OOP/L 01 intro OOP.pdf

[10] «Programmazione ad oggetti: Incapsulamento, Ereditarietà e Polimorfismo»

https://www.insidevcode.eu/2016/04/19/programmazione-ad-oggetti-2-java/#:~:text=Con %20il%20termine%20Incapsulamento%20si,che%20incapsula%20una%20qualche %20funzionalit%C3%A0

[11] «Nuove tecnologie di ricarica per le auto elettriche» https://www.dazetechnology.com/it/tecnologie-di-ricarica-per-auto-elettriche/

[12] «Motore elettrico auto: cos'è e come funziona» http://motori.guotidiano.net/comefare/motore-elettrico-auto-come-funziona.htm

[13] «Normative europee antinquinamento: cosa sono e quali sono le differenze?» <a href="https://www.baraldigomme.com/normative-europee-antinquinamento-cosa-sono-e-quali-sono-le-differenze/#:~:text=Le%20normative%20Euro%20definiscono%20le,l'impatto%20ambientale%20dei%20veicoli.

[14] «Normative europee sulle emissioni: quali sono e come regolano l'automobile» https://www.autosas.it/chi-siamo/eventi-e-news/fiscalita-e-normative/normative-europee-emissioni-regolano-automobile

[15] «WLTP e RDE: Nuovi test per la certificazione dei consumi, delle emissioni e di CO₂ e delle sostanze inquinanti» https://www.fiat.it/nuovi-test-wltp-emissioni-e-consumi

[16] «MAN produces small production run of all-electric trucks» https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-produces-small-production-run-of-all-electric-trucks/

[17] «La rete MAN si prepara a gestire i veicoli elettrici» https://www.man4you.it/la-rete-man-si-prepara-a-gestire-i-veicoli-elettrici/

[18] «MAN eTGE: tutte le missioni senza emissioni»

https://www.man4you.it/man-etge-tutte-le-missioni-senza-emissioni-2/

[19] «New electric trucks from E-Force One AG receive batteries from Ecovolta» https://www.eseexpo.com/en/News/New_electric_trucks_from_E-Force One AG receive batteries from ecovolta

[20] «Camion elettrici: la rivoluzione arriva anche nel trasporto merci» https://www.smet.it/blog/camion-elettrici/

[21] «Dati di Traffico Medio Giornaliero Annuale» https://www.stradeanas.it/it/le-strade/osservatorio-del-traffico/dati-traffico-medio-giornaliero-annuale

[22] «Technological roadmaps for road vehicles»Corso di Controllo delle emissioni inquinanti, anno 2020/2021 del Prof. Ezio Spessa

[23] «HEVs (Hybrid Electric Vehicles), Introduzione e architetture» Corso di Controllo delle emissioni inquinanti, anno 2020/2021 del Prof. Ezio Spessa

[24] «From System Dynamics and Discrete Event to Pratical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools» Andrei Borshchev & Alexei Filippov

[25] «The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis» Heikki Liimatainen, Oscar van Vliet, David Aplyn

[26] «Agent-Based Modelling of Socio-Technical System» Koen H.van Dam, Igor Nikolic, Zofia Lukszo

[27] «Optimal Planning of Battery Swap Station» Dan Zheng, Fushuan Wen, Jiansheng Huang [28] «Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation» Ivan Mareev, Jan Becker and Dirk Uwe Sauer

[29] «Manuale di Java 8» Claudio De Sio Cesari