



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Ottimizzazione meccanica nel campo dell'automotive,
in particolar modo nel settore degli autocarri e bus
elettrici compatti: impostazione generale e analisi di
dettaglio di alcuni componenti**

Mechanical optimization in the automotive field,
especially in the self-driving and compact electric buses
sector: general setting and key components detailed
analysis

Relatore:

Prof. Ing. Michele Germani

Candidato:

Serena di Maio

Anno accademico 2019/2020

Indice

1 Introduzione.....	5
2 Cenni storici sui veicoli elettrici.....	6
2.1 La storia dell'auto elettrica.....	6
2.2 Gli Electrobus.....	7
3 Lo sviluppo dell'autobus elettrico.....	9
3.1 Analisi regolamenti autobus.....	9
3.2 Scheda tecnica.....	11
3.3 Modello 2D.....	12
3.4 Modello 3D.....	14
3.5 Veicolo elettrico per altri usi.....	16
4 La trazione elettrica.....	18
4.1 Confronto motore elettrico e termico.....	18
4.2 I veicoli elettrici.....	19
4.3 Analisi componenti dei veicoli elettrici.....	21
4.4 Schema elettrico autobus.....	27
4.5 Possibili sviluppi futuri.....	34
5 Prova d'omologazione autobus.....	36
5.1 Omologazione e regolamenti.....	36
5.2 Requisiti prova d'omologazione.....	37
5.3 Analisi provini.....	42
5.4 Analisi struttura.....	45
5.5 Analisi FEM.....	47
6 Conclusioni.....	53
7 Bibliografia.....	54

1 Introduzione

La presente trattazione, svolta in collaborazione con la Tekne Srl, vuole illustrare e informare il lettore circa l'ottimizzazione meccanica in campo automotive di autocarri e bus elettrici compatti.

L'analisi ha permesso di seguire lo sviluppo di un autobus elettrico fin dalle fasi iniziali di raccolta dei dati e ricerca dei regolamenti di riferimento. Sono stati successivamente eseguiti dei modelli 2D e 3D mediante i software Autocad e SolidEdge e si è poi focalizzata l'attenzione sulla trazione elettrica analizzandone i principali componenti che la caratterizzano. Lo studio di un veicolo completamente elettrico è un tema di profonda attualità dal momento che l'utilizzo di energia elettrica sta portando ad una vera e propria rivoluzione nel campo dell'industria automobilistica che cambierà lo scenario mondiale grazie ai vantaggi che offre.

In ultima analisi è stata eseguita una prova di ribaltamento del veicolo in esame come metodo d'omologazione equivalente.

2 Cenni storici sui veicoli elettrici

2.1 La storia dell'auto elettrica

L'auto elettrica, dal suo esordio nel '800 fino ad oggi, ha subito una serie di cambiamenti costruttivi, tecnologici e ambientali tanto da poter riassumere queste evoluzioni in quattro fasi principali: un inizio promettente, una inaspettata sconfitta, un periodo di completa dimenticanza e il trionfo finale. La nascita del primo veicolo elettrico risale intorno al 1832-1839 quando l'imprenditore scozzese Robert Anderson realizzò la prima carrozza a propulsione elettrica, un modello rudimentale dotato di batterie non ricaricabili. Bisognerà aspettare la seconda metà dell'800 quando il fisico francese Gaston Planté inventò il primo accumulatore al piombo seguito poi dagli studi dell'ingegnere francese Camille Faure, il quale ne migliorò la capacità dando vita ad un vero e proprio mercato in Francia e Germania. Uno dei più grandi traguardi raggiunti in questo periodo di ricerca fu ottenuto nel 1899 dal francese Camille Jenatzy che a bordo del suo veicolo elettrico, la "Jamais Contente", riuscì a superare la velocità di 100 km/h.



Figura 1: la "Jamais Contente" realizzata nel 1899

Con la Seconda Rivoluzione Industriale lo sviluppo delle auto elettriche subisce però un rallentamento a favore delle auto a combustione che vennero migliorate significativamente in termini di prestazioni e affidabilità grazie soprattutto alla scoperta di grandi giacimenti di petrolio che portarono ad un aumento della disponibilità di carburante e quindi al crollo del suo prezzo. I veicoli elettrici vennero quindi accantonati sia per l'elevato costo che avevano in quel periodo ma principalmente per la scarsa autonomia di cui disponevano.

Solo nel 1960-1970 le auto elettriche cominciarono a tornare in scena grazie alla crisi petrolifera che causò l'aumento del prezzo della benzina, e alla nascita dei movimenti ecologisti; il problema delle vetture elettriche rimaneva, però, principalmente uno: la scarsa capacità di immagazzinare energia nelle batterie.

L'attenzione rivolta alla mobilità sostenibile si è riacutizzata all'inizio del ventunesimo secolo quando i temi relativi ai cambiamenti climatici, causati dall'utilizzo di combustibili fossili e l'effetto serra, hanno assunto un ruolo centrale.

In quest'ultimo anno, uno dei più complicati nella storia dell'automotive dal Dopoguerra, si è registrato un vero e proprio incremento nella vendita delle auto elettriche grazie anche a incentivi e nuove proposte delle case automobilistiche.

2.2 Gli Electrobus

La storia degli autobus elettrici inizia nel XX secolo quando a Londra nella gara a sostituire gli omnibus, veicoli trainati da cavalli e destinati al trasporto pubblico di persone, gareggiarono gli autobus con motore a scoppio, quelli a vapore e quelli elettrici della compagnia Electrobus. Ad avere la meglio furono gli autobus con motore a scoppio che raggiunsero, tra il 1905 e il 1907, circa 1000 esemplari. Questi però all'epoca erano mezzi rumorosi e poco affidabili che nella maggior parte delle corse lasciavano a piedi i passeggeri. Fu proprio in questo scenario che comparvero gli Electrobus, silenziosi, affidabili e privi di emissioni; la loro autonomia era di 60 km e le batterie impiegavano circa 8 ore per una ricarica completa ma per risolvere questi difetti fu studiato un sistema intelligente: il veicolo raggiungeva l'officina dove il pacco

batteria veniva sostituito con uno carico in modo da garantire la ripresa della marcia. In poco tempo gli autobus elettrici suscitarono grande interesse tanto che l'ingegnere britannico Douglas Fox li descrisse come "I più temibili avversari degli omnibus a cavallo, dei bus a gasolio e dei tram".



Figura 2: esempio di Electrobus nelle strade di Londra

Nel 1910 gli Electrobus sparirono dalle strade a causa del fallimento della società: il problema non fu la tecnologia, perfettamente funzionante, quanto i fondatori della compagnia che vedevano gli autobus come un mezzo per fare soldi rapidamente. Nessuno volle più investire e perfezionare gli autobus elettrici e il loro posto fu preso dagli autobus a gasolio.

3 Lo sviluppo dell'autobus elettrico

3.1 Analisi regolamenti autobus

Il punto di partenza per la progettazione dell'autobus elettrico è stato quello di raccogliere le richieste dell'azienda ovvero eseguire uno studio su tale veicolo prevedendo un numero di posti a sedere pari a 24 più un posto riservato al conducente, con dimensioni del telaio pari ad una lunghezza di circa 7,7 metri, larghezza di 1,9 metri e massa massima superiore di 7,5 T. Definite le principali caratteristiche, necessarie ad inserire il veicolo all'interno della propria categoria di appartenenza, si è fatto poi riferimento al *“Regolamento n. 107 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE)-Disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli di categoria M₂ o M₃ con riguardo alla loro costruzione generale”* e alla *“Direttiva 70/156/CEE del Consiglio, del 6 febbraio 1970, concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative all'omologazione dei veicoli e motore e dei loro rimorchi”*. Gli autobus rientrano nella categoria di autoveicoli sono cioè veicoli destinati al trasporto di persone con più di 9 posti a sedere compreso il conducente. Secondo la classificazione internazionale gli autobus fanno parte della categoria M e più precisamente, nel caso in esame, della categoria M₃: veicoli a motore destinati al trasporto di persone con più di 8 posti a sedere oltre al sedile del conducente e massa massima superiore a 5 T.

Per ciascuna rubrica che richieda un corredo di fotografie o di disegni, devono essere indicati i numeri dei rispettivi allegati.

- (a) Per ogni dispositivo approvato, la descrizione può venir sostituita da un rinvio a tale approvazione. Del pari, la descrizione non è necessaria per qualsiasi elemento che risulti chiaramente dagli schemi o disegni allegati alla scheda.
- (b) Classificazione in base alle seguenti categorie internazionali:
 - 1. *Categoria M*: Veicoli a motore destinati al trasporto di persone ed aventi almeno quattro ruote, oppure tre ruote e peso massimo superiore ad 1 tonnellata;
 - *Categoria M₁*: Veicoli destinati al trasporto di persone, aventi al massimo otto posti a sedere oltre al sedile del conducente,
 - *Categoria M₂*: Veicoli destinati al trasporto di persone, aventi più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente e peso massimo non superiore a 5 tonnellate,
 - *Categoria M₃*: Veicoli destinati al trasporto di persone, aventi più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente e peso massimo superiore a 5 tonnellate.

Figura 3: Regolamento n.107 della Commissione economica per l'Europa, classificazione veicoli di categoria M

Essendo un veicolo di capacità superiore a 22 passeggeri, oltre al conducente, esso rientrerà nella classe III:

2. DEFINIZIONI

Ai fini del presente regolamento si intende per:

- 2.1. «veicolo», un veicolo di categoria M₂ o M₃ compreso nel campo di applicazione di cui al precedente punto 1.
 - 2.1.1. I veicoli la cui capacità supera i 22 passeggeri, oltre al conducente, si suddividono in tre classi:
 - 2.1.1.1. «classe I»: veicoli che dispongono di spazi destinati ai passeggeri in piedi, per consentire loro spostamenti frequenti;
 - 2.1.1.2. «classe II»: veicoli destinati principalmente al trasporto di passeggeri seduti, progettati in modo da poter trasportare passeggeri in piedi nella corsia e/o in una zona la cui superficie non è superiore allo spazio occupato da due sedili doppi;
 - 2.1.1.3. «classe III»: veicoli destinati esclusivamente al trasporto di passeggeri seduti;
 - 2.1.1.4. un veicolo può appartenere a più classi. In tal caso può essere omologato per ciascuna classe di appartenenza.

Figura 4: Regolamento n.107 della Commissione economica per l'Europa, suddivisione in classi

3.2 Scheda tecnica

Una volta definite la categoria e classe di riferimento e gli elementi costitutivi del veicolo è stata realizzata la scheda tecnica nella quale compaiono le dimensioni principali che permetteranno successivamente di creare un modello di riferimento dell'autobus esaminato.

Nella tabella di seguito sono quindi brevemente riportate le lunghezze caratteristiche, il numero di posti previsto e il tipo di motore che si è voluto adottare.

SCHEDA TECNICA AUTOBUS ELETTRICO	
DIMENSIONI	
Lunghezza	7,7 m
Larghezza	1,9 m
Altezza	2,75 m
Passo	4,25 m
Sbalzo anteriore	1,5 m
Sbalzo posteriore	2, m
Posti	24+1

MOTORE	
Tipo motore	Elettrico

Figura 5: scheda tecnica autobus elettrico

3.3 Modello 2D

Al fine di avere una visione chiara e precisa del veicolo oggetto dell'analisi, i dati sopra riportati sono stati utilizzati per creare un layout dell'autobus attraverso il programma di modellazione Autocad. Sono state quindi eseguite tre viste: laterale, dall'alto e frontale nelle quali è possibile osservare la disposizione dei posti a sedere.

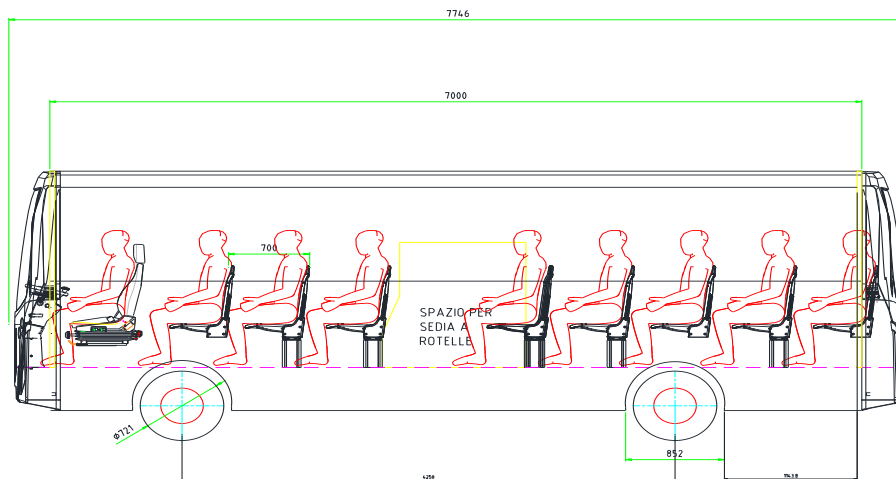


Figura 6: vista laterale autobus

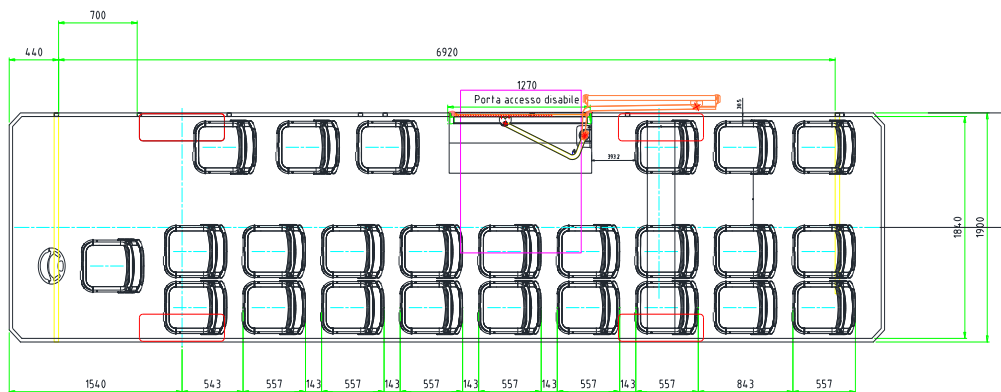


Figura 7: vista dall'alto autobus

Nella vista frontale è stata collocata una sagoma di specifiche dimensioni in relazione alla classe di appartenenza del veicolo che viene inserita lungo la corsia dell'autobus al fine di verificare che siano rispettati i requisiti necessari riportati nel regolamento.

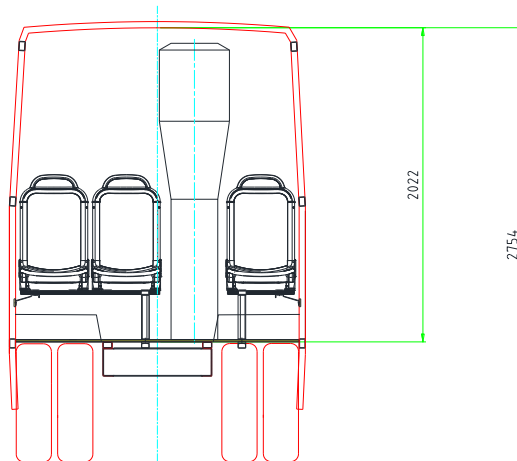


Figura 8: vista frontale autobus

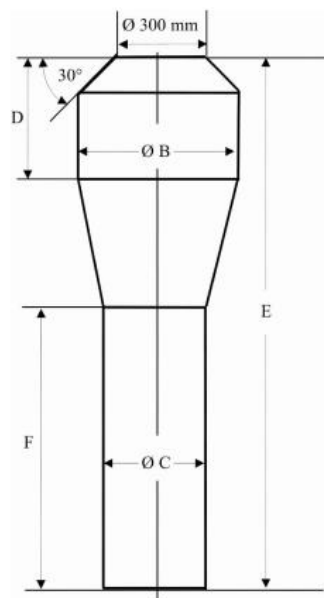


Figura 9: sagoma di prova

A un piano					
Classe	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)
A	550	350	500 (*)	1 900 (*)	900
B	450	300	300	1 500 (*)	900
I	550	450 (*)	500 (*)	1 900 (*)	900
II	550	350	500 (*)	1 900 (*)	900
III	450	300 (*)	500 (*)	1 900 (*) (*)	900 (*)

- (*) L'altezza del cilindro superiore, e di conseguenza l'altezza totale, può essere ridotta di 100 mm in qualsiasi punto della corsia situata dietro:
- un piano trasversale posto 1,5 m davanti alla mezzeria dell'asse posteriore (asse posteriore più avanzato nel caso di veicoli con più di un asse posteriore) e
 - un piano verticale trasversale situato a livello del bordo posteriore della porta di accesso o, se le porte sono più di una, della porta di accesso più arretrata.
- (*) Il diametro del cilindro inferiore può essere ridotto da 450 mm a 400 mm in qualsiasi punto della corsia dietro il piano più avanzato tra:
- un piano verticale trasversale situato 1,5 m davanti alla mezzeria dell'asse posteriore (asse posteriore più avanzato nel caso di veicoli con più di un asse posteriore) e
 - un piano verticale trasversale situato a livello del bordo posteriore della porta d'accesso più arretrata tra gli assi.
- Ai fini di quanto sopra, ciascuna sezione rigida di un veicolo snodato è considerata separatamente.
- (*) 220 mm nel caso di sedili che possono scorrere lateralmente (cfr. punto 7.7.5.3 dell'allegato 3).
- (*) In caso di un veicolo con una parte del suo ponte direttamente nel vano del conducente, l'altezza totale della sagoma di prova si può ridurre (riducendo l'altezza del cilindro inferiore) da 1 900 mm a 1 680 mm in qualsiasi punto della corsia situata davanti al piano verticale trasversale che coincide con la linea mediana dell'asse anteriore.
- (*) L'altezza totale della sagoma di prova si può ridurre (riducendo l'altezza del cilindro inferiore):
- da 1 800 mm a 1 680 mm in qualsiasi punto della corsia al piano inferiore situata dietro a un piano verticale trasversale posto a 1 500 mm davanti alla mezzeria dell'asse posteriore (l'asse posteriore più avanzato nel caso di veicoli con più di un asse posteriore);
 - da 1 800 mm a 1 770 mm nel caso di una porta d'accesso situata davanti all'asse anteriore, in qualsiasi punto della corsia, tra due piani verticali trasversali posti a 800 mm davanti e dietro la mezzeria dell'asse anteriore.

Figura 10: dimensioni sagoma di prova

3.4 Modello 3D

La modellazione 3D è stata realizzata con il software Solid Edge. La struttura dell'autobus è realizzata con tubolari in acciaio AISI 304 a sezione rettangolare di dimensione 80x40 mm e 4 mm di spessore ed è principalmente composta da centine, montanti e traverse di collegamento.

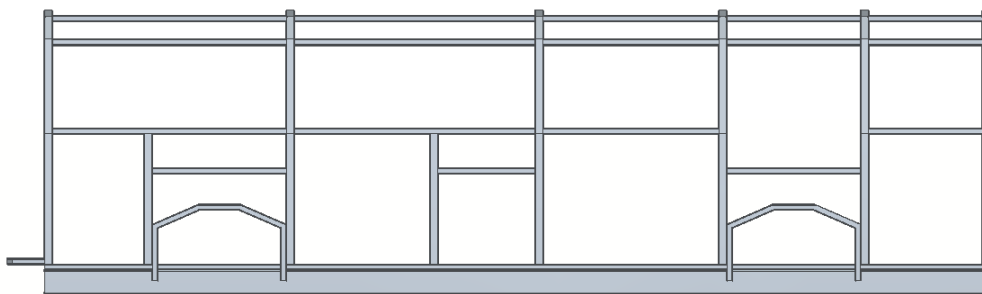


Figura 11: vista laterale autobus

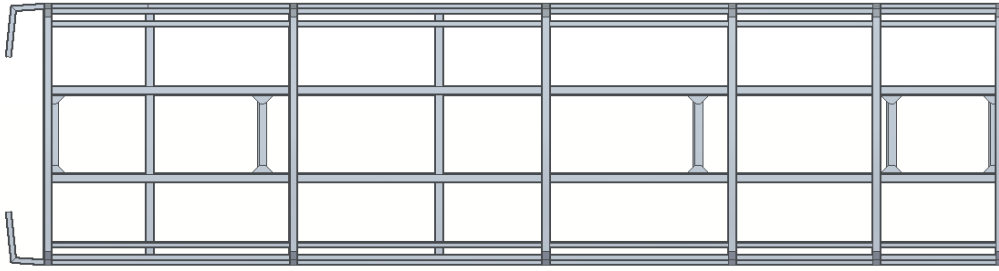


Figura 12: vista dall'alto autobus

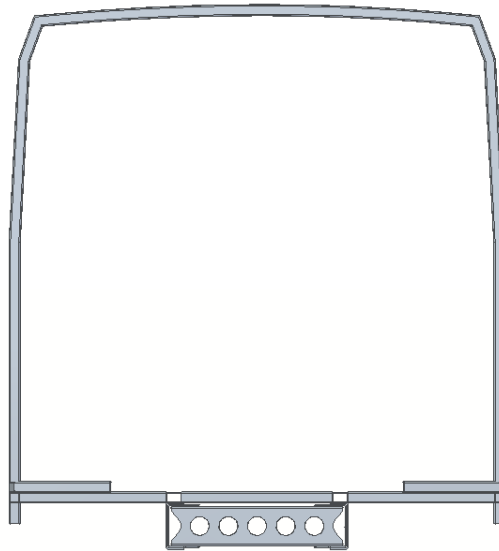


Figura 13: vista frontale autobus

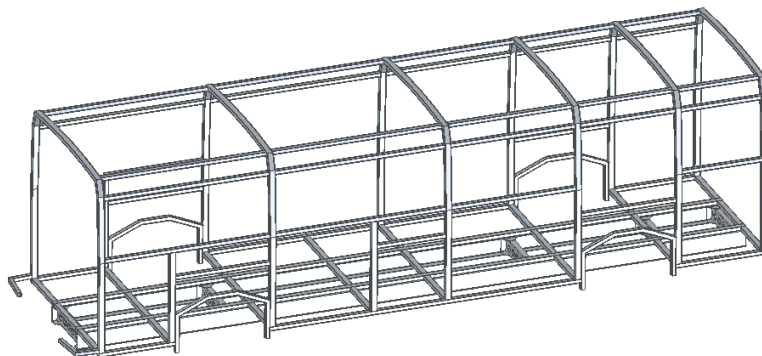


Figura 14: 3D autobus

3.5 Veicolo elettrico per altri usi

Apportando una serie di modifiche al veicolo che si è precedentemente introdotto, variando quindi il passo e gli sbalzi, e prevedendo la collocazione di una cabina nella parte anteriore e di un compattatore o costipatore per rifiuti in quella posteriore, sono stati realizzati anche dei figurini, a semplice scopo illustrativo, per un autocarro destinato alla nettezza urbana. Di seguito si riportano le principali viste.

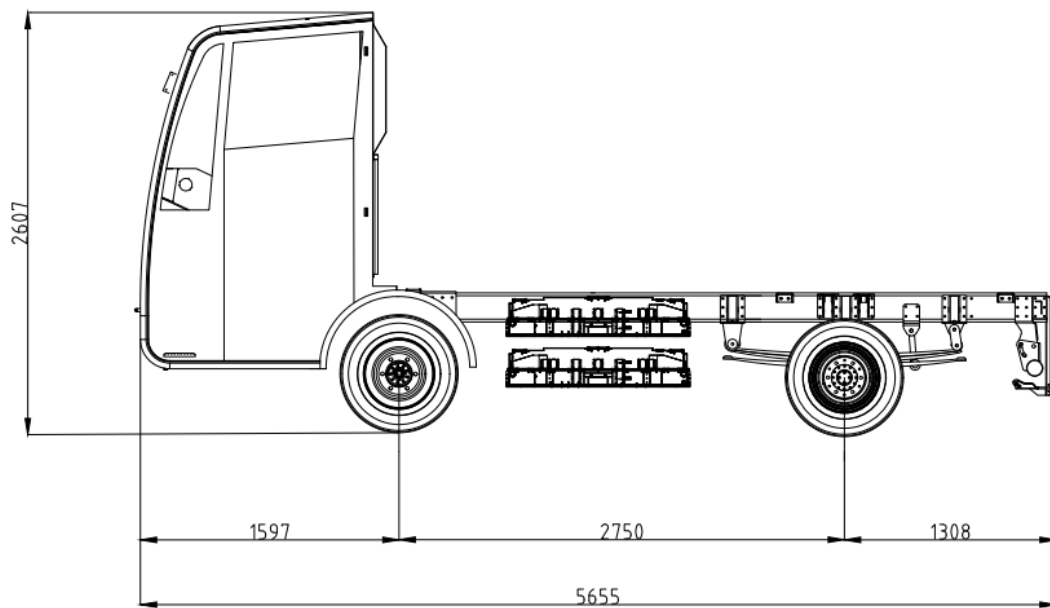


Figura 15: vista laterale veicolo nettezza urbana

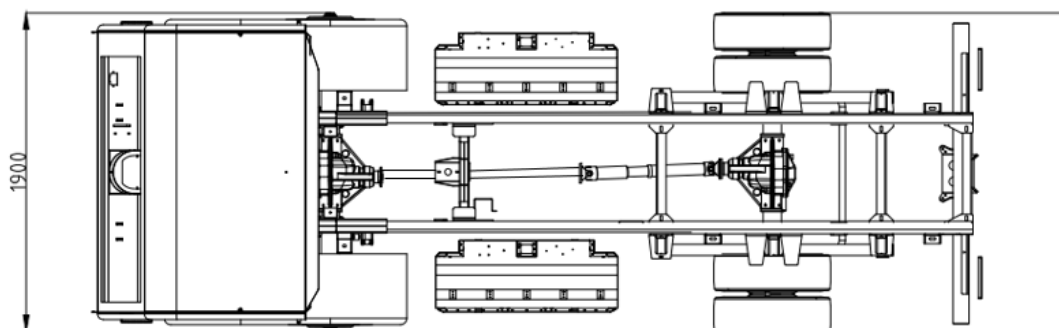


Figura 16: vista dall'alto veicolo nettezza urbana

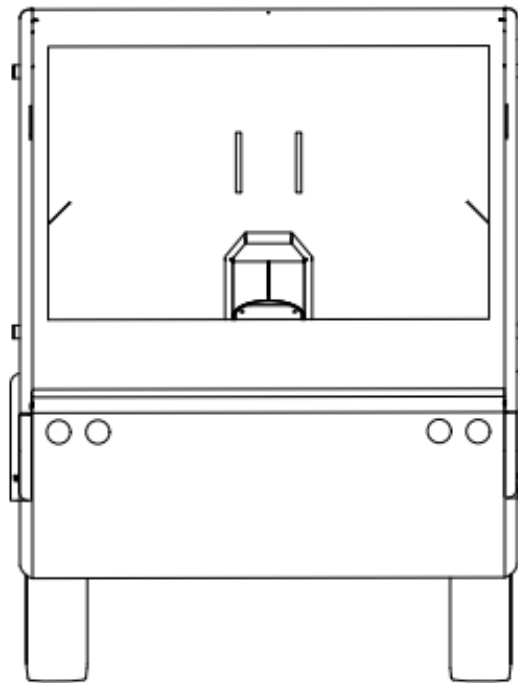


Figura 17: vista frontale veicolo nettezza urbana

4 La trazione elettrica

4.1 Confronto motore elettrico e termico

Nel corso degli anni si sta assistendo ad un graduale, seppur ancora lento, passaggio dall'auto tradizionale (a diesel, gas o benzina) all'alimentazione elettrica. Questo principalmente perché le auto elettriche offrono una mobilità pulita a emissioni zero con la possibilità di essere ricaricate mediante fonti rinnovabili oltre al fatto di avere una meccanica nettamente più semplice rispetto alle auto tradizionali che si traduce in una riduzione dei costi di manutenzione; un altro aspetto importante è il comfort legato alla silenziosità del motore. Anche le auto elettriche, però, presentano degli svantaggi tra cui la scarsa autonomia delle batterie e la mancanza di un numero adeguato di stazioni di ricarica.

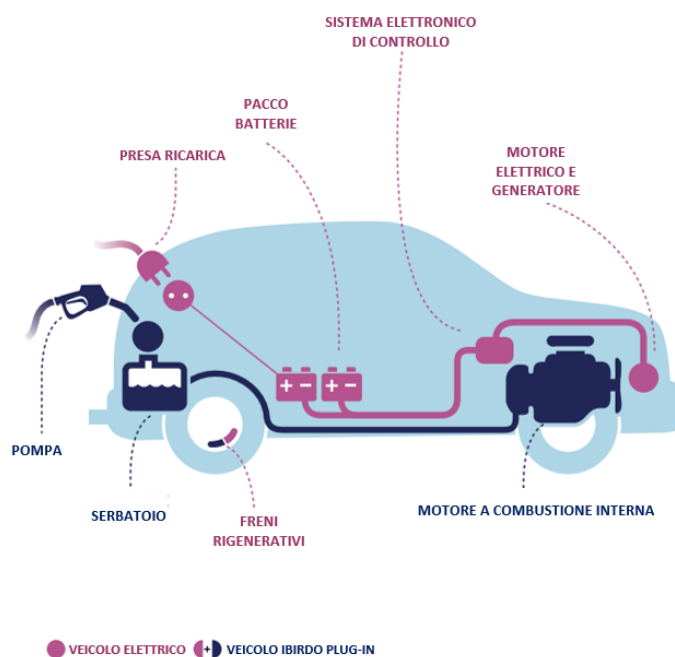


Figura 18: confronto trazione elettrica/termica da “European Environment Agency”

4.2 I veicoli elettrici

I veicoli elettrici possono essere classificati in:

- **Veicoli ibridi elettrici (HEV):** sono veicoli in cui la propulsione è data dall'azione sinergica del motore a combustione e di quello elettrico in modo da bilanciare le loro prestazioni essendo, alle basse velocità, più efficiente l'elettrico e alle alte quello termico. Il loro duplice aspetto garantisce di poter sfruttare la silenziosità e il basso impatto ambientale dell'elettrico nelle strade urbane e utilizzare il termico nei tragitti extra-urbani. Esistono varie tipologie di veicoli ibridi che in base al grado di ibridazione, ovvero la potenza della trazione elettrica rispetto alla potenza totale generata e alla capacità del motore ibrido di immagazzinare energia, si classificano in: *full hybrid* (ibridazione piena), *mild hybrid* (ibridazione leggera) e *minimal hybrid* (ibridazione minima);

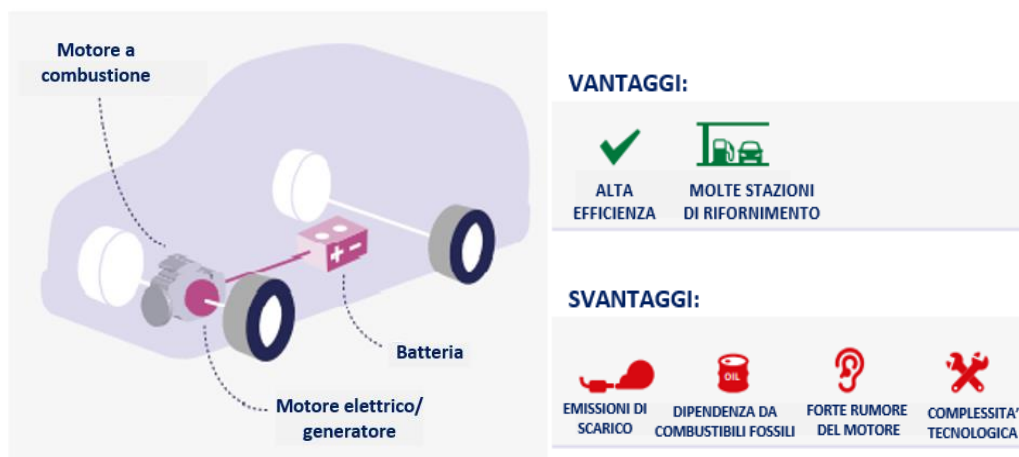


Figura 19: veicolo ibrido elettrico dall' European Environment Agency

- **Veicoli ibridi Plug-in (PHEV):** sono veicoli costituiti da un motore elettrico e da un motore a combustione che possono funzionare insieme o separatamente con la differenza che le batterie di questi ultimi possono essere ricaricate attraverso la rete elettrica domestica o pubblica senza dover ricorrere all’ausilio del motore termico;

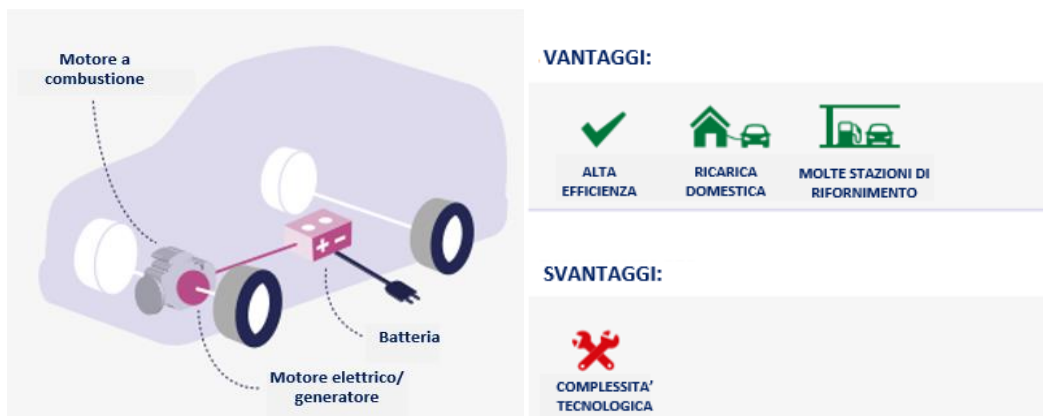


Figura 20: veicolo ibrido Plug-in dall'European Environment Agency

- **Veicoli elettrici a batteria (BEV):** i veicoli elettrici a batteria, dall'inglese *Battery Electric Vehicle* (BEV), o più semplicemente veicoli elettrici, dall'inglese *Electric Vehicle* (EV), utilizzano l'energia elettrica che viene accumulata in opportune batterie, trasformandola in energia meccanica per movimentare il mezzo. Le batterie sono ricaricate attraverso la rete elettrica e hanno dimensioni abbastanza grandi in modo da massimizzare l'accumulo di energia e aumentare gli intervalli di guida. Un aspetto interessante riguarda il sistema di frenata rigenerativo che consente di ricaricare la batteria.



Figura 21: veicoli elettrici a batteria dall'European Environment Agency

4.3 Analisi componenti dei veicoli elettrici

In questo capitolo verranno brevemente richiamati quelli che sono i principali componenti che caratterizzano le auto elettriche: la batteria, l'inverter e il motore elettrico.

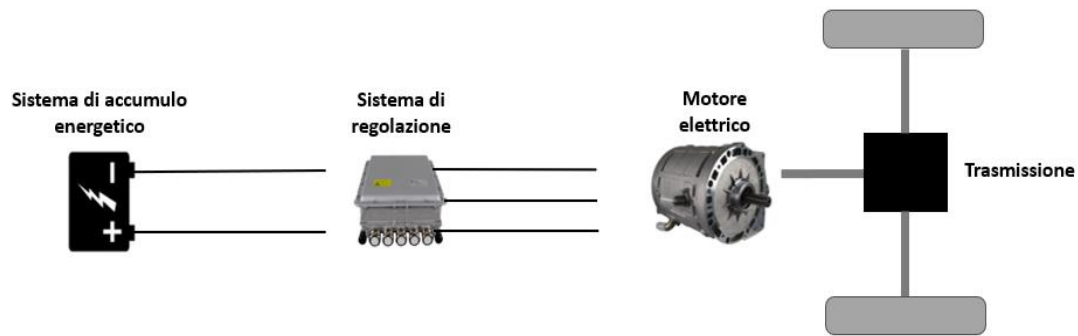


Figura 22: componenti principali dei veicoli elettrici

Le **batterie**, o accumulatori, rappresentano il “serbatoio” di energia e sono composte da un insieme di celle elementari che possono essere collegate le une con le altre in serie o in parallelo in modo da raggiungere un determinato valore di tensione e corrente. Le celle sono gli elementi costruttivi elementari delle batterie che mediante reazioni di ossidoriduzione trasformano energia chimica in energia elettrica, quest’ultima trasformata in energia meccanica dal motore. Le celle sono composte da:

- L'*anodo*, è l'elettrodo negativo, è generalmente costituito da grafite e durante la scarica fornisce elettroni al circuito esterno;
- Il catodo è l'elettrodo positivo, è un ossido metallico e durante la scarica accetta elettroni dal circuito esterno;
- L'elettrolita separa i due elettrodi ed è il mezzo attraverso il quale avviene il trasferimento degli ioni tra anodo e catodo: è un conduttore di ioni.

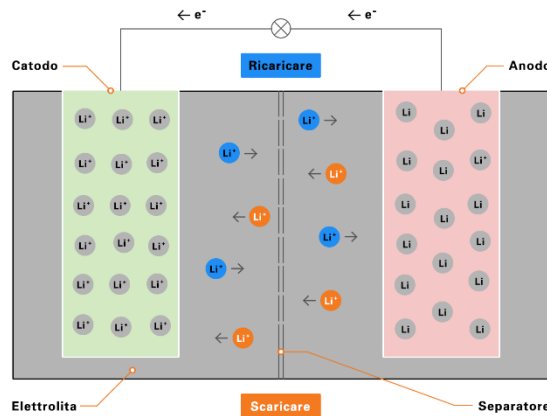


Figura 23: struttura batteria

Le batterie attualmente utilizzate nei veicoli elettrici sono principalmente di 5 tipi:

- Nichel-Metallo Idruro (NiMH): sono l'evoluzione delle tradizionali batterie Nichel-Cadmio (Ni-Cd) impiegate in molti settori industriali nel formato stilo; una batteria NiMH ha una capacità di due o tre volte superiore ad una batteria NiCd di uguali dimensioni; hanno una buona capacità e velocità di ricarica;
- Piombo-gel: in questo tipo di batterie l'elettrolita non è acido allo stato liquido ma è gelatinoso e sono in grado di sopportare cicli di carica/scarica molto profondi; questi accumulatori sono esenti da manutenzione e privi di rischio di sversamento accidentale di acido;
- Litio-Ioni: sono le batterie più utilizzate in campo automobilistico, industriale, militare e aerospaziale; sono leggere, hanno un'alta capacità di carica, elevato numero di cicli, basso impatto sull'ambiente e alta potenza. Esse contengono un elettrolita infiammabile che può provocare esplosioni o incendi nel caso in cui queste venissero danneggiate o caricate in modo errato;
- Litio-Polimero: in questo caso le batterie hanno il vantaggio che il polimero solido non è infiammabile a differenza dell'accumulatore ione-litio; non hanno bisogno di contenitori in metallo quindi la batteria risulterà più leggera, esse hanno inoltre una densità energetica maggiore delle litio-ione e delle NiCd e NiMH;
- Litio-Ferro-Fosfato: sono utilizzate per auto ibride, nelle biciclette e motoveicoli elettrici; hanno una bassa corrente di auto-scarica e una vita ciclica alta.

La batteria di un prodotto è quindi il cuore del powertrain mentre il **BMS** ne è il cervello. Il Battery Management System è infatti il sistema di gestione, monitoraggio e bilanciamento di tutte le funzioni di diagnostica, efficienza e di sicurezza delle batterie ricaricabili al fine di ottimizzarne la vita utile. Le funzioni principali del BMS sono quindi:

- Monitorare la batteria attraverso il controllo dello stato di carica e lo stato di salute;
- Controllare lo stato della batteria attraverso i parametri di tensione, temperatura e corrente;
- Proteggere la batteria da eventuali danneggiamenti;
- Ottimizzare la batteria.

Il BMS consente di individuare problemi di malfunzionamento della batteria garantendo di lavorare in condizioni di sicurezza.

L'**inverter** è l'elemento indispensabile affinché la corrente continua in ingresso sia trasformata in corrente alternata in uscita; esso può variare in ampiezza, in frequenza e in sequenza. La batteria cede quindi energia all'inverter dal quale esce corrente alternata trifase che viene immessa nel motore. Esistono tre tipi di inverter:

- Ad onda quadra (per alimentare i carichi resistivi);
- Ad onda sinusoidale modificata (per carichi capacitivi e resistivi);
- Ad onda sinusoidale pura (per tutti i tipi di carichi).

L'inverter può far funzionare il motore in tre modalità differenti:

- Corrente di armatura costante che porta a variazioni di coppia;
- Coppia costante;
- A regime di rotazione costante in modo da rendere ancora più peculiari le caratteristiche che differenziano la trazione elettrica da quella termica cioè la costanza di regime di rotazione e quindi il fatto che il motore elettrico già da zero ha già la coppia massima.

Per evitare che l'inverter venga danneggiato durante il funzionamento bisogna collocarlo a distanza dal suolo.

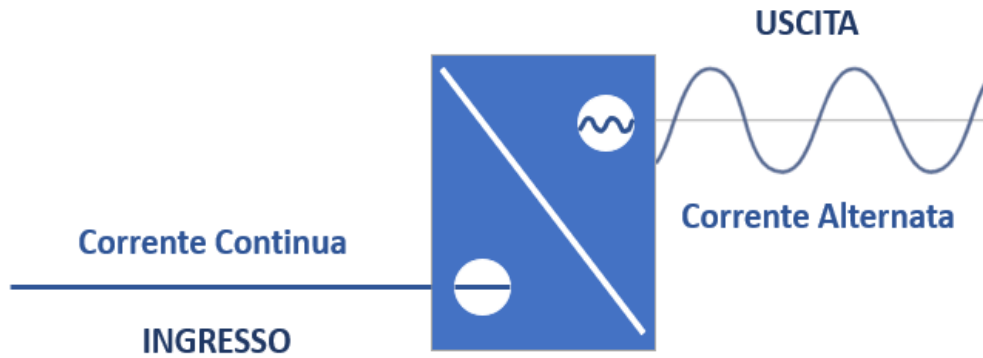


Figura 24: schema inverter

La batteria cede energia all'inverter che la converte da continua in alternata e la invia al **motore**; l'energia elettrica accumulata viene quindi trasformata in energia meccanica che movimentata il veicolo.



Figura 25: conversione effettuata dal motore elettrico

Il motore elettrico è composto da due parti principali: lo statore e il rotore che generano due campi magnetici che interagiscono tra di loro e producono una coppia motrice. Lo statore rappresenta la parte fissa mentre il rotore la parte rotante.

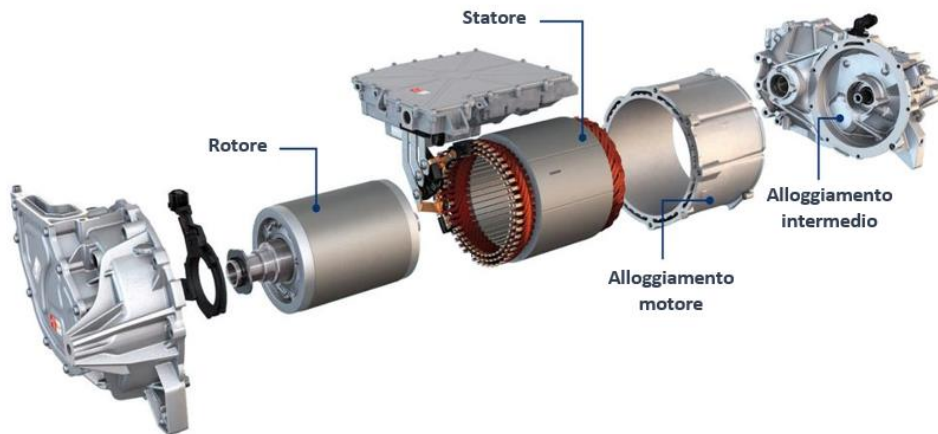


Figura 26: componenti motore elettrico

I *motori a corrente continua* sono usati in applicazioni in cui è richiesta la regolazione della velocità (macchine utensili e robot industriali), in campo automobilistico per il comando di vari componenti (finestrini, impianto di climatizzazione, ecc.), nella trazione a filo e in quella ferroviaria.

I *motori asincroni trifase* sono alimentati da un sistema di tensioni trifase ovvero tensioni che risultano sfasate tra di loro di 120° , sono quelli più usati per semplicità costruttiva e affidabilità. Sullo statore sono presenti 3 bobine, sfasate tra di loro a 120° , alimentate dal sistema trifase di tensione; ogni bobina è percorsa da corrente ed è in grado di generare un campo magnetico variabile. Il rotore presenta la caratteristica di non ruotare a una velocità costante, chiamata velocità di sincronismo, ma rallenta al variare del carico; per questo motivo il motore non è detto sincrónico ma asincrono poiché non rispetta la velocità di sincronismo imposta dallo statore.

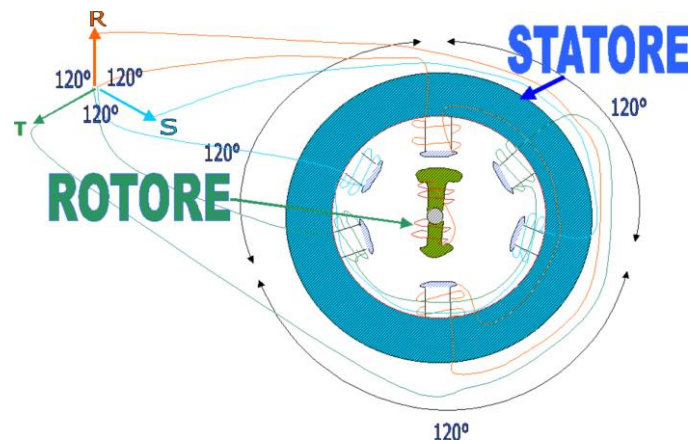


Figura 27: statore e rotore

Sono chiamate *sincrone* tutte le macchine elettriche a corrente alternata la cui velocità di funzionamento è legata alla frequenza della tensione generata o applicata ai morsetti; le macchine sincrone sono usate principalmente come generatori.

Nei *motori sincroni a magneti permanenti, o brushless*, lo statore ed il rotore sono entrambi a forma di corona cilindrica di materiale ferromagnetico e separati da un traferro in aria; i magneti permanenti sono posizionati sul rotore.

Un altro componente fondamentale nelle auto elettriche è il dispositivo **KERS** (Kinetic Energy Recovery System) o sistema di recupero dell'energia cinetica. Quando si guida un veicolo è possibile modificare la sua velocità accelerando o rallentando grazie all'impianto frenante; la vettura in movimento ha quindi un'energia e durante la decelerazione, a causa dell'uso dei freni, una parte di questa viene persa e dissipata nell'ambiente sotto forma di calore. Il recupero di questa energia che viene persa durante la frenata può incrementare l'efficienza delle macchine motrici, determinando un minor consumo di carburante e una riduzione di CO₂.

4.4 Schema elettrico autobus

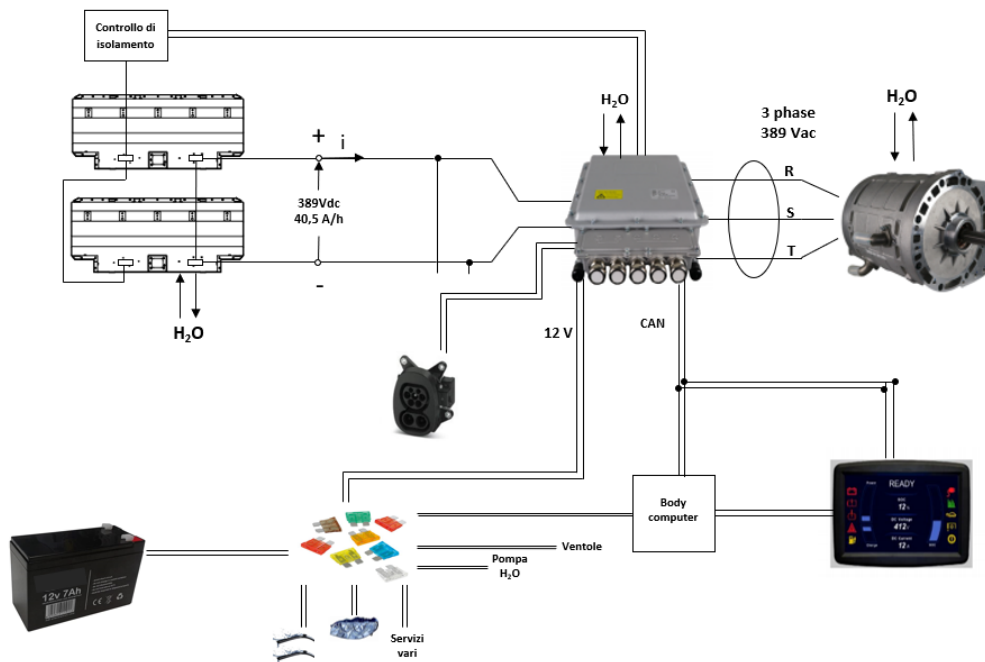


Figura 29: schema elettrico autobus in esame

Il sistema di trazione nell'autobus in esame è composto da un cluster di batterie collegate in modo parallelo in grado di fornire in uscita 389 V continui. Il modulo batteria agli ioni di litio è composto da 18650 celle cilindriche ad alta potenza e un BMS ad alta efficienza che garantisce, come già elencato, il monitoraggio cellulare, la funzione di bilanciamento, unità di disconnessione e un'adeguata gestione termica. Integrati nel pacco batterie troviamo il sistema di riscaldamento e raffreddamento, questo permette una perfetta gestione termica e ottime prestazioni. L'involucro esterno delle batterie è realizzato in alluminio rinforzato.



Figura 30: batteria pack autobus elettrico

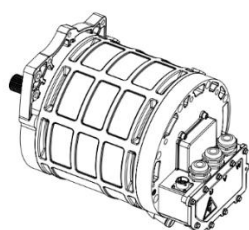
/ Battery Pack

Batteries

TECHNICAL SPECIFICATIONS FOR BATTERY HV-400		UNIT
Code	BPLI-400158	
Nominal voltage	389	Vdc
Nominal capacity	40.5	Ah
Nominal energy	15.78	kWh
Standard charge	0.5	C (RT)
Standard discharge	1	C (RT)
Max continuous discharge current	61	A
Environmental rating	IP 67	
Communication	1 x CAN2.0b	
Charging temperature	$0 \leq T \leq 45$	$^{\circ}\text{C}$
Discharging temperature	$-20 \leq T \leq 60$ (Derating $-20 \leq T \leq 0$)	$^{\circ}\text{C}$
Certification	TUV; CE; UN 38.3, R100 compliant	
Life cycle (25 $^{\circ}\text{C}$; 0.5c; -1c)	1.500 cycles (with min. 80% of energy available)	
Dept of discharge (dod)	90	%
Dimensions	1.135x449x250	LxWxH mm
Weight (whole pack)	130	Kg

Figura 31: scheda tecnica batteria autobus elettrico

Nell'ordine si troverà poi l'inverter che, come già descritto, trasforma la corrente continua in corrente alternata, dal quale uscirà la linea che andrà al motore per la trazione attraverso un segnale trifase 389 Vac.



Motor parameters	
Type	Interior permanent magnet synchronous motor
Magnet material	NdFeB 40UH
Poles	6
External rotor diameter	124 mm
External stator diameter	210 mm
Internal stator diameter	126 mm
Active part length	210 mm
Stator/Rotor airgap	1 mm
Rotor weight	15 kg
Stator weight	18 kg
Stator resistance	20.2 mΩ
Type of stator winding	Wound stator
Type of connection	Y
D-axis inductance	0.31 mH
Q-axis inductance	0.73 mH
Phase/phase resistance	10.1 mΩ
Phase/phase inductance	-
Magnetic flux value	0.101 Wb
Torque constant	0.7 Nm/Arms
Empty back-EMF	37 V@1 000 rpm
Battery voltage	400 VDC
Rated voltage	280 VAC
Rated power	55 kW
Peak power	90 kW
Rated speed	3500 rpm
Maximum speed	12000 rpm
Rated torque	136 Nm
Peak torque	288 Nm
Rated current	187 A
Peak current	410 A
Torque ripple	2.5 % @ 288 Nm
Peak efficiency	95 %
IP grade	IP 67
Insulation	H
Weight	55 kg

Figura 32: motore autobus elettrico

/ Hi-Perm-Mag™

Motor

TECHNICAL SPECIFICATIONS FOR HI-PERM-MAG™				UNIT
Code	TR-06018-W400	TR-09028-W400	TR-12030-W400	
Peak power	60	90	120	kW
Rated power	30	55	50	kW
Peak current	230	410	440	A
Rated current	114	195	116	A
Peak torque	180	288	300	Nm
Rated torque	95	135	106	Nm
Peak speed	8.000	12.000	12.000	RPM
Rated speed	3.000	3.500	4.500	RPM
Battery voltage	400	400	400	Vdc
Cooling	Liquid cooled	Liquid cooled	Liquid cooled	
Efficiency	≥ 95	≥ 95	≥ 95	%
Environmental	IP 67	IP 67	IP 67	
Dimension	297x222x273	435x342x274	435x342x274	mm
Weight	≤ 55	≤ 55	≤ 55	Kg

Figura 33: scheda tecnica motore autobus elettrico

Motor peak curves @ 400V *

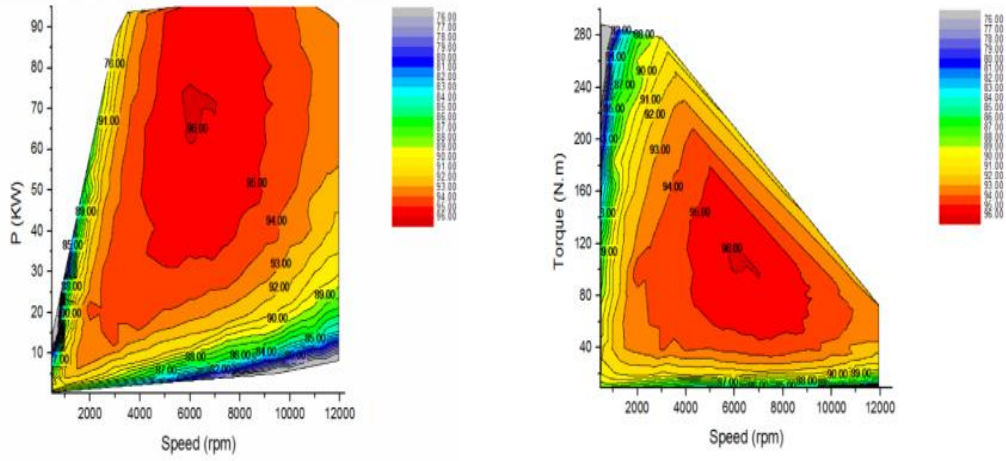


Figura 34: curve di potenza e coppia in funzione della velocità in trazione

Regenerative peak curves @ 400V *

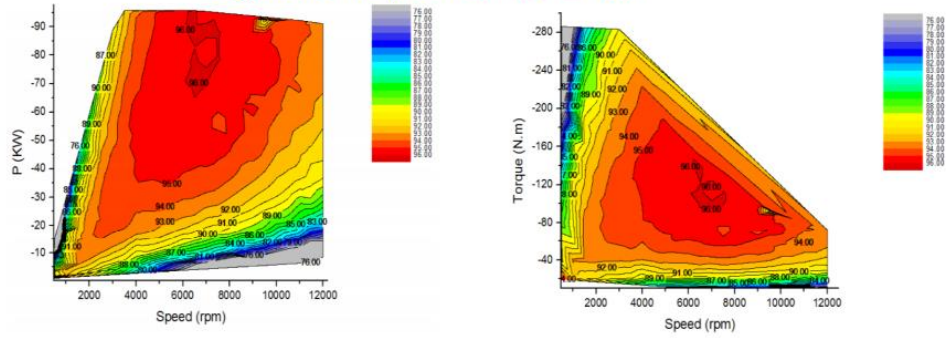


Figura 35: curve di potenza e coppia in funzione della velocità in frenata

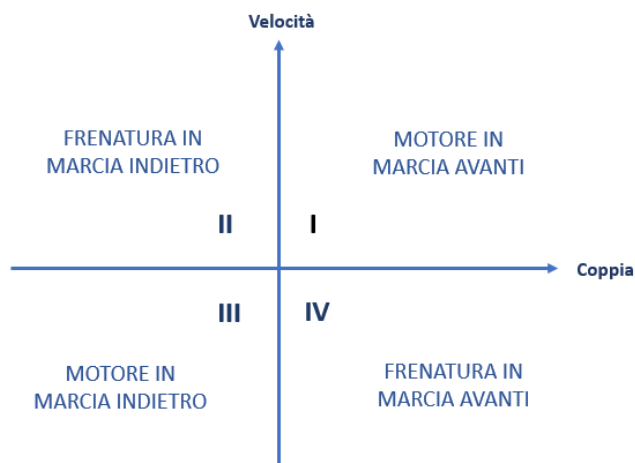


Figura 36: quadranti di funzionamento del motore elettrico

I quadranti di funzionamento riassumono il comportamento dei motori in corrente continua e di qualsiasi tipo di azionamento. Il motore prevede due modalità di funzionamento: motorizzazione e frenata. L'azionamento a motore che è in grado di produrre sia la motorizzazione sia la rigenerazione è chiamato azionamento a velocità variabile a quattro quadranti. In marcia la macchina funziona come un motore e converte l'energia elettrica in energia meccanica; in frenata la macchina funziona come un generatore e converte energia meccanica in elettrica e si oppone al movimento. La potenza sviluppata da un motore è data dal prodotto tra la velocità angolare e la coppia. Quando il motore è ruotato in avanti viene assunta positiva la velocità dello stesso.

Nel I quadrante la potenza sviluppata è positiva e la macchina funziona come un motore che fornisce energia meccanica.

Nel II quadrante la direzione di rotazione è positiva ma la coppia è negativa quindi la macchina funziona come un generatore che sviluppa una coppia negativa che si oppone al movimento.

Nel III quadrante si ha un'inversione di marcia in cui il motore funziona in direzione opposta in cui sia velocità che coppia hanno valori negativi.

Nel IV quadrante si ha coppia positiva e velocità negativa corrispondente alla frenata in inversione di marcia.

Riprendendo lo schema elettrico citato precedentemente si ha poi l'inverter, dove si ha in ingresso e in uscita l'acqua di raffreddamento, il quale ha tre ulteriori uscite:

- Uscita della 12V che è incanalata all'interno di una centralina fusibili (dispositivi elettrici che proteggono i circuiti dalle sovracorrenti) che alimentano i tergi cristallo, le luci, le ventole e i servizi vari; alla scatola fusibili viene attaccata una batteria di servizio di 12V.
- CAN (Controller Area Network) o CAN-bus (in elettronica con "bus" si intende un canale di comunicazione): protocollo di comunicazione che viene usato per collegare diverse unità di controllo elettronico;
- Spina di ricarica

Il CAN, che è in grado di diagnosticare eventuali guasti o anomalie, converge in una scheda di controllo chiamata Body Computer il quale comunica con l'HMI, Human-Machine Interface, o Tera 7, dove c'è la diagnostica di quasi tutto quello che succede sul veicolo: velocità del mezzo, stato delle batterie, temperatura dell'acqua e stima dell'autonomia.

Per poter ricaricare le auto elettriche e poter quindi utilizzare le stazioni di ricarica è necessario far riferimento alla normativa di riferimento IEC 61851-1 che prevede un sistema di comunicazione universale tra stazione e veicolo attraverso un circuito PWM (Pulse Width Modulation) affinché il processo di ricarica avvenga in modo sicuro.

Le modalità di ricarica sono quattro:

- Modo 1: ricarica domestica senza PWM. Il veicolo elettrico viene collegato alle normali prese di corrente (non è previsto il Control Box) e questa modalità è adatta solo a bici elettriche e alcuni scooter ma non alle auto elettriche.



Figura 37: ricarica domestica senza PWM

- Modo 2: ricarica sicura domestica/aziendale, lenta o veloce. Sul cavo di alimentazione è previsto il dispositivo PWM per garantire sicurezza durante l'operazione di ricarica. Le prese utilizzabili sono fino a 32 A (sia monofase che trifase- max 22 kW).

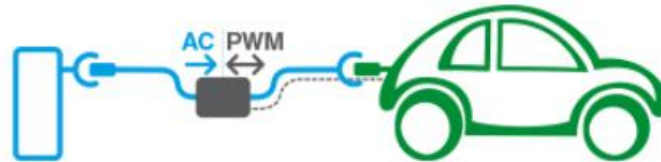


Figura 38: ricarica domestica/aziendale

- Modo 3: ricarica per ambienti pubblici, lenta o veloce. La ricarica avviene tramite un sistema di alimentazione dotato di appositi connettori ed è presente il PWM.



Figura 39: ricarica per ambienti pubblici

- Modo 4: ricarica diretta in corrente continua FAST DC, è la ricarica in corrente continua fino a 200A, 400V.



Figura 40: ricarica in corrente continua

4.5 Possibili sviluppi futuri

Uno sviluppo futuro dell'autobus elettrico oggetto di questa analisi potrebbe prevedere l'aggiunta di un secondo motore elettrico avendo, in questo modo, un motore per ciascun assale. Lo schema elettrico rimarrebbe quindi lo stesso con la sola aggiunta dell'ulteriore inverter e del secondo motore. Questo tipo di configurazione permette al secondo motore di asservire il primo, attestandosi ad un determinato regime e in grado di intervenire allo spunto o in condizioni particolari.

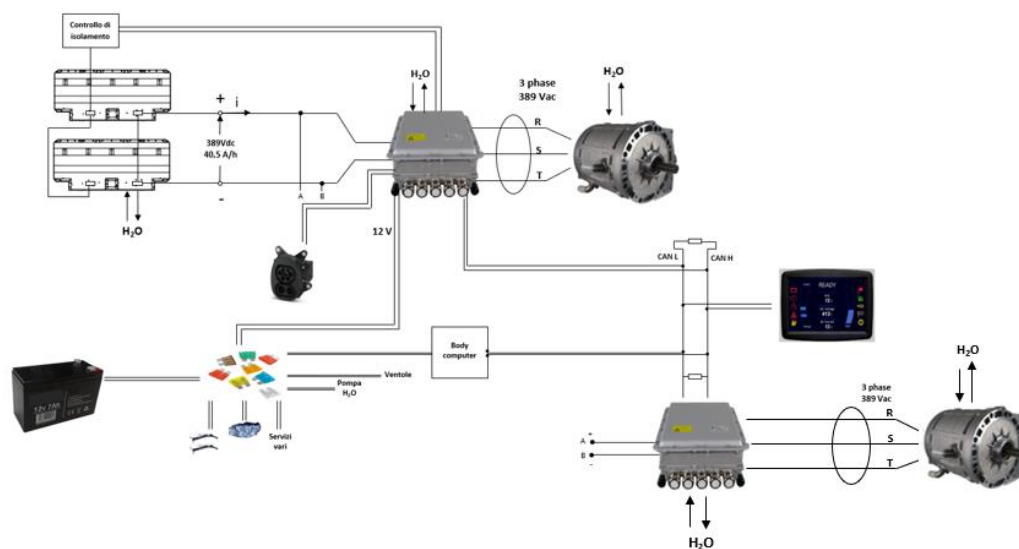


Figura 41: ipotesi schema elettrico autobus con secondo motore

Un'ulteriore ipotesi futura potrebbe inoltre riguardare l'introduzione di un sistema di ricarica a pannelli solari. Il tetto dell'autobus di dimensioni 6m x 1,7m ben si presta a questa applicazione. I pannelli sarebbero integrati nell'inverter adottando un dispositivo chiamato elevatore di tensione ovvero un trasformatore di potenza o Step-up dove la potenza in ingresso è uguale a quella in uscita a cui viene sottratta una piccola quantità dovuta all'autoconsumo dell'elevatore stesso.

Le celle solari monocristalline ad alta efficienza che potrebbero essere utilizzate sono collegate elettricamente tramite fili di rame ultrasottili che formano una maglia molto fine sulla superficie della cella. Questa tecnologia è caratterizzata da insensibilità alle microfessurazioni, che rappresentano la perdita di energia nei moduli solari.

Il binomio nuova tecnologia di connessione e l'uso di celle in silicio monocristallino rende i pannelli particolarmente potenti e affidabili. Considerando quindi le dimensioni del tetto dell'autobus potrebbero essere installati 6 pannelli solari.

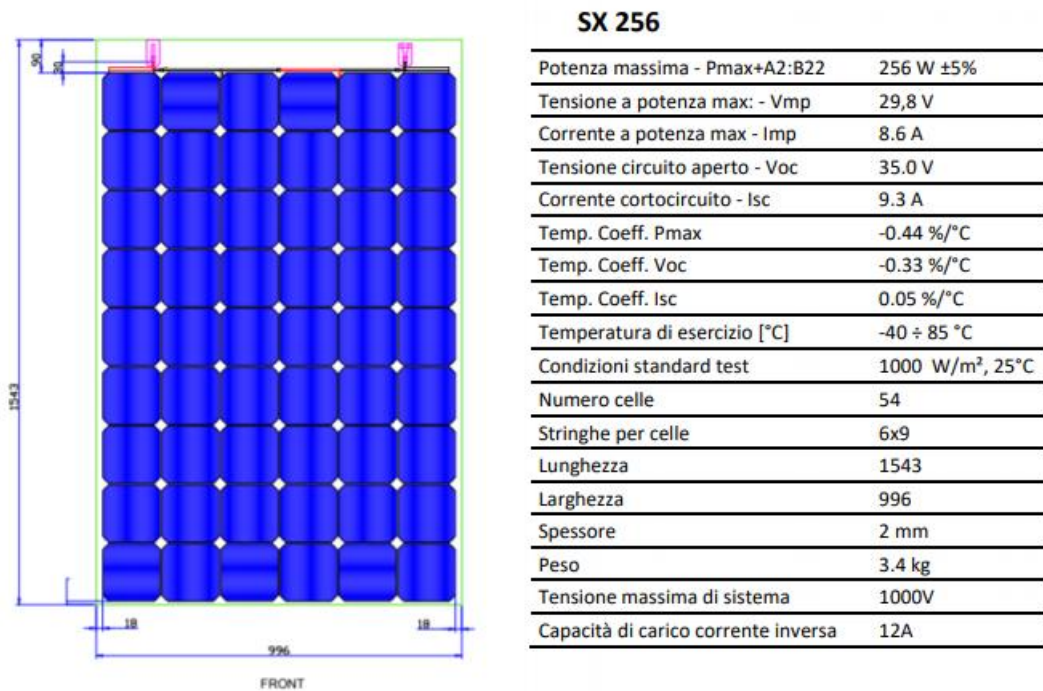


Figura 42: scheda tecnica pannello solare

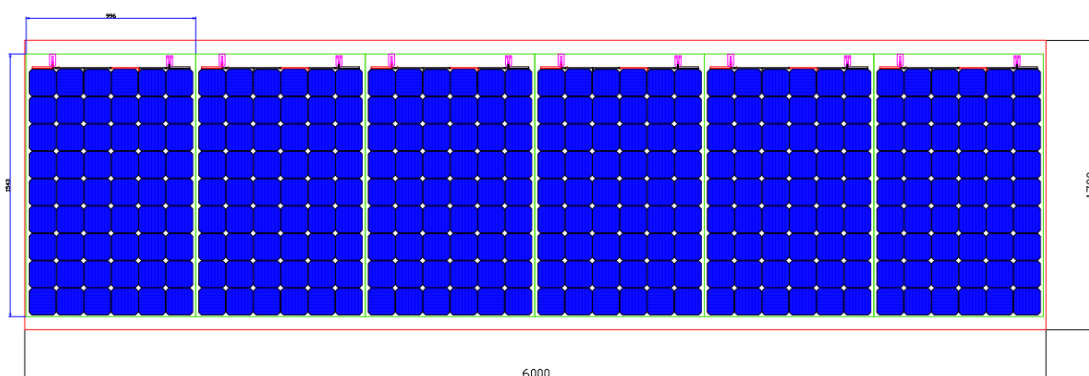


Figura 43: layout pannelli solari su autobus elettrico

5 Prova d'omologazione autobus

5.1 Omologazione e regolamenti

L'Omologazione o Certificato di conformità auto è una certificazione che viene ottenuta sulla base di una serie di prove che attestino il rispetto delle norme ambientali, tecniche e di sicurezza. In riferimento agli autobus è stato applicato il *Regolamento n.66 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UN/ECE)-Disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli di grandi dimensioni adibiti al trasporto di passeggeri rispetto alla resistenza meccanica della loro struttura di sostegno.*

Il campo di applicazione del presente regolamento riguarda *veicoli a un piano rigidi o snodati appartenenti alle categorie M₂ o M₃, di classe II o III o B, adibiti al trasporto di oltre 16 passeggeri.*

Per gli autobus appartenenti a queste categorie la prova di omologazione consiste in una prova di ribaltamento del veicolo completo al fine di verificare che la struttura di sostegno abbia la resistenza richiesta. Durante la prova il veicolo viene posto su un banco di ribaltamento, un dispositivo composto da:

- una piattaforma ribaltabile, ovvero un piano rigido che ruota attorno ad un asse orizzontale per far ribaltare il veicolo completo o sezioni di carrozzeria;
- un fosso;
- una superficie di cemento.

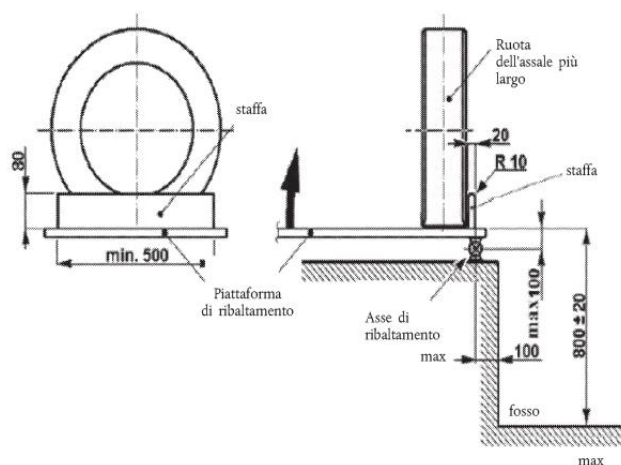


Figura 44: banco di ribaltamento per prova d'omologazione

Facendo sempre riferimento al regolamento sopra riportato, è importante chiarire il significato dei principali componenti che caratterizzano la prova in esame:

- la *carrozzeria* indica tutti gli elementi strutturali che formano i vani passeggeri, il vano del conducente, il vano bagagli e gli spazi destinati alle unità e componenti meccaniche;
- la *struttura di sostegno* indica le parti portanti della carrozzeria, contenenti elementi e componenti coerenti che contribuiscono alla capacità della carrozzeria di assorbire forze ed energia;
- la *sezione di carrozzeria* indica un'unità strutturale che rappresenta una parte della struttura di sostegno;
- la *parte rigida* indica una parte o elemento strutturale la cui capacità di deformarsi e di assorbire energia, durante la prova di ribaltamento, non è significativa;
- la *zona plastica* indica una parte speciale, geometricamente limitata, della struttura di sostegno in cui, come risultato di forze d'impatto dinamiche:
 - si concentrano deformazioni plastiche assai vaste
 - si verifica una notevole distorsione della forma originale
 - compare, in seguito alla deformazione locale, una perdita di stabilità
 - viene assorbita energia cinetica a causa della deformazione
- la *cerniera plastica* indica una zona plastica semplice formata su un elemento di tipo a sbarra (semplice tubo, montante di finestrino, ecc).

5.2 Requisiti prova d'omologazione

Affinché venga rilasciata l'omologazione è necessario che la struttura di sostegno del veicolo sia sufficientemente resistente in modo da garantire che lo spazio residuo resti intatto sia durante che dopo la prova di ribaltamento eseguita sul veicolo completo.

Questo significa che:

- *nessuna parte del veicolo, che all'inizio della prova sia al di fuori dello spazio residuo (montanti, anelli di sicurezza, portabagagli), deve penetrare nello spazio residuo durante la prova. Nel valutare la penetrazione nello spazio*

residuo, non si considerano gli elementi strutturali, che fin dall'inizio si trovino nello spazio residuo (pali verticali, divisori, cucinini, toilette);

- nessun elemento dello spazio residuo deve fuoriuscire dal perimetro della struttura deformata. Il perimetro della struttura deformata viene stabilito, consecutivamente, tra ogni montante adiacente di un finestrino e/o di una porta. Tra due montanti deformati, il perimetro è una superficie teorica, formata da linee rette che collegano i punti interni del bordo dei montanti, posti alla stessa altezza rispetto al pavimento prima della prova di ribaltamento.

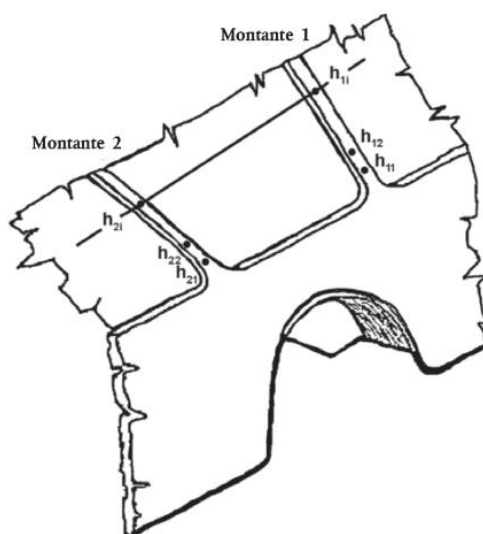


Figura 45: definizione del perimetro della struttura deformata

Lo spazio residuo si definisce spostando un piano trasversale verticale all'interno del veicolo, i cui limiti sono descritti alla figura sotto riportata, nel senso della lunghezza del veicolo — fig. (b) — nel modo seguente: il punto SR cade sullo schienale di ogni sedile esterno rivolto in avanti o all'indietro (o nella posizione presunta del sedile), a 500 mm di altezza dal pavimento sotto il sedile e a 150 mm di distanza dalla superficie interna della parete laterale. Non si tiene conto di passaruote e di altre variazioni in altezza del pavimento. Le stesse dimensioni si applicano anche al piano centrale dei ai sedili rivolti verso l'interno; se i due lati del veicolo sono asimmetrici rispetto alla configurazione del pavimento e l'altezza dei punti SR è perciò diversa, il piano centrale verticale longitudinale rifletterà la differenza d'altezza tra i due piani del pavimento alla base dello spazio residuo fig. 2 (c); la posizione più arretrata dello spazio residuo è un piano verticale posto 200 mm dietro il punto SR del sedile esterno più arretrato o

la parte interna della parete posteriore del veicolo se questa si trova a meno di 200 mm dietro il suddetto punto SR. Il limite anteriore estremo dello spazio residuo è un piano verticale posto 600 mm davanti al punto SR del sedile più avanzato del veicolo (destinato a un passeggero, all'equipaggio o al conducente) nella sua posizione più avanzata. Se i sedili più arretrati e più avanzati ai due lati del veicolo non si trovano negli stessi piani trasversali, la lunghezza dello spazio residuo su ciascun lato sarà diversa; nei vani passeggeri, dell'equipaggio e del conducente, lo spazio residuo, tra i suoi limiti estremi anteriori e posteriori, è continuo e si definisce spostando il piano trasversale verticale per tutta la lunghezza del veicolo lungo le rette che attraversano i punti SR da entrambi i lati del veicolo. Dietro e davanti al punto SR rispettivamente del sedile più arretrato e di quello più avanzato, le rette sono orizzontali; il costruttore può lasciare uno spazio residuo maggiore di quello richiesto per una data disposizione del sedile, in modo da simulare, in un gruppo di tipi di veicolo, un caso più sfavorevole e permettere futuri sviluppi della progettazione.

a) e c) sezioni trasversali

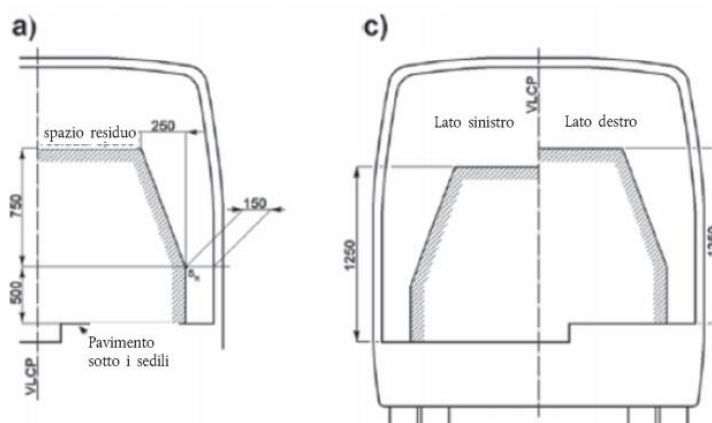


Figura 46: definizione spazio residuo sezione trasversale

b) sezione longitudinale

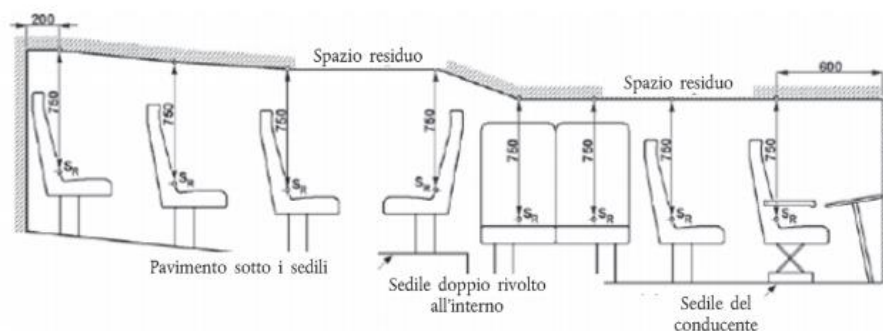


Figura 47: definizione spazio residuo sezione longitudinale

Lo scopo della seguente analisi consente di simulare il comportamento della struttura del veicolo quando questo è soggetto alla prova di ribaltamento in modo da individuare le caratteristiche fondamentali della struttura in termini di sicurezza dei passeggeri; questa procedura consente di combinare affidabilità, economicità e semplicità ed è in grado di rispettare non solo i rigidi requisiti previsti dalla normativa ma anche di eseguire la prova in maniera rapida ed evitando la costosa prova pratica che è sempre distruttiva.

Il ribaltamento prevede un'inclinazione laterale in cui il veicolo, posto sulla piattaforma ribaltabile, viene inclinato fino alla posizione di equilibrio instabile che è la posizione in cui si ha l'effettivo inizio della prova.

Per simulare il comportamento del veicolo e la relativa rotazione che conduce alla caduta dal banco di prova e trovare quindi la forza che si determina sulla sovrastruttura come conseguenza dell'urto, è necessario stimare la posizione del baricentro prendendo come origine del sistema di riferimento il punto di contatto della ruota anteriore sinistra con il terreno e indicando con x l'asse longitudinale, con y l'asse verticale e con z quello trasversale.

Coordinate baricentro	
x	3873 mm
y	900 mm
z	826 mm

Figura 48: coordinate baricentro autobus

La massa in ordine di marcia del veicolo, cioè la massa del veicolo compreso il liquido di raffreddamento, i lubrificanti, il carburante, la ruota di scorta e il conducente, è pari a 5000 kg.

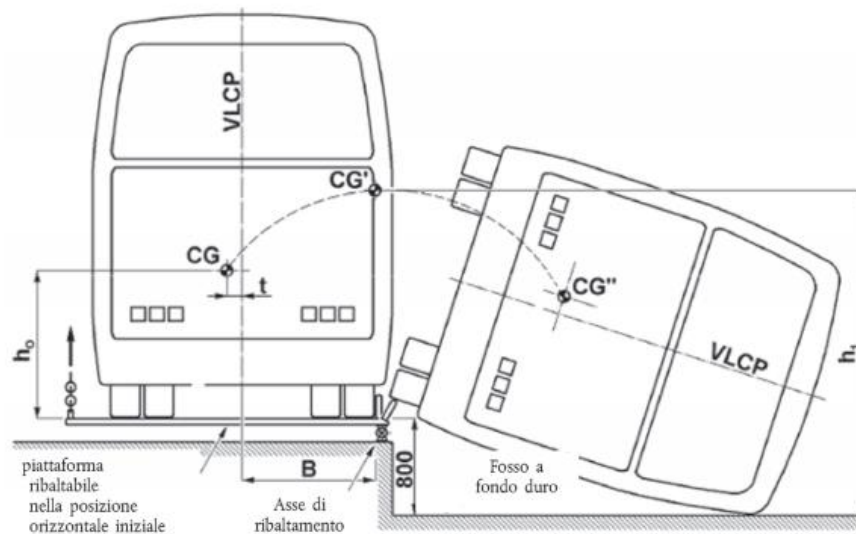


Figura 49: prova di ribaltamento da regolamento

Il modello in esame viene quindi collocato su un piano rotante che è posizionato a 800 mm dal piano di battuta e che si muove con una velocità di rotazione inferiore a $5^\circ/s$.

E' possibile quindi osservare lo spostamento del baricentro dalla posizione iniziale a quella finale attraverso quella di equilibrio instabile:

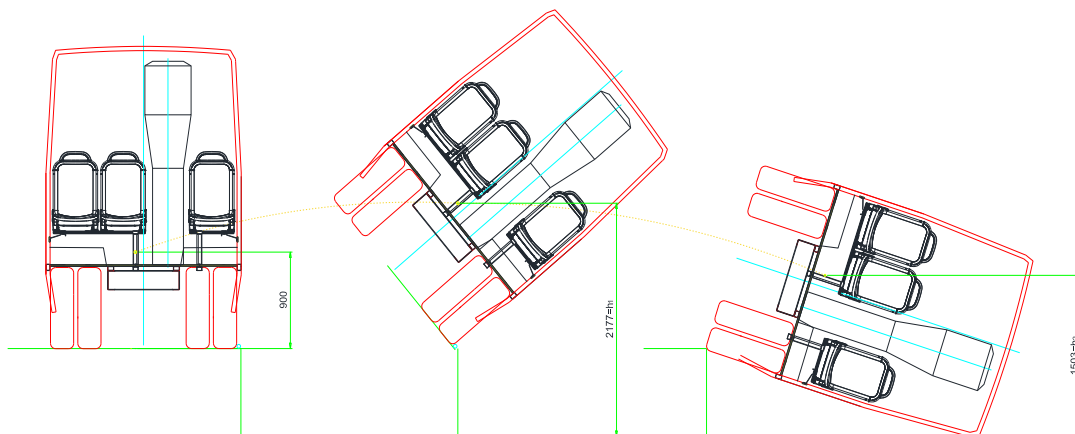


Figura 50: prova di ribaltamento autobus

Facendo sempre riferimento al Regolamento n.66 è stata calcolata l'energia totale che la struttura di sostegno deve assorbire attraverso la seguente formula

$$E_T = 0,75 Mg\Delta h$$

in cui:

M= massa a vuoto in ordine di marcia del veicolo privo di dispositivi di ritenuta per occupanti,

g= costante gravitazionale,

Δh = movimento verticale in metri del baricentro del veicolo durante la prova di ribaltamento.

Nel caso specifico si avrà:

M= 5000 kg

g= 9,81 m/s²

$\Delta h = (h_1 - h_2) = 2177 - 1503 = 674 \text{ mm} = 0,674 \text{ m}$

Dunque l'energia totale che la struttura di sostegno deve assorbire è pari a

E= 24794, 7 J che sarà ripartita per il numero di centine considerate pari a 6.

5.3 Analisi provini

Gli elementi resistenti della struttura sui quali verrà effettuata la prova sono rappresentati da centine e montanti realizzati in acciaio AISI 304. Al fine di comprendere il comportamento del materiale sono stati analizzati dall'azienda dei provini di sezione rettangolare di dimensioni 80 mm x 40 mm, di 4 mm di spessore e lunghezza 1000 mm. Per l'esecuzione della prova sono state seguite le prescrizioni contenute nel *Regolamento n.66* citato in precedenza.

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata un'apparecchiatura composta da:

- macchina di trazione di 10 000 kg;
- cella di carico da 2500 kg;
- cella di carico da 10 000 kg;
- telaio di supporto per i provini costituito da struttura in acciaio e da due cilindri di appoggio liberamente rotanti (cuscinetti a sfere) di diametro 60 mm e interasse 600 mm giacenti su un piano orizzontale;
- punzone di carico costituito da cilindro in acciaio non rotante di diametro 20 mm

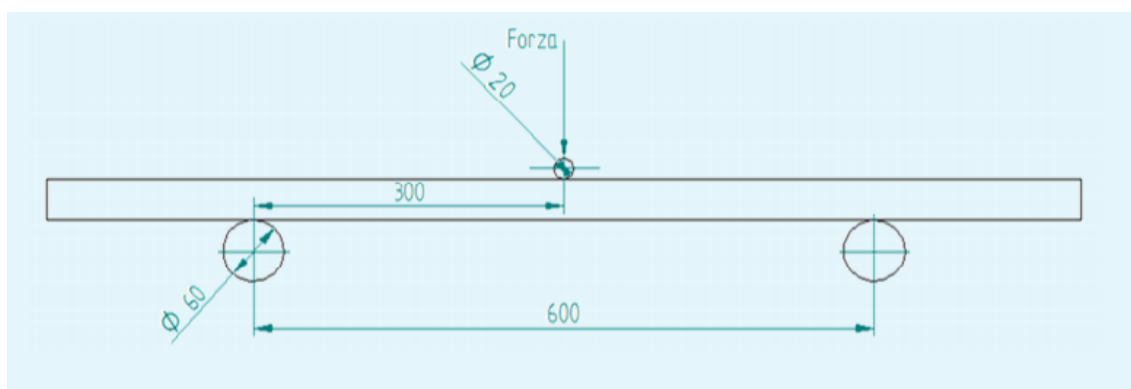


Figura 51: schema apparecchiatura per analisi provino

La macchina è stata azzerata e il provino è stato posizionato sul telaio. Il punzone è stato messo in contatto con il provino con una forza compresa tra 4 e 10 N e la macchina è stata avviata con una velocità di 20 mm/min, la forza e lo spostamento sono stati acquisiti con una frequenza di 5 Hz. Successivamente, una volta superato il picco di forza, la macchina è stata portata manualmente a 100 mm/min. La prova è terminata quando il punzone ha registrato uno spostamento di 350 mm.

I risultati della prova sono stati la forza e lo spostamento applicati al punzone che hanno permesso di ottenere un grafico con il momento flettente in funzione dell'angolo di una barra incastrata. L'angolo φ e il momento flettente M_f sono stati ottenuti con delle formule che tengono conto di alcuni parametri tra cui: spessore della barra, diametri di appoggi e punzoni, del modo in cui il punzone si appoggia al campione durante la deformazione:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{s-k}{300} \right) + \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{k}{A} \right) \text{ [deg]}$$

$$Mf = \frac{F}{2000 \cos \varphi} A \cdot \cos \left(\operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{k}{A} \right) \right) \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Dove:

s= spostamento del punzone;

F= forza del punzone;

k= altezza provino + raggio nullo + raggio punzone;

$$A = \sqrt{(s-k)^2 + 300^2}$$

La correttezza dei calcoli è stata verificata confrontando:

$$E = F \cdot \frac{s}{2} \text{ ed } E = Mf \cdot \varphi$$

I risultati ottenuti sono stati riportati in un grafico momento flettente-angolo la cui zona di interesse riguarda principalmente i valori di angolo compresi tra 3,5° e 15° in cui l'andamento della curva può essere linearizzato permettendo il calcolo dell'integrale sotteso alla curva stessa e potrà essere confrontato con l'energia che deve dissipare la struttura durante l'urto.

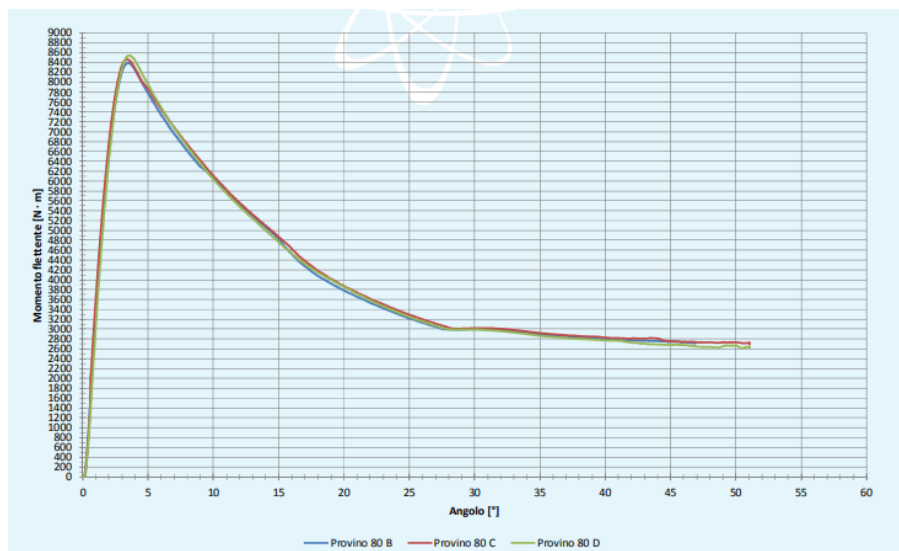


Figura 52: grafico momento flettente-angolo per tubolari 80x40

5.4 Analisi struttura

Nell'analisi vengono esaminati gli elementi resistenti della struttura rappresentati da centine e montanti; nello specifico è stata considerata una singola centina costituita da un tubolare a sezione rettangolare di dimensioni 80x40x4 mm.

Per individuare il punto di applicazione della forza generata nell'impatto con il suolo si fa sempre riferimento al regolamento, nel quale l'angolo di applicazione della forza è definito dalla seguente relazione:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsen\left(\frac{800}{H_c}\right)$$

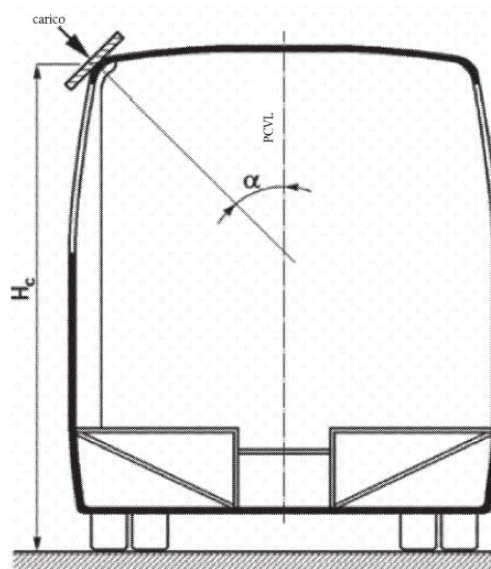


Figura 53: applicazione della forza alla sezione di carrozzeria

Dove H_c in mm indica l'altezza dal terreno del corrente longitudinale superiore del veicolo e il PCVL è il piano centrale verticale longitudinale.

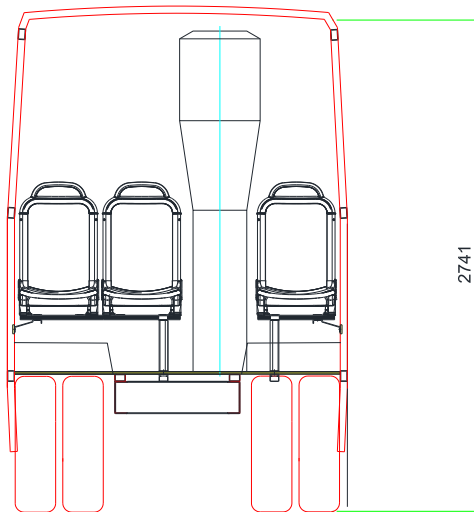


Figura 54: applicazione della forza sull'autobus

Nel caso in esame, considerando $H_c=2741$ si ottiene un angolo α pari a circa 73° .

La centina analizzata sul quale agirà la forza può essere idealmente schematizzata nel seguente modo:

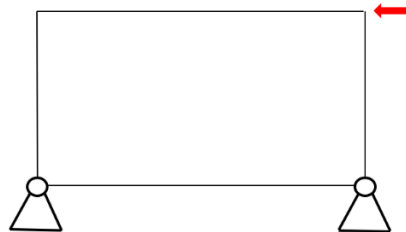


Figura 55: schema telaio autobus

All'aumentare della forza si avrà la formazione di una deformata elastica e un aumento delle sollecitazioni:

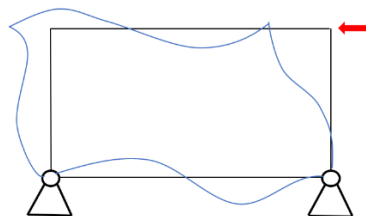


Figura 56: deformata telaio autobus

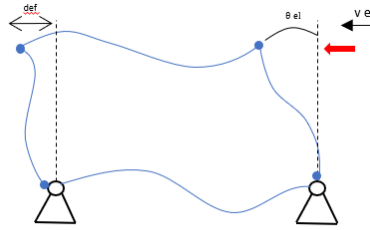


Figura 57: deformata elastica telaio autobus

Si formeranno al massimo 4 zone di interesse dove al limite la struttura può rispondere con 4 punti che possono diventare zone di plasticizzazione e quindi cerniere plastiche. Il sistema risponderà prima con un $\theta_{elastico}$ e poi con un $\theta_{plastico}$. Dall'equilibrio dell'energia si ha che l'energia d'urto è data dalla somma dell'energia associata alla deformazione elastica e di quella associata alla deformazione plastica; l'energia assorbita dalla deformazione plastica è nettamente prevalente rispetto a quella elastica. In questo modo è possibile calcolare l'energia associata alle cerniere plastiche conoscendo il numero di queste ultime e moltiplicando lo stesso per il momento ultimo plastico della sezione di profilo con il quale è stato composto il telaio e quindi tubolari a sezione rettangolare 80x40x4 mm e la rotazione plastica.

Ogni incremento della forza esterna che ha portato il profilo ad andare oltre il campo elastico comporta l'innescare di cerniere plastiche che dissipano l'energia dell'urto.

5.5 Analisi FEM

L'analisi eseguita attraverso il software Ansys ha riguardato la singola centina. Nella modellizzazione si assume il pianale come deformabile, vincolato in corrispondenza delle traverse del pianale all'altezza in cui queste si collegano all'autotelaio. Il vincolo prevede che siano impediti tutte le traslazioni lungo gli assi X, Y, Z e tutte le rotazioni intorno agli assi X, Y e Z.

Per verificare il comportamento della sovrastruttura è stata quindi eseguita un'analisi non lineare per determinare le deformazioni.

Si adotta una distribuzione uniforme lungo tutta la lunghezza del corrente superiore della sovrastruttura; il carico applicato, fornito dall'azienda, è pari a 156 000 N il quale viene uniformemente ripartito tra le sei centine che costituiscono il telaio del veicolo. Sulla singola centina agirà quindi una forza pari a 26 000 N.

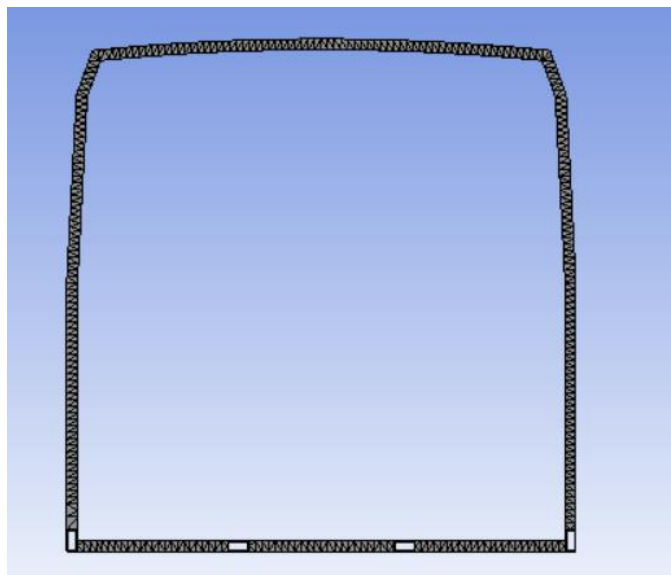


Figura 58: mesh centina



Figura 59: mesh centina

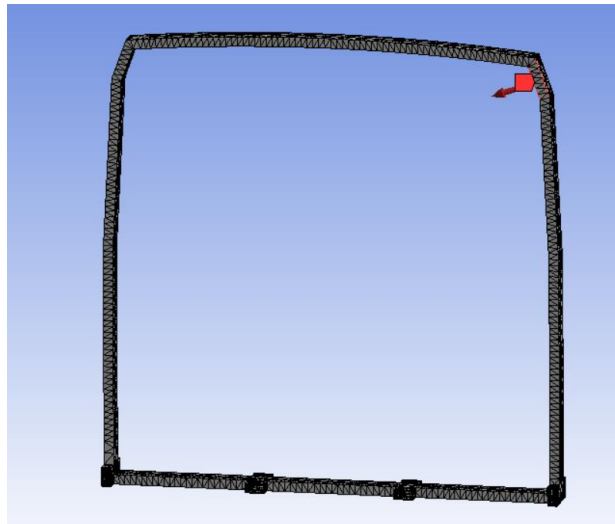


Figura 60: forza agente sulla centina

Di seguito viene riportata una centina nella quale viene rappresentato lo spazio residuo che non deve essere invaso durante e dopo la prova di ribaltamento ottenuto seguendo il regolamento.

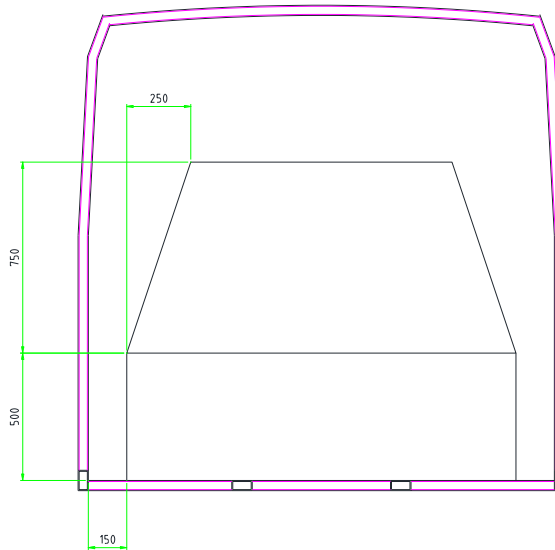


Figura 61: spazio residuo su centina in esame

Andando ad analizzare le deformazioni totali sulla singola centina, il massimo valore che si registra è pari a 111,8 mm il quale si concentra in corrispondenza del tetto dell'autobus.

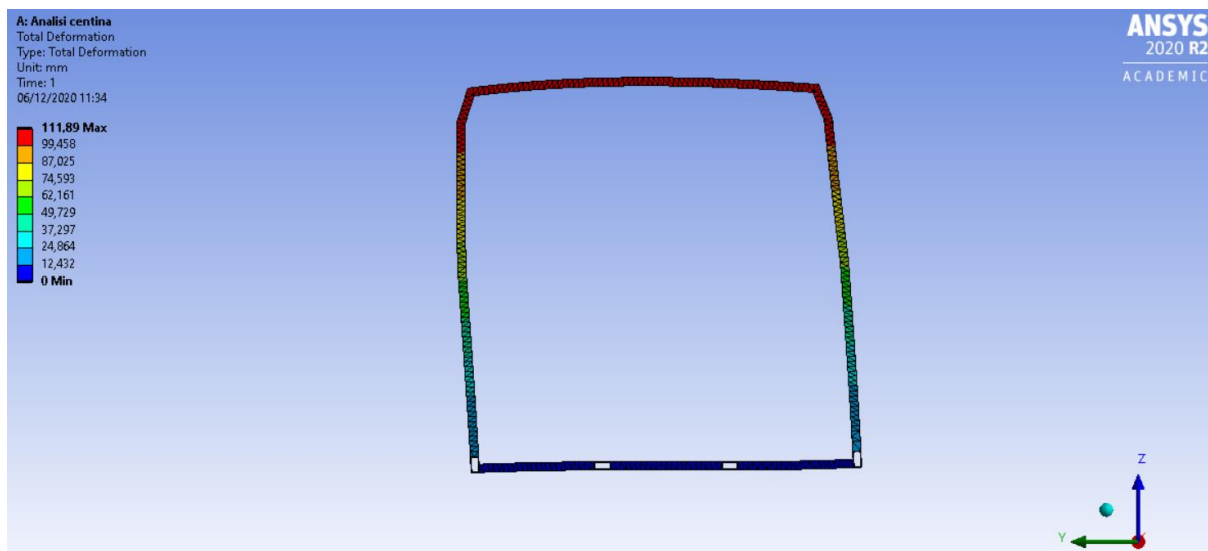


Figura 62: deformazione totale centina

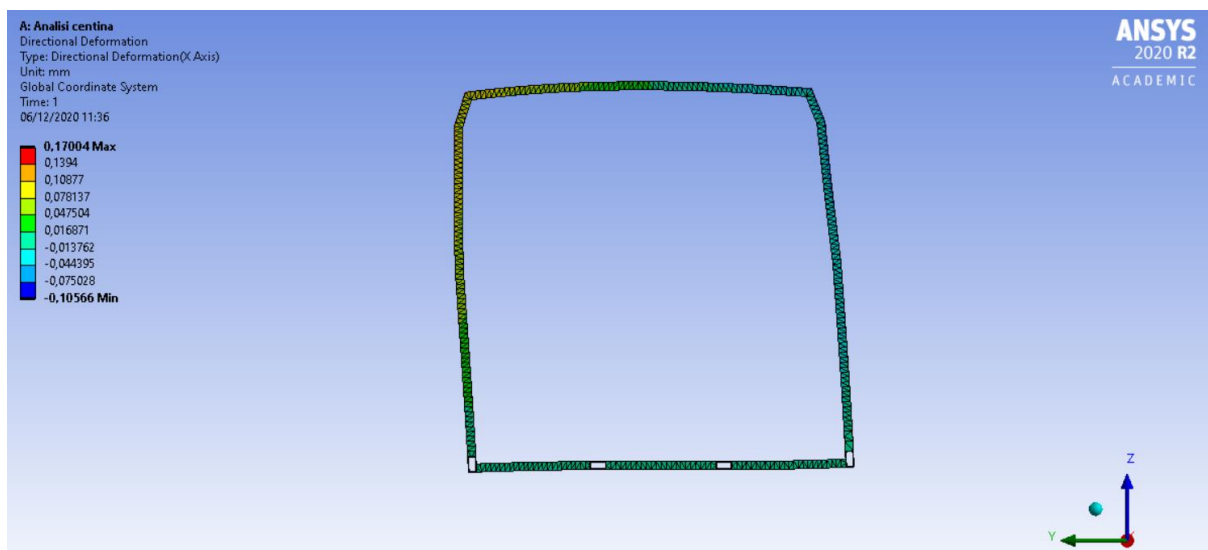


Figura 63: deformazione centina lungo asse x

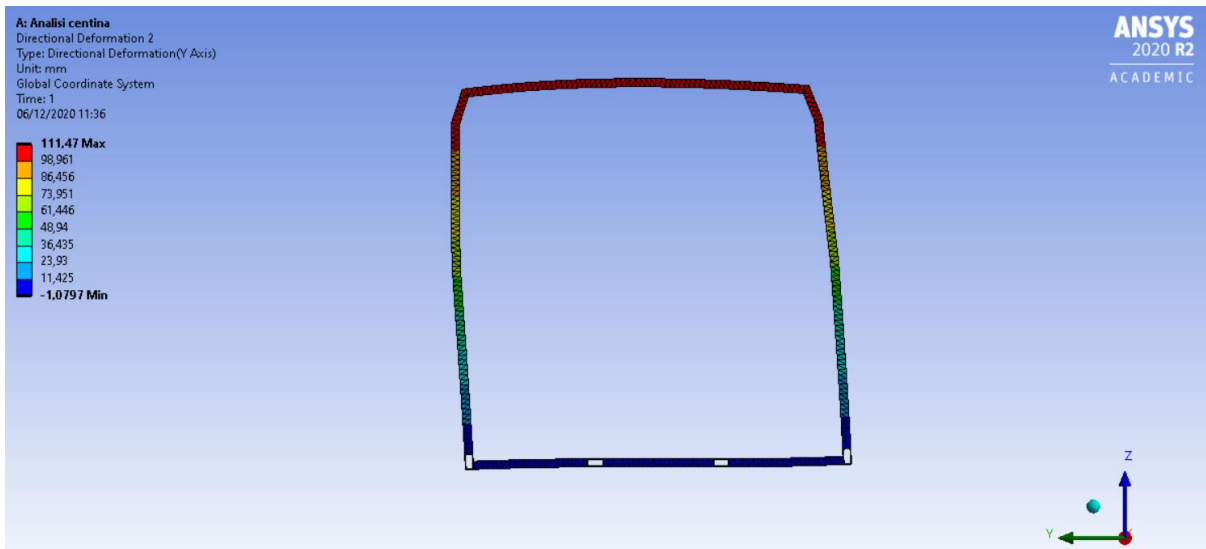


Figura 64: deformazione centina lungo asse y

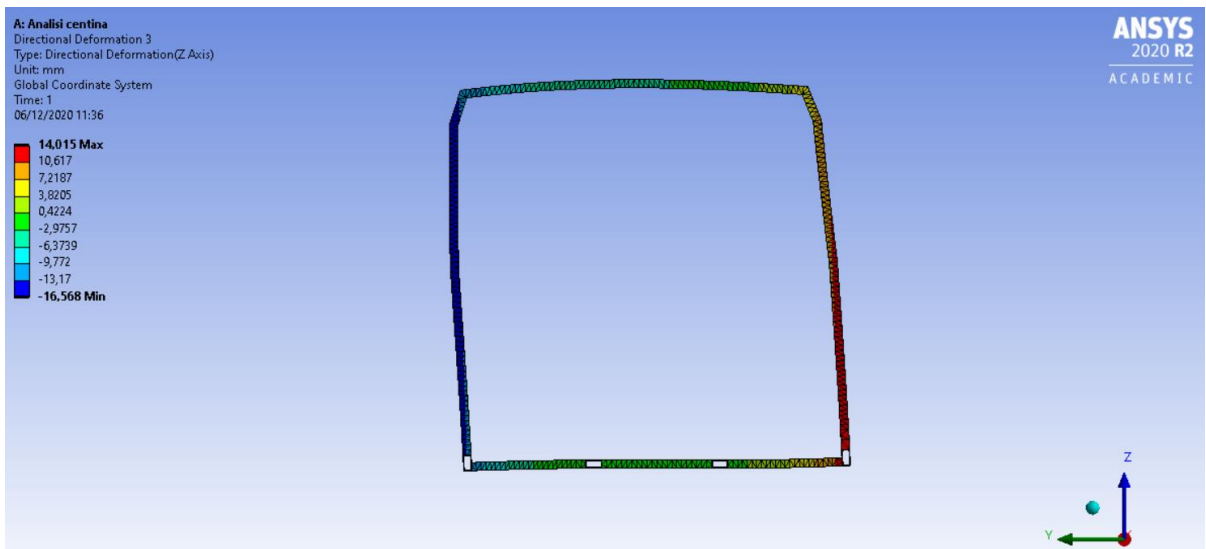


Figura 65: deformazione centina lungo asse z

Analizzando in modo qualitativo si osserva che la componente prevalente di deformazione è quella che si verifica lungo l'asse y pari a 111,47 mm che ci permette di affermare, in relazione allo spostamento trasversale, il buon esito della prova sulla base dei dati riportati nel precedente regolamento in quanto si assumeva che la massima deformazione trasversale non doveva superare i 150 mm al fine di non invadere lo spazio riservato ai passeggeri.

Sono state brevemente analizzate anche le tensioni che agiscono sulla struttura le quali evidenziano le zone più sollecitate in cui si ha la formazione di quattro cerniere plastiche come si era già preannunciato. In queste zone si concentrano valori di tensione oltre i limiti di snervamento.

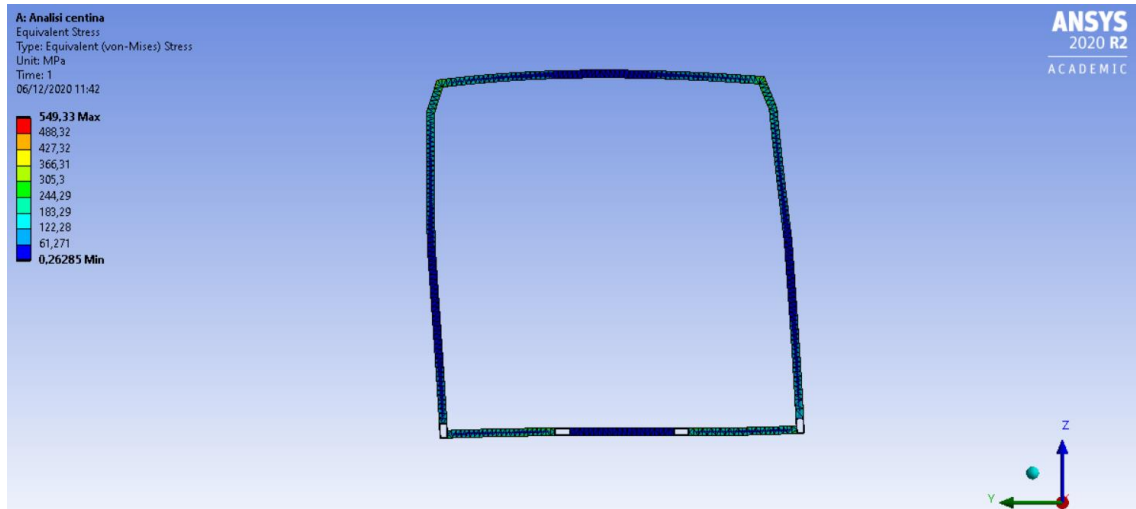


Figura 66: andamento tensioni centina

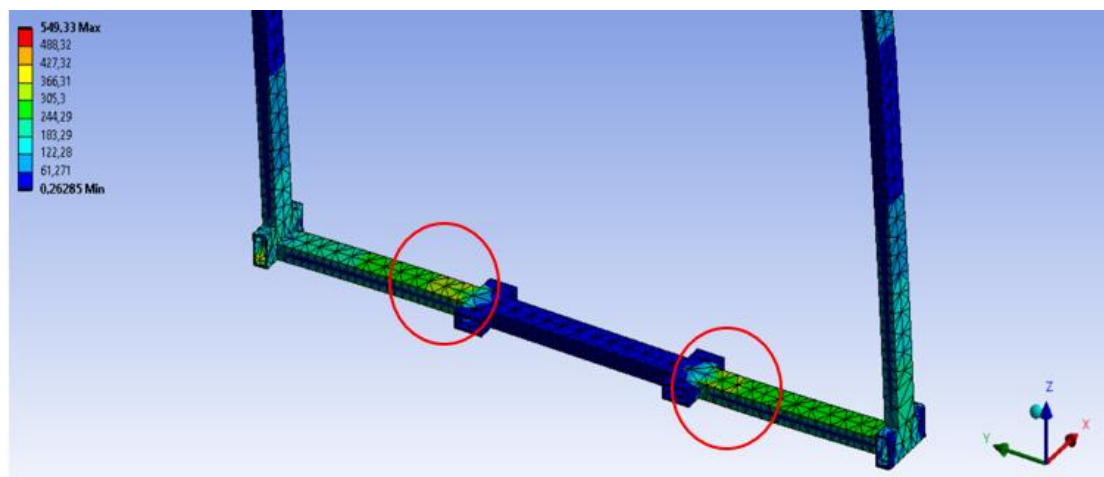


Figura 67: cerniere plastiche inferiori

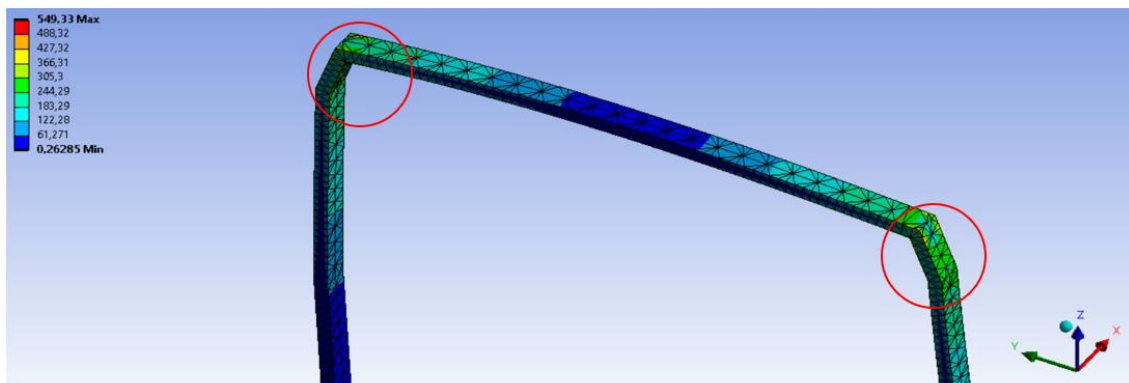


Figura 68: cerniere plastiche superiori

6 Conclusioni

In conclusione la presente trattazione riporta ciò che è stato svolto durante l'attività di tirocinio formativo in azienda nel corso del quale non solo si è avuta la possibilità di seguire gli step che caratterizzano lo sviluppo di un nuovo veicolo, dalle prime fasi fino alla progettazione, ma anche di migliorare le capacità di utilizzo dei software più importanti usati in ambito di modellazione e simulazione come SolidEdge, AutoCad e Ansys.

Le analisi eseguite e le illustrazioni riguardano una minima parte di tutto il mondo che si cela dietro ad una semplice vettura, se si parla di veicoli elettrici questo discorso si fa ancora più ampio dal momento che essi rappresentano un campo in via di sviluppo e destinato a cambiare per sempre il modo di fruire della mobilità.

7 Bibliografia

1. *Regolamento n.66 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UN/ECE)-Disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli di grandi dimensioni adibiti al trasporto di passeggeri rispetto alla resistenza meccanica della loro struttura di sostegno.*
2. *Regolamento n. 107 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE)-Disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli di categoria M₂ o M₃ con riguardo alla loro costruzione generale” e alla “Direttiva 70/156/CEE del Consiglio, del 6 febbraio 1970, concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative all'omologazione dei veicoli e motore e dei loro rimorchi.*
3. *Report “Electric vehicles in Europe” European Environment Agency*
4. *Norma CEI EN 61851-1 “Sistema di ricarica conduttiva dei veicoli elettrici”*