

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Elettrica

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Elettrica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Conversione di Autobus Dotati di
Motorizzazione Diesel in Trazione Elettrica**



Relatore

Prof. Michele Angelo Pastorelli

Candidato

Aurelio Trofè

Ottobre 2017

Sommario

Introduzione	1
1. Panoramica Generale Dei Veicoli Ibridi	2
1.1 Tipologie Applicative Per I Veicoli Ibridi.....	2
1.2 Veicoli Ibridi.....	3
1.2.1 Veicolo Ibrido Complesso.....	4
2. Tipologia Batteria.....	5
2.1 Generalità.....	5
2.2 Caratteristiche Tecniche	5
2.2.1 Caratteristiche di ricaricabilità	6
2.3 Tipologie Di Accumulatori.....	6
2.4 Principio Di Funzionamento.....	7
2.4.1 Batteria Al Piombo Acido.....	7
2.4.2 Batterie Al Piombo Sigillate	7
2.4.3 Batterie Al Gel	7
2.4.4 Batteria Nichel - Cadmio (Ni - Cd).....	8
2.4.5 Batteria Nichel Metallo Idruri.....	8
2.4.7 Batteria Al Litio	9
2.4.8 Batteria Litio - Polimeri (Li - Pol)	9
2.4.9 Batteria Nichel - Cloruro Di Sodio (Ni - NaCl).....	9
2.4.10 Supercondensatori.....	10
2.4.11 Vantaggi e Svantaggi	12
2.5 Confronto Batterie – Supercondensatori	13
2.6 Confronto tra i tipi di batteria	13
2.7 Aspetti Ambientali.....	15
2.8 Aspetti Economici	17
3. Modello Matematico Della Batteria	19
3.1 Caratteristiche Fondamentali	19
3.2 Autoscarica	22
3.3 Modelli Matematici	22
3.4 Stima Del Soc	26
3.5 Vita Utile	26
3.6 Valori Nominali	27
3.7 Relazione Tra E-Soc	27
3.8 Tecniche Di Ricarica	28
4. Progetto Di Conversione	32
4.1 Premessa	32

4.2 Dati Tecnici	35
4.2.1 Dinamica Del Veicolo.....	36
4.2.2 Recupero In Frenata	39
4.3 Pacco Batterie	40
4.3.1 Batterie Al Piombo	40
4.3.2 Batterie Al Litio	41
4.3.3 Supercondensatori.....	42
4.4 Ricarica Conduttiva E Induttiva	43
4.5 Fattori Di Dimensionamento	46
4.5.1 Energia Massica	46
4.5.2 Densità Di Energia	47
4.5.3 Cicli Di Vita.....	47
4.5.4 Costo	47
5. Sistemi Di Ricarica E Impatto Sulla Rete E Sull'ambiente.....	48
5.1 Connessione Tra Veicolo E Rete Elettrica	48
5.2 Tecnica Di Ricarica A Bordo E A Terra	48
5.3 Modalità Di Connessione	49
5.4 Ricarica Induttiva	51
5.5 Tempi Di Ricarica	51
5.6 Scelta Della Tipologia Di Ricarica	51
5.7 Stazioni Di Ricarica.....	52
Conclusioni.....	53
Bibliografia.....	i
Capitolo 1	i
Capitolo 2	i
Capitolo 3	i
Capitolo 4	ii
Capitolo 5	ii

Introduzione

Negli ultimi decenni l'organizzazione mondiale della sanità ha rivolto particolare attenzione al problema dell'inquinamento atmosferico dovuto ai gas di scarico delle vetture con motorizzazione a combustione, in quanto la conseguenza di tale inquinamento è dato dall'aumento di mortalità delle persone che vivono in zone ad alto traffico urbano ed ai forti cambiamenti climatici come l'innalzamento delle temperature con conseguente scioglimento dei ghiacciai che noi tutti oggi purtroppo assistiamo. Per ovvie ragioni sono state introdotte norme assai più restrittive che impongono alle case costruttrici automobilistiche, la costruzione e quindi la diffusione di veicoli dotati di sistemi che riducono notevolmente le emissioni di sostanze inquinanti nell'ambiente. Sicuramente si è osservato un drastico abbassamento dei valori d'inquinamento ma il problema non è stato completamente debellato ma semplicemente ridotto, quindi la tendenza dei progettisti negli ultimi anni è stata quella di intraprendere una strada differente, ovvero allontanarsi in maniera progressiva dalla dipendenza della materia prima necessaria ad alimentare i motori a combustione, cioè il petrolio, e da qui iniziò l'idea di accoppiare un motore a combustione a un motore elettrico dando vita al veicolo ibrido. La necessità di accoppiare le due diverse tipologie di motori è stata fatta in quanto il solo motore elettrico inizialmente alimentato da un pacco batterie con caratteristiche tecniche sicuramente più scadenti di quelle attuali, risultava non sufficiente a sostenere l'intero carico di lavoro che un tradizionale veicolo a combustione attua durante la sua vita lavorativa, questo a causa di diversi fattori quali ad esempio la scarsa autonomia degli accumulatori elettrochimici, ma ancor di più sono i tempi di rifornimento o sarebbe più appropriato dire i tempi di ricarica dell'intero pacco batterie, dove risultavano estremamente lunghi e quindi esso da solo era un sistema per niente efficiente. Il progresso tecnologico nel campo degli accumulatori elettrochimici ma anche sui diversi sistemi di ricarica ha fatto sì che oggi un veicolo con motorizzazione puramente elettrica possa essere completamente paragonabile ad uno con motore a combustione, e considerato che il futuro automobilistico è proiettato in tale direzione è opportuno approfondire tale studio affinché il suo sviluppo possa essere significativo sul beneficio che tutti noi possiamo trarne in termini di inquinamento. Questo lavoro di tesi si articolerà appunto nello studio di veicoli elettrici, ma in particolar modo nella conversione di mezzi già esistenti alimentati con motori a combustione in veicoli elettrici puri. Verrà effettuata inizialmente una panoramica su quali sono le tecnologie di veicoli ibridi ed elettrici allo stato dell'arte (Capitolo 1) per poi elencare quali sono le caratteristiche elettriche tra le diverse tipologie di accumulatori elettrochimici oggi maggiormente in uso nel panorama dei veicoli elettrici (Capitolo 2). In seguito sarà opportuno fare uno studio sul modello matematico delle batterie per capirne in fondo le proprietà statiche e dinamiche (Capitolo 3), necessarie per il dimensionamento del progetto che sarà quello della conversione da motore diesel a elettrico di un bus del parco veicoli dell'azienda trasporti torinese GTT (Capitolo 4), effettuando infine il confronto tra diverse tipologie di accumulatori utilizzati nel progetto (Capitolo 5).

1. Panoramica Generale Dei Veicoli Ibridi

1.1 Tipologie Applicative Per I Veicoli Ibridi

Ad oggi i veicoli ibridi stanno sostituendo progressivamente i vecchi motori a combustibili fossili. Del gruppo degli ibridi si possono individuare quattro varianti:

1. Elettrici
2. A propulsione ibrida;
3. Ibrido a idrogeno (H);
4. A Idrogeno (H).

Il funzionamento basato sul power train è schematizzato nella Figura 1.1.1. Per alimentare il motore elettrico c'è il bisogno che ci sia un pacco batterie che ne permetta la trazione. Attualmente si utilizzano accumulatori come batterie. La ricerca però si sta proiettando verso l'impiego dei supercondensatori e affini.

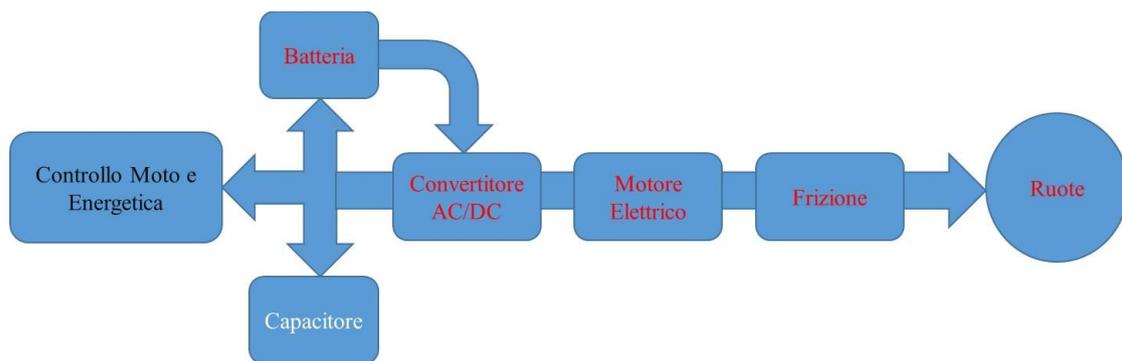


Figura 1.1.1 Veicoli elettrici: schema *power train*

Viste le coppie sviluppate e le potenze ottenute con i motori elettrici, questi, si stanno facendo sempre più strada come alternativa ai veicoli a trazione endotermica. Inoltre i motori elettrici non hanno bisogno di omogeneizzare la coppia e per questo vi è la totale assenza di cambio e frizione. Una delle caratteristiche più appetibili dei veicoli a trazione elettrica è che questi possono recuperare l'energia che altrimenti andrebbe persa. Un esempio è l'aliquota di energia ottenuta dall'impianto frenante. Inoltre la trazione elettrica è ECO-friendly, nel senso che abbatte quasi a zero le emissioni di CO₂. L'unico freno alla rivoluzione elettrica sono le performance che questi veicoli possono offrire. Ad esempio hanno autonomie che si attestano intorno ai 150 chilometri, con una velocità media che si attesta a circa 130 km/h. Inoltre la fase di carica impiega in media circa sei ore.

1.2 Veicoli Ibridi

Un'alternativa oggi già diffusa sono i veicoli dotati di motore ibrido. Questi tipi di motore sono il connubio vincente tra i pregi di ogni tecnologia ibridata. Si può dire che il motore ibrido sfrutta una sorta di fase modale, in cui a seconda dell'esigenza può far funzionare uno dei due motori. Quando è richiesta molta potenza, si sfruttano i cavalli dell'endotermico e nella successiva frenata si attiva il motore elettrico che interviene recuperando energia. Nel percorso urbano si preferisce attivare la trazione elettrica. Gli ibridi si dividono nella variante in serie e quella in parallelo¹:

- veicolo ibrido in serie²: Il motore elettrico è messo in serie ad un motore endotermico. Quest'ultimo può anche avviare la fase di carica del motore elettrico. Il motore che però fornisce la potenza necessaria alla trazione è quello elettrico. La fonte di energia che supporta il motore elettrico può essere anche una cella combustibile ad Idrogeno (H). Quindi in sostanza il flusso di potenza, come detto precedentemente, si muove dal motore ausiliario all'elettrico. In frenata invece il motore elettrico ricarica gli accumulatori. Il funzionamento è sintetizzato in Figura 1.1.2;
- veicolo ibrido parallelo³: qui il motore elettrico condivide lo status di motore primario con quello endotermico. Il funzionamento è sintetizzato in Figura 1.1.3.

La variante dell'ibrido in serie è quella che si comporta in modo molto vicino alla trazione elettrica. Nella tipologia in parallelo, il motore elettrico risponde alle richieste extra di potenza del motore termico. Infatti questi due motori possono lavorare insieme. Uno svantaggio può essere che la componente elettrica è progettata solo per lavorare a carichi parziali di potenza. I veicoli ibridi, sono in grado di funzionare sia a trazione elettrica, sia a motore termico e infine normalmente come ibrido. Ulteriori svantaggi si presentano per l'ibrido in parallelo, che per fungere ha bisogno di una minuziosa progettazione, soprattutto dei dispositivi di trasmissione. Questi inoltre contribuiscono ad assorbire un'aliquota di energia che abbassa la carica disponibile. Nella variante in parallelo entrambi i motori sono connessi alle ruote. Una strada gestionale che viene spesso adottata è quella di far produrre al motore endotermico potenza costante.

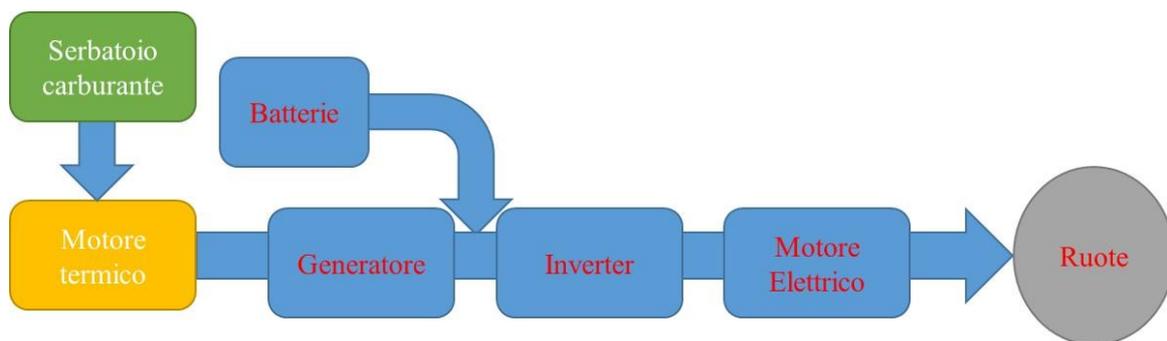


Figura 1.1.2 Schema veicolo ibrido in serie

¹ Ali Emadi, Young Joo Lee, and Kaushik Rajashekara, "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, Giugno 2008.

² S. Barsali, "Sistemi elettrici di bordo: attualità e prospettive", Pisa, 14 giugno 2002.

³ S. Barsali, "Sistemi elettrici di bordo: attualità e prospettive", Pisa, 14 giugno 2002.

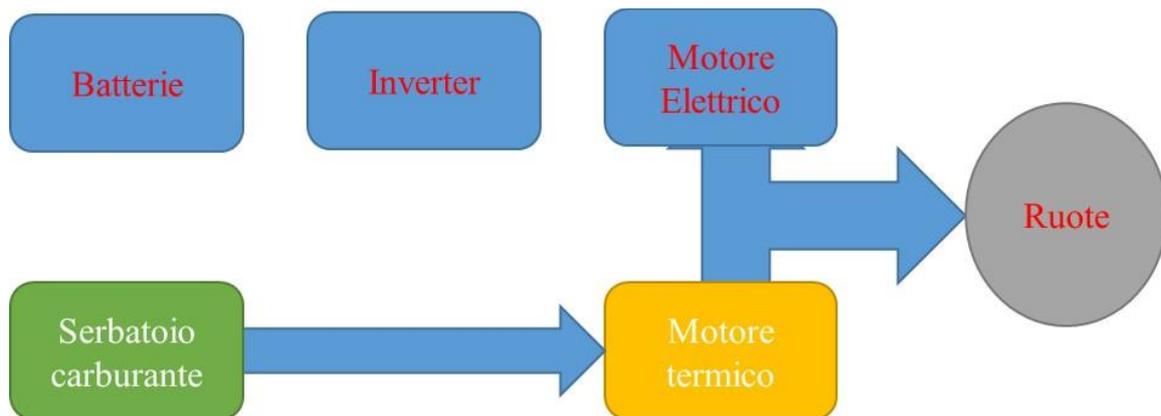


Figura 1.1.3 Schema veicolo ibrido in parallelo

Quando succede che il motore termico produca potenza extra, allora quest'ultima aliquota viene convogliata agli accumulatori per mezzo del motore elettrico. L'ibrido in parallelo riesce a risparmiare molto carburante, rispetto alla variante in serie. Come detto però a fronte di una complessa struttura in fase progettuale. Come ulteriore variante è possibile adottare un ibrido serie-parallelo, questa tecnologia ovviamente porta dei vantaggi ma risulta essere molto complessa. Grazie a quest'ultima variante il veicolo risponderà con maggiore brillantezza ai molteplici casi reali, ma la nota dolente rimane la voce dei costi che bisogna sostenere per questa variante ibrida.

1.2.1 Veicolo Ibrido Complesso

Il veicolo ibrido complesso è una variante a se. La struttura di funzionamento è simile all'ibrido serie-parallelo, ma il flusso di potenza in questo caso è bidirezionale. Questo rende l'ibrido complesso più adattabile alle situazioni reali e nell'interscambio funzionale tra i motori.

2. Tipologia Batteria

2.1 Generalità

Il metodo applicato al principio con cui rendere funzionante una batteria è fondato essenzialmente sulla trasformazione dell'energia chimica in energia elettrica. Da un punto di vista terminologico è importante differenziare e specificare alcuni termini impiegati quali pila, batteria, accumulatore, poiché anche se vengono usati indifferentemente ovvero sinonimi, in realtà hanno diverse caratteristiche:

- **La pila** è un generatore elettrochimico primario, ovvero non ricaricabile;
- **L'accumulatore** è un generatore elettrochimico secondario, cioè ricaricabile.

Sia l'una che l'altra tipologia di generatori è composta da uno o più elementi in serie che compongono ciò che viene comunemente individuata come batteria.

- **La batteria** è un dispositivo capace di accumulare energia mediante un processo chimico che può essere descritto in modo sintetico come lo scambio di ioni fra due elettrodi immersi in un elettrolita; se poi, questi vengono connessi a un circuito esterno, allora si scambiano elettroni dando origine ad una corrente elettrica. Tipologie di accumulatori ne esistono di diverso tipo, per capacità elettriche, composizioni chimica, forma e/o dimensioni.

2.2 Caratteristiche Tecniche

Per rendere l'analisi efficace e puntuale è opportuno chiarire alcune nozioni fondamentali nel campo applicativo degli accumulatori. In particolare poi, la conoscenza delle caratteristiche tecniche consente un'adeguata progettazione in termini di dimensionamento elettrico, ambientale ed economico. Nell'elenco che segue sono appunto riportate le fondamentali caratteristiche.

1. **Tensione (V)**: valore nominale di un elemento moltiplicato per il numero degli elementi del pacco batteria;
2. **Capacità (Ah)**: quantità di elettricità scaricabile con modalità specificate; in certe batterie viene consigliato di utilizzare solamente una certa percentuale della capacità;
3. **Contenuto di energia (kWh)**: quantità di energia immagazzinabile dalla batteria; dipende dalla corrente di scarica;
4. **Energia specifica** riferita al volume (**Wh/m³**) o riferita al peso (**Wh/kg**): è la quantità di energia espressa in wattora fornibile dalla batteria, messa in relazione o allo spazio occupato dalla stessa o dal suo peso;
5. **Resistenza interna (mΩ)**: esprime la resistenza delle parti interne della batteria; varia in funzione dello stato di carica (SOC) e della temperatura; esso può influire sulla variazione di tensione durante la scarica e sulla densità di potenza;
6. **Efficienza energetica**: è il rapporto tra l'energia scaricata e l'energia necessaria per riportare la batteria al suo stato iniziale di carica;
7. **Efficienza di capacità (efficienza-Ah)**: è il rapporto tra la scarica (espressa in Ah) e la carica necessaria per riportare la batteria al suo stato iniziale di carica; Il valore percentuale dell'efficienza energetica è più basso rispetto a quello dell'efficienza-Ah, dal momento che la tensione durante la scarica è minore rispetto alla tensione durante

la carica. Queste quantità sono fundamentalmente diverse e non andrebbero mai confrontate tra loro;

8. **Fattore di carica (%)**: è l'inverso dell'efficienza-Ah e dà un'indicazione della carica extra che viene iniettata nella batteria durante la fase finale di carica;
9. **Ciclo di vita (numero di cicli)**: un ciclo è una carica seguita da una scarica della batteria; il ciclo di vita si considera terminato quando la capacità della batteria scende al di sotto di un valore prestabilito;

2.2.1 Caratteristiche di ricaricabilità

Approfondire meglio le caratteristiche di ricaricabilità, ci farà capire come influiscono sia i tempi di ricarica, sia gli eventuali fenomeni di “memoria” sulle batterie. Infatti numerose ricariche a bassa intensità e lunghi periodi di inattività degradano l'efficienza di una batteria. Secondo dati sperimentali, la durata si riduce fino al 90%.

- **Durata**: La durata di una batteria si misura in numeri di cicli carica-scarica. In particolare si contano tutti i cicli elementari fino a quando la tensione non scende al di sotto di un valore di riferimento.

- **Impatto ambientale**: Per approfondire questa caratteristica c'è bisogno di un'analisi completa del ciclo di vita di una batteria. Si procede quindi per mezzo di *life cycle analysis*. Queste analisi saranno utili per capire meglio come smaltire le batterie e il loro impatto ambientale.

- **Costo** : Il costo di una batteria è uno dei contributi principali nella fase di analisi dei costi. Questo perché la batteria è di fondamentale importanza per il funzionamento di un veicolo elettrico. Il costo deve permettere alla produzione di stimare un prezzo finale competitivo, in modo da produrre veicoli che possano avere mercato contro i motori tradizionali.

- **Sicurezza di impiego**: Un'altra analisi attenta da fare è quello di stabilire e di venire a conoscenza degli standard di sicurezza che una batteria deve rispettare. Questa comprenderà tutta la stima dei pericoli, nell'impiego, in fase di ricarica, in fase di scarica e smaltimento ecc.

2.3 Tipologie Di Accumulatori

Le batterie destinate alla trazione dei veicoli, sono scelte per fornire potenza. In questo e nei prossimi paragrafi, ci si prefigge di valutare le varie tipologie di batterie e rilevare gli eventuali punti di forza. Sarà fatta ora, una panoramica accompagnata dai dettagli tecnici sui vari modelli, e infine verrà valutata la consistenza tecnico-economica.

I principali tipi di batterie sono:

- Piombo acido
- Nichel - Cadmio (Ni - Cd)
- Nichel metallo idruri (Ni-mh)
- Nichel - Zinco (Ni - Zn)

- Zinco - aria
- Litio - Ioni (Li - ioni)
- Litio - Polimeri (li - pol)
- Nichel - Cloruro di sodio (Ni – NaCl; dette batterie Z.E.B.R.A.)
- Supercapacitori

2.4 Principio Di Funzionamento

Ecco una breve sintesi sul principio di funzionamento e sulle caratteristiche costruttive di ogni variante.

2.4.1 Batteria Al Piombo Acido

Una batteria al piombo acido è costituita da una serie di celle elettrochimiche in cui agiscono:

- biossido di piombo (PbO_2) al catodo;
- piombo spugnoso (Pb) in polvere all'anodo;
- elettrolita costituito da una soluzione acquosa di acido solforico (H_2SO_4).

La reazione sfruttata per il funzionamento per questa batteria è una chiamata di *ossidazione o redox*. In questo tipo di reazione viene tolto ossigeno alla sostanza, per effetto delle sostanze *riducenti* che si legano all'ossigeno. La reazione inversa fa sì che sia la sostanza a cedere ossigeno, e le sostanze vengono chiamate ossidanti. Quando questo tipo di batteria non è collegata a nessun circuito, sono presenti reazioni ioniche che favoriscono il passaggio di ioni dal polo riducente al polo ossidante. Si ottiene così una soluzione in equilibrio di ioni anioni e ioni cationi che insieme alle molecole dissociate, favoriscono l'elettrolisi. La batteria al Piombo Acido è molto affidabile ed ha un lungo ciclo di vita utile. Inoltre funziona bene a basse temperature. I contro sono invece che è povero di energia specifica e cosa più rilevante contiene Piombo (Pb) che è un metallo tossico e pesante.

2.4.2 Batterie Al Piombo Sigillate

Sul mercato però ad oggi sono presenti la seconda generazione di questi accumulatori che hanno emarginato il problema presentando delle celle sigillate od utilizzando materiale in gel. In quelle al Piombo sigillate, l'elettrolita è chiuso in vari scompartimenti. Questi sono resi ermetici e permettono la ricombinazione dell'idrogeno (H) e dell'Ossigeno (O), elementi che si sviluppano durante la fase di carica. Un cambiamento importante che ha permesso un aumento della qualità di queste batterie è stato l'utilizzo del Calcio (Ca) al posto dell'Antimonio (Sb). In questo modo non si deve più rabboccare l'acqua nelle batterie. Questi accumulatori inoltre sono dotati di valvole di sfogo per evitare eventuali aumenti di pressione accidentali.

2.4.3 Batterie Al Gel

Le batterie al Gel, grazie all'utilizzo di sostanze gelatinose, evitano il rischio di rilascio di sostanze altamente esplosive come l'idrogeno (H) e l'ossigeno (O). L'ossigeno infatti si ricombina con l'idrogeno. Il gel funge da elettrolita, in quanto è composta da una soluzione

acida di acqua, gel di silice, e acido solforico. Un vantaggio evidente dall'impiego di accumulatori al Gel è che è praticamente impossibile il rilascio nell'ambiente di acido e sostanze nocive. Anche queste batterie non richiedono manutenzione, in quanto sono sigillate. L'unico difetto che presentano è che per la fase di ricarica devono essere sottoposte a correnti e tensioni molto più basse del normale, poiché si rischia di danneggiarle in modo permanente.

2.4.4 Batteria Nichel - Cadmio (Ni - Cd)

Gli accumulatori al Nichel - Cadmio (Ni – Cd) hanno un catodo di idrossido di nichel e un anodo di idrossido di cadmio, divisi da un separatore. La batteria utilizza un elettrolita alcalino. La struttura dell'accumulatore, in generale, è formata da un contenitore che è fatto di metallo munito di una valvola auto sigillante. Di solito il mezzo elettrolita è idrossido di Potassio (KOH). Questo porta diversi vantaggi, tra i quali, l'eliminazione totale di eventuali rabbocchi. Per evitare il rilascio pericoloso di idrogeno, si sovradimensiona l'elettrodo negativo. I principali vantaggi che presentano questa tipologia di batterie sono l'alta energia specifica ed un lungo ciclo di vita utile. Inoltre a basse temperature, si comportano meglio e la manutenzione è quasi azzerata. La potenza specifica e le rapide ricariche fanno di questa batteria una di quelle più apprezzate per la trazione stradale. L'unica cosa, che spesso sfiducia i produttori e i progettisti sono i costi elevati che presenta questa tecnologia. C'è anche da ricordare che per via della presenza del Cadmio (Cd), il suo smaltimento deve essere sicuro nell'interesse dell'ambiente e della sicurezza. La tensione disponibile ai poli è pari a 1.4 Volt.

2.4.5 Batteria Nichel Metallo Idruri

Gli accumulatori al Nichel – Metallo Idruri sono quelle che spesso vengono scelte in alternativa alle precedenti Nichel – Cadmio. Queste infatti sono, in generale, più efficienti e meno costose. Per evitare di utilizzare il Cadmio (Cd), elemento fortemente tossico e nocivo, si preferisce concepire l'elettro con una lega metallica. Il Nichel (Ni) è invece l'elemento costitutivo dell'elettrodo positivo. La Capacità rispetto alle concorrenti è di quasi tre volte più grande. Le leghe che compongono l'elettrodo negativo di solito vanno sotto la sigla di AB5. A indica un mix di elementi come Lantanio (La), Cerio (Ce), Neodimio (Nd), Praseodimio (Pr). B, invece indica Nichel (Ni), Manganese (Mn) o Alluminio (Al). Questi elementi immersi nel mezzo elettrolita servono a creare un mix di idruri metallici. Alla base di questi composti c'è l'anione idrogeno (H⁻). Questi composti durante il funzionamento evitano il pericoloso rilascio di Idrogeno (H). Anche questi accumulatori utilizzano l'idrossido di potassio (KOH) come mezzo elettrolita. Tra i principali punti peculiari vi è l'alta sostenibilità ambientale, la buona energia specifica e i cicli di carica sono più corti. Tra i difetti che si possono sottolineare, invece ci sono noti fenomeni di "autoscarica". Inoltre sottoposti ad elevate correnti in fase di ricarica, tendono a surriscaldarsi. Questi punti del tutto migliorabili, negli anni hanno catalizzato numerosi studi e ricerche. Sono per lo più utilizzate nell'ambito della propulsione ibrida e per questo ad oggi sono prodotte su larga scala.

2.4.5.1 Batteria Nichel - Zinco (Ni - Zn)

Questa tipologia di batterie hanno elevate energia e potenze specifiche. Purtroppo, invece hanno un tempo di vita breve e prima di entrare a regime, hanno bisogno di una fase iniziale di transizione. Questi accumulatori sono parte di quelli al Nichel Metallo Idruri. La variante in queste batterie sta nell'utilizzo sull'anodo dello Zinco (Zn). Tra i vantaggi, oltre a quelli già elencati nell'introdurre queste batterie, vi è il basso livello di inquinamento, per effetto

dell'assenza di elementi tossici o dannosi per l'ambiente. L'energia specifica è favorita dall'alta differenza di potenziale per cella elementare pari a 1.6 Volt. Molti sono gli studi e le ricerche che stanno investendo le loro risorse su questo modello di accumulatori. Ad oggi però non ci sono risultati apprezzabili per l'impiego sui veicoli a trazione.

2.4.7 Batteria Al Litio

Le batterie al Litio (Li) hanno la capacità di immagazzinare enormi quantità di energia, riuscendo ad avere un rapporto di peso tra i più leggeri in assoluto. Tra gli svantaggi però c'è sicuramente l'elevata reattività del Litio (Li). Infatti in caso di elevate temperature o incendi possono dare luogo a pericoli ad alto rischio per la sicurezza. Per questo motivo si preferisce sviluppare in fase di progetto un sistema di monitoraggio della cella elementare. Un altro freno all'implementazione su larga scala viene anche dai costi della tecnologia. Sull'elettrodo negativo si ha un mix di Litio (Li) immersi in una matrice di grafite. Sull'elettrodo positivo invece viene utilizzato un sale di Litio. Anche nel mezzo elettrolita si usa un composto a base di Litio (Li) e etilencarbonato. La tensione agli elettrodi è pari a 3.7 Volt.

2.4.8 Batteria Litio - Polimeri (Li - Pol)

Gli accumulatori Litio – Polimeri sono uno step tecnologico successivo che utilizza questo elemento dalle proprietà elettriche notevoli. Una delle caratteristiche tecniche è che il mezzo elettrolita a base di Litio (Li) è inserito in un polimero allo stato solido, infatti questa tipologia è fatta di batterie a secco. Tra i vantaggi esistenti nella conformazione di questi accumulatori, c'è sicuramente il fatto di una bassa pericolosità dovuta all'utilizzo di componenti solide piuttosto che liquide. La struttura delle celle elementari è singolare, in quanto è formata da laminato polimerico, fogli di polimero molto flessibili. Ogni cella elementare è formata da cinque lamine differenti e ogni cella è collegata in serie alle altre. Tra tutti i tipi, questa è una delle batterie più versatili, poiché la sua struttura la rende adattabile a molteplici utilizzi.

2.4.9 Batteria Nichel - Cloruro Di Sodio (Ni - NaCl)

Queste batterie, vengono chiamate anche accumulatori ZEBRA. Ad oggi, sono tra le più performanti batterie. Uno dei principali svantaggi è l'elevata temperatura di esercizio, di circa 260 °C. Utilizzando il Cloruro di Sodio hanno zero impatto ambientale. Il problema è che il loro ciclo di vita utile dura al massimo 10 giorni. Anche in questo caso date le alte temperature c'è bisogno di prevedere, in fase di progetto, un sistema di controllo di ogni singola cella elementare. La temperatura di esercizio deve essere mantenuta costante, per preservare le funzionalità principali della batteria. Questa viene mantenuta costante durante il funzionamento dalle resistenze interne, ma quando l'accumulatore rimane inattivo da giorni si ha bisogno di effettuare un riscaldamento ausiliario esterno. Questo apparente svantaggio porta gli accumulatori ZEBRA ad essere le più adatte per l'utilizzo sui mezzi pubblici o sui mezzi commerciali a trazione elettrica. E questo offre dei vantaggi:

- Le performance e il ciclo di vita utile è indipendente dalla temperatura esterna;
- Sistema di raffreddamento semplificato.

2.4.10 Supercondensatori

I supercondensatori, ad oggi, sono tra i dispositivi più performanti. Tra i principali vantaggi c'è che il loro processo di carica e scarica avviene in modo istantaneo senza conseguenze. Questo comporta l'eliminazione di perdite di efficienza nel tempo. Gli svantaggi sono però molto influenti sulla poca diffusione. I costi della tecnologia, risultano molto alti. Inoltre possiedono una bassa densità energetica. Un condensatore, in generale, ha una struttura che può essere accostata a quella di un accumulatore. Infatti è composta da un catodo e un anodo con una membrana che li separa e nel mezzo del quale vi è posto il mezzo elettrolita. Mettendo sotto tensione l'anodo e il catodo, si produce una corrente elettrica. Il catodo e l'anodo sono fatti in modo da aumentare la superficie e hanno una porosità tale che possa servire a tale scopo. Questi dispositivi hanno un'altissima capacità specifica, questo è dovuto ad almeno tre fattori. Si può iniziare a dire che la breve distanza intermolecolare tra cationi e anioni e la loro distanza relativa ad anodo e catodo, influisca in modo rilevante. L'elevata superficie di quest'ultimi inoltre, contribuisce ulteriormente. Infine piccole reazioni che hanno luogo sugli elettrodi danno un aumento aggiuntivo.

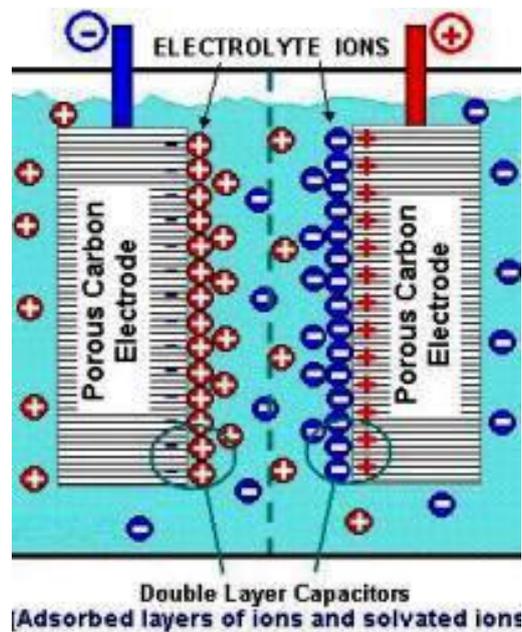


Figura 2.1 Schema di funzionamento di un supercondensatore⁴

⁴ Fonti www.electricitystorage.org; www.energoclub.it

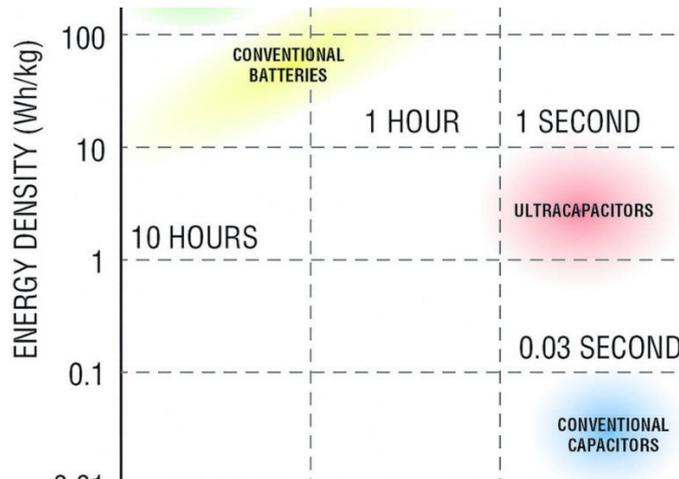


Figura 2.2 Circuito di carica per supercondensatori⁵

Quello che però crea maggiore energia, che fa funzionare i supercondensatori è il primo contributo di cui abbiamo parlato. Non è presente alcun flusso di particelle elettriche tra gli elettrodi e il mezzo elettrolitico. Quello che distingue i supercondensatori dai semplici accumulatori è una rapida cinetica chimica. Il fatto che abbiano alta capacità e potenze specifiche elevate fanno preferire in molti casi i supercondensatori alle batterie tipiche. Inoltre hanno una potenza specifica molto alta che contribuisce a migliori performance nel processo di carica e scarica immediata. Purtroppo però, il limite dei supercondensatori sta nella scarsa energia che questi riescono a stoccare. Di solito i materiali utilizzati per costruire l'anodo ed il catodo sono Alluminio (Al), munito di un film di carbone attivo che ne aumenta la capacità specifica. Questi tipi di supercondensatori sfruttano trasformazioni elettrostatiche. Se invece gli elettrodi sono composti da materiali polimerici o altri ossidi metallici, le trasformazioni che si sfruttano si rifanno al fenomeno dell'induzione. Il separatore, oltre a fungere da guida alla corrente di cariche, fa emergere una tensione tra i due elettrodi. In effetti matematicamente si può dire che l'energia totale aumenta con la differenza di potenziale tra le due lastre e quindi anche in funzione della carica. A seconda del mezzo che separa gli elettrodi avrà una variabile produzione di tensione. Infatti di solito, si agisce proprio sul mezzo separatore per aumentare le prestazioni dei supercondensatori. Una particolare caratteristica che distingue questi particolari dispositivi è il dielettrico, infatti è formato da due lastre a strati che ne aumentano le proprietà elettriche. Questo però è anche un loro punto debole. Infatti gli strati dielettrici non essendo più molto spessi, possono lavorare solo a basse tensioni, di solito non superiori ai 3 Volt. Una risoluzione che si era fatta strada negli anni era quella di ricreare numerose celle in serie, ma questo aumentava anche la resistenza del circuito. A queste problematiche si è ovviato impiegando nanomateriali, che avendo una certa porosità aumentano la densità di carica. Uno dei nanomateriali più utilizzati è il carbone attivo che è molto poroso ed ha notevoli proprietà elettriche.

⁵ Fonte www.electronicanews.it; John Bazinet, Steve Knoth e Sam Nork - Linear Technology; 23 novembre 2015

In generale: $Q = CV[C]$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} [F]$$

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 [J]$$

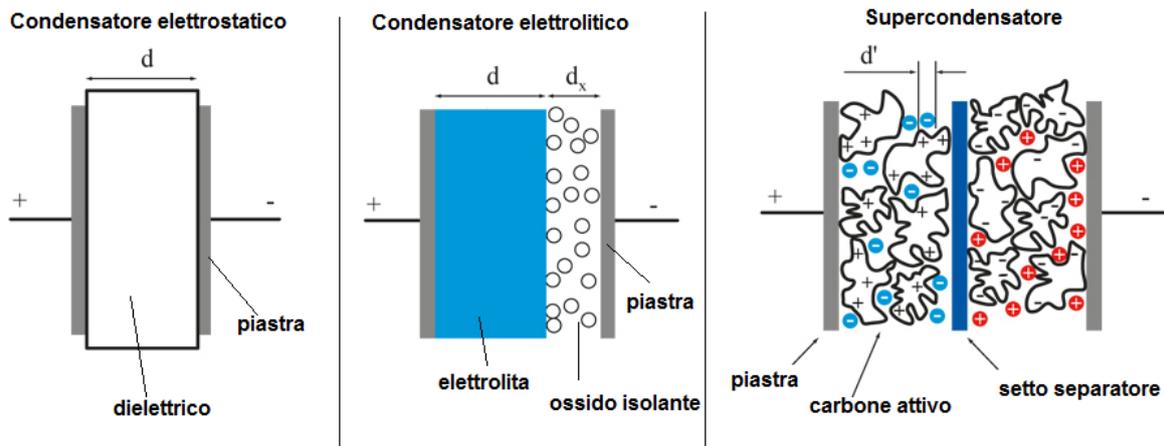


Figura 2.3 Confronto tra condensatori tradizionali e supercondensatori⁶

L'unico inconveniente che ancora oggi è oggetto di svantaggio è che la struttura con il carbone attivo, limita il deposito di carica. Questo infatti è l'oggetto di discussione di numerosi studi di ricerca. Una strada tesa al miglioramento è stata quella proposta dal MIT (Massachusetts Institute of Technology) che ha implementato dei nanotubi di Carbonio (C), che aumentando la superficie, aumentando di conseguenza anche la densità di carica e la capacità di stoccare energia. Tra gli altri risultati ottenuti, c'è stato un contenuto ingombro ed un numero di cicli elementari carica-scarica di circa mille volte maggiori degli accumulatori tradizionali. Stesso valore è stato raggiunto per quel che riguarda le potenze specifiche rispetto alle tradizionali batterie. Fondamentale per la progettazione di un eventuale veicolo alimentato con questo dispositivi.

2.4.11 Vantaggi e Svantaggi

I principali vantaggi dall'utilizzo dei supercondensatori sono:

- Cicli carica/scarica mille volte più numerosi;
- Elevata autonomia;
- Maggiore potenza specifica;
- Cicli elementari rapidi;
- Resistenza interna molto bassa;
- Basso impatto ambientale;
- Elevate proprietà elettriche.

I principali svantaggi sono:

- Basso potenziale di stoccaggio energia;
- Fenomeno di Autoscarica rapido in caso di inutilizzo;
- Tensioni di esercizio per celle molto basse;

⁶ Fonte: www.energyhunters.it ; articolo pubblicato il 07/17/2014

2.5 Confronto Batterie – Supercondensatori

Se utilizziamo le principali caratteristiche elettriche emerge un confronto molto interessante tra le batterie tradizionali e i supercondensatori. Grazie ad esso si possono vedere chiaramente i vantaggi.

	BATTERIE	SUPERCONDENSATORI
Energia Specifica	30-45 Wh/Kg	4-5 Wh/Kg
Potenza Specifica	60-300 Wh/Kg	5000 Wh/Kg
Cicli di Carica	1000 cicli	500.000 cicli
Tempo di Ricarica	Ore	Minuti
Rendimento	70%-90%	90%-97%

Tabella 2.1 Confronto vantaggi e svantaggi tra Batterie e Supercondensatori

2.6 Confronto tra i tipi di batteria

Si farà ora un confronto globale tra le diverse tipologie di batterie, facendo un distinguo utile tra quelle adatte per i veicoli elettrici e quelle per i veicoli ibridi. Il ciclo di vita di una batteria, è influenzato maggiormente dalla modalità d'impiego dell'accumulatore stesso. Infatti:

- Più dura una fase di scarica, più è forte la sua influenza sul ciclo di vita utile della batteria;
- Siccome in fase di esercizio la batteria viene sottoposta a pesanti cicli di carica e scarica, c'è da dire che rispetto al dato di ciclo di vita utile ci può essere una variazione;
- Il pacco batteria può essere caratterizzato in modo diverso. Infatti non necessariamente il pacco e le celle devono funzionare allo stesso modo. Alcune possono operare diversamente.

Dalla documentazione tecnica risalta che le performance di un accumulatore possono essere variabili a seconda del range di temperature d'esercizio. Infatti di solito viene esplicitato un range ottimale, nel quale avrò una batteria più performante. Questo problema è praticamente inesistente per la tecnologia che adottano le batterie al Nichel -Cloruro di Sodio (Ni-NaCl), infatti queste devono lavorare ad una temperatura di 270 °C per poter essere performanti. Si distinguono infine, due tipi di accumulatori in base all'utilizzo per il quale vengono messi a punto: le batterie per i veicoli elettrici anche chiamati BEV (Battery Electric Vehicle) che sono consigliate per ottenere più energia disponibile; e le batterie sviluppate per i veicoli ibridi, anche chiamati HEV (Hybrid Electric Vehicle). Quest'ultime sono progettate per avere più potenza disponibile.

Tabella 2.2 caratteristiche tecniche delle batterie BEV

Tecnologia	Energia Specifica Wh/Kg	Potenza Specifica Wh/Kg	Cicli (Numero)	Temperatura ottimale (°C)	Efficienza (%)	Auto-scarica	Man.	Sistema di gestione
Pb-Acido	40	250	500	20-40	80-85	Bassa	No	Consigliata
Ni-Cd	60	200	1350	0-40	70-75	Bassa	Si	Consigliata
NiMh	70	350	1350	0-40	70	Alta	No	Consigliata
Ni-Zn	75	200	n.D	0-40	70	n.d.	No	Consigliata
Zebra	125	200	1000	n.d.	90-95	Alta	No	Integrante
Litio	125	400	1000	0-40	90	Bassa	No	Essenziale
Zn-aria	200	70	n.d.	20-40	n.d.	n.d.	Si	Consigliata

Tabella 2.3 caratteristiche tecniche delle batterie HEV

Tecnologia	Energia Specifica Wh/Kg	Potenza Specifica Wh/Kg	Cicli (Numero)
Pb-Acido	25	350	1
Ni-Cd	30	500	3
NiMh	55	1500	3
Li-ioni	70	2000	3

Allo scopo di fare un utile confronto tecnico tra le batterie prodotte per BEV e quelle adatte per HEV si utilizzerà il grafico di Ragone, che mette in relazione l'energia e la potenza specifica. L'espressione della potenza specifica su scala logaritmica ci permette di fare un confronto anche tra accumulatori che hanno potenze molto differenti.

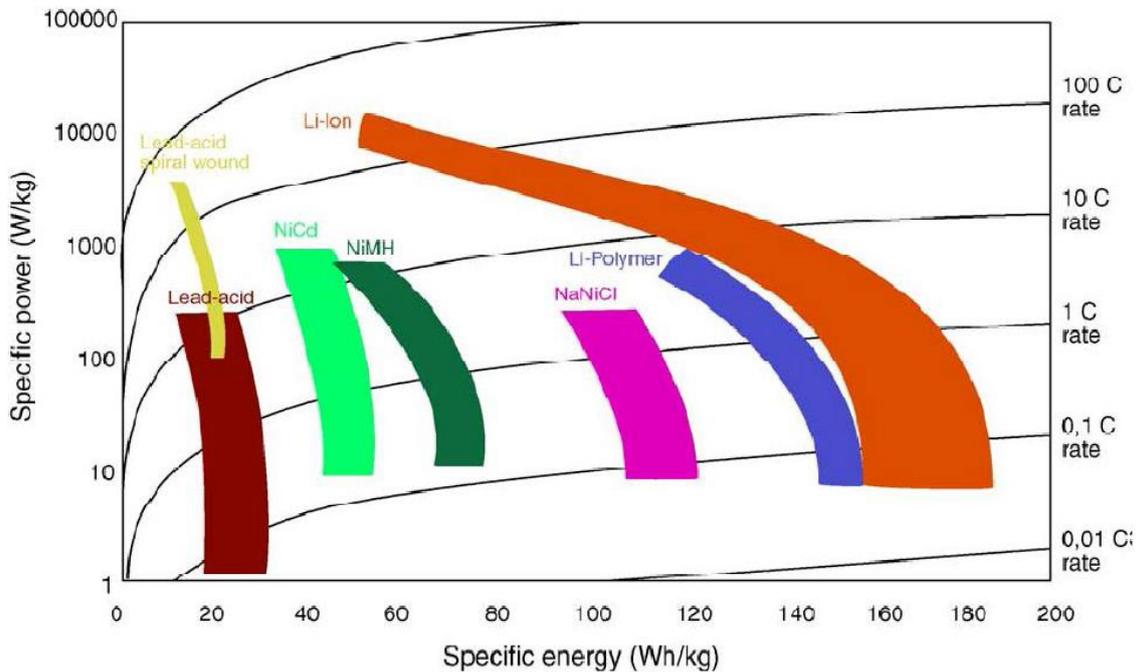


Figura 2.0.1 diagramma Energia specifica - Potenza specifica⁷

Ogni colore, presente nel grafico, indica una diversa tecnologia. Un indice rilevante è il tempo di scarica. Questo varia al variare della potenza richiesta dal veicolo. Le curve che partono da sinistra sono curve a rapporto potenza (P) / energia (E) costante. Il grafico ci mostra che la tecnologia Li-Ion è senza ombra di dubbio la migliore, quindi la scelta più adatta per i veicoli elettrici. Sempre per quanto riguarda i veicoli elettrici, la scelta più adatta risulta essere la batteria al Ni-NaCl. Un'altra fascia di accumulatori molto competitivi sono le batterie al Nichel-Metallo Idruro che ad oggi sono preponderanti sui veicoli ibridi.

2.7 Aspetti Ambientali

Ogni tipologia di accumulatore deve essere trattato in modo da capire e risolvere i relativi aspetti ambientali. Rilevarne le eventuali sostanze pericolose o tossiche potrà essere utile nel pianificare le consequenziali azioni atte allo smaltimento. Di seguito vengono messi in risalto il grado di tossicità e come questo influisce sulla salute umana.

⁷ Fonte www.researchgate.net; "An assessment of sustainable battery technology" Peter Van den Bossche Frédéric Vergels, Joeri Van Mierlo ottobre 2016

Tabella 2.4 Componenti tossici delle diverse tecnologie

	Effetti sulla salute a breve termine	Effetti sulla salute a lungo termine	Dati ambientali
PbO ₂	n.d	Anemia, encefalopatia, crampi addominali, malattie ai nervi, indebolimento renale, effetti sulla riproduzione e sullo sviluppo	Possibile bioaccumulazione
Pb	n.d	Anemia, encefalopatia, crampi addominali, malattie ai nervi, indebolimento renale, effetti sulla riproduzione e sullo sviluppo	Possibile bioaccumulazione
H ₂ SO ₄	Corrosione, edema polmonare	Erosione dei denti, cancerogeno	Nocivo per organismi acquatici
Ni(OH) ₂	Irritazione della pelle se a contatto	Evidenza limitata di un effetto cancerogeno	Nocivo per organismi acquatici
Cd(OH) ₂	Edema polmonare, febbre	Disfunzioni renali e polmonari, probabili effetti cancerogeni	n.d.
K(OH)	Corrosione, edema polmonare	Dermatite	Nocivo per organismi acquatici
Idruri di Nichel	n.d	n.d	n.d
LiCoO ₂	n.d	n.d	n.d
DMC	n.d	n.d	n.d
LiPF ₆	Tossico per la pelle, pericoloso se ingerito	n.d	n.d
Li	Corrosione, edema polmonare	n.d	n.d.
V ₂ O ₅	Irritazione, edema polmonare, bronchite, broncospasmo	Colorazione verde-nero della lingua	Nocivo per organismi acquatici
MnO ₂	Irritazione vie respiratorie	Dermatiti	Nocivo per organismi acquatici

I fattori da valutare, quando si fa una valutazione ambientale sono:

- Atmosfera;
- Idrologia;
- Territorio circostante;
- Ecosistema circostante;
- Clima;
- Salute.

Nelle rilevazioni utili alla definizione degli aspetti ambientali si prendono in considerazione almeno tre aree:

- La prima area è quella che comprende la produzione al riciclaggio. Cioè da un indice di come queste attività, con le loro annesse operazioni, influiscano sull'ambiente.
-
-

- La seconda area tiene in considerazione dell'energia sprecata a causa del non trascurabile peso dell'accumulatore. Questo non fa altro che aumentare l'inquinamento, poiché è un'aliquota di energia non utilizziamo.
- L'ultima area invece, prende in considerazione il degrado di efficienza del pacco batteria. Infatti nel tempo si hanno delle perdite delle performance che hanno inevitabili impatti sull'ambiente.

2.8 Aspetti Economici

L'analisi e il controllo degli aspetti economici, fanno da guida sia alla fase di sviluppo, sia alla fase di progettazione. Infatti un peso rilevante in questo senso viene rappresentato dall'accumulatore. Rendersi conto del costo delle varie opzioni tecnologiche, contribuisce a fare scelte orientate per un miglior assetto tecnologico di un veicolo elettrico. In un'attenta analisi si prenderà visione sia dei prezzi sia dei costi. Per questo si utilizzeranno una serie di criteri al riguardo:

- Tipo di materiale impiegato e costo relativo ad una cella elementare;
- Caratteristiche e prestazioni di una cella elementare;
- Composizione chimica e Aziende produttrici delle celle elementari;
- Costo MAX e MIN per cella elementare a seconda degli elementi utilizzati;
- Costo MAX e MIN per le materie prime;
- Costo cella elementare energy-oriented e power-oriented;
- Costo della cella elementare aggravato del costo di produzione e di eventuali extra;

Di seguito nella Tabella 2.5 si può avere una stima fatta sulla tecnologia Li-Ion:

Tabella 2.5 valutazione costo batteria

Componente	Peso (%)	Costo MAX (€/Kg)	Costo min (€/Kg)	Peso (g)	Costo MAX (€)	Costo min (€)	% MAX	% min
Materiale attivo del catodo	33	45	38	330	14.85	12.54	47	45.44
Collettore Al	8.5	21	19	85	1.79	1.62	5.65	5.85
Materiale attivo del anodo	17	21	18	170	3.57	3.06	11.30	11.09
Collettore Cu	12	15	14	120	1.80	1.68	5.70	6.09
Separatore	1.5	140	120	15	2.10	1.80	6.65	6.52
Elettrolita	19	21	20	190	3.99	3.80	12.63	13.77
Imballaggio	9	3.5	3.1	90	3.50	3.10	11.08	11.23
			Peso totale	1000				
Costo Totale					31.60	27.60		

Così il costo complessivo di un accumulatore implica una valutazione del costo globale per produrre lo stesso. Infatti il prezzo di un accumulatore comprende anche queste voci di costo. Nella stima del prezzo finale il peso del costo globale di produzione è tra un terzo e quasi la metà. Quello che si ottiene verrà espresso in €/kWh per gli accumulatori energy-oriented (BEV) e in €/kW per gli accumulatori power-oriented (HEV). L'unico motivo per il quale ancora oggi possono essere impiegati gli accumulatori al Piombo (Pb) è dovuto al loro prezzo concorrenziale. L'implementazione dei costi imputabili alla produzione eleva l'autorevolezza dei dati ottenuti dall'analisi. Nella maggior parte dei casi si fanno stime basate sui costi medi. A causa delle oscillazioni dei prezzi, la stima potrebbe in alcuni risultare inutile. Infine, le stime dei costi è influenzata fortemente dalle tecnologie. In effetti è molto più semplice stimare il costo MAX e MIN per una tecnologia conosciuta e già diffusa su larga scala, al contrario non sarà molto agevole.

3. Modello Matematico Della Batteria

3.1 Caratteristiche Fondamentali

Un accumulatore elettrochimico può essere rappresentato come un bipolo che scambia potenza con un circuito ad esso collegato:

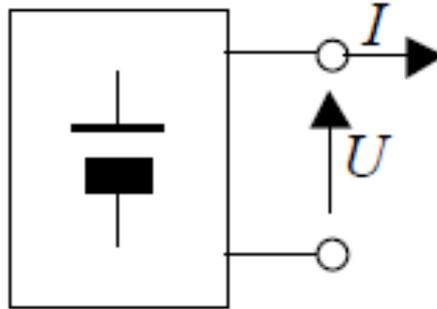


Figura 3.1 Rappresentazione di un accumulatore elettrochimico visto dai morsetti esterni

Per convenzione quando il flusso di corrente elettrica entra dal positivo allora si accumulerà energia, viceversa se il flusso è uscente dallo stesso, l'accumulatore rilascerà energia elettrica. Gli accumulatori per funzionare si basano sul funzionamento di una cella elettrochimica. In breve possiamo dire che è un sistema che utilizza corrente continua, avente un catodo e un anodo, in cui sarà presente una tensione di 1-2 Volt. Siccome la tensione necessaria al funzionamento di un veicolo elettrico deve essere molto più alta, allora si utilizza impiegare un pacco batterie, che è formato da più dispositivi accumulatori in serie. In questo modo è possibile raggiungere anche tensioni di alcune centinaia di Volt. Si chiamerà catodo (polo positivo) il polo su cui ci sarà una corrente uscente, al contrario si chiamerà anodo (polo negativo) il polo che assorbirà un flusso di energia elettrica. Un pacco batteria formato da più accumulatori in serie può essere rappresentato come in Figura 3.2.

La variante di un pacco batteria con accumulatori in parallelo non è di facile applicazione. Per questo ad oggi la variante in serie è maggiormente utilizzata. Ogni batteria è dotata di un sistema di monitoraggio che prendendo in considerazione la legge di tensione e la temperatura di cella va a riassumere lo stato della batteria stessa. Lo stesso sistema di monitoraggio agirà in modo preventivo. Infatti quest'ultimo in caso di raggiungimento dei valori limiti di temperatura, interromperà il circuito e impedirà ogni processo di ricarica o di funzionamento. Più si ottimizzeranno i valori limiti di temperatura, più stabili saranno le leggi elettriche che governano il fenomeno. Si parla di carica estratta (Q_e) come della corrente uscente dal catodo in un certo intervallo di tempo T:

$$Q_e = \int_T i(t) dt \quad (3.1)$$

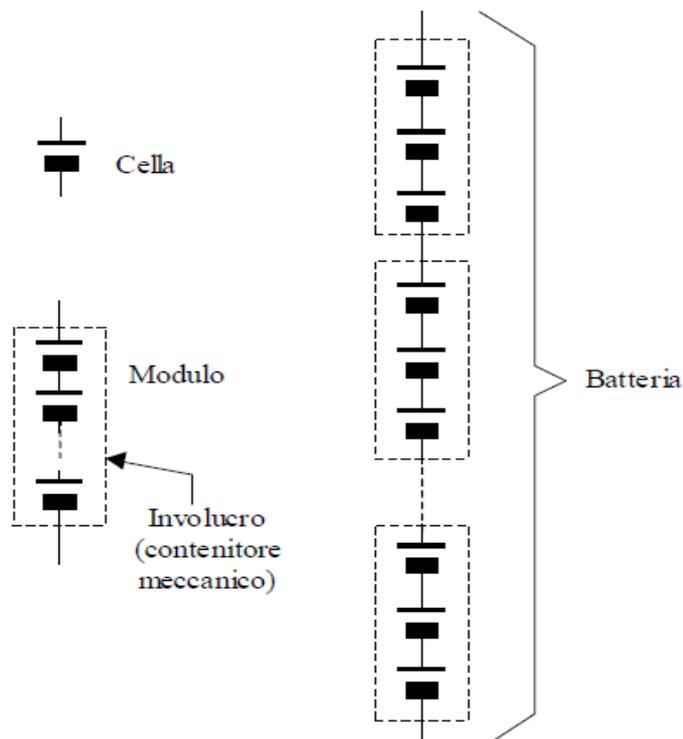


Figura 3.2 elementi costitutivi di una batteria di accumulatori elettrochimici

Un altro indice importante per descrivere le caratteristiche fondamentali di una batteria è il SOC, cioè lo Stato di Carica. Come dice il nome, questo indice ci fa capire se la è completamente scarica (SOC = 0), o se è completamente carica (SOC = 1). Il SOC può essere dedotto se conosciamo la capacità della batteria e la sua carica:

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C_Q} \quad (3.2)$$

Tra le altre caratteristiche importanti per un accumulatore vi è l'energia scambiata nel tempo T:

$$E_e = \int_T u(t)i(t) dt \quad (3.3)$$

Il rendimento di carica è il rapporto tra la quantità di carica e la quantità di carica nel flusso in uscita, anche chiamata di scarica. Indicando con T1 e T2 i rispettivi istanti di carica e scarica allora calcoleremo:

$$\eta_Q = \left| \frac{Q_{scar}}{Q_{car}} \right| = \frac{\int_{T_1} |i(t)| dt}{\int_{T_2} |i(t)| dt} \quad (3.4)$$

Allo stesso modo se prendiamo le energie di carica e scarica, calcoleremo il rendimento energetico:

$$\eta_E = \left| \frac{E_{scar}}{E_{car}} \right| = \frac{\int_{T_1} |u(t)i(t)| dt}{\int_{T_2} |u(t)i(t)| dt} \quad (3.5)$$

L'energia di scarica può essere calcolata operando un prodotto tra la carica in uscita e la tensione media durante tale processo, con la corrente che rimane costante

$$E_{scar} = \int_{T_1} u(t)I dt = I \int_{T_1} u(t) dt = IT_1 U_m = QU_m \text{ con } U_m = \frac{1}{T} \int_T u(t) dt \quad (3.6)$$

Dalle evidenze sperimentali, la tensione media di scarica dipende dalla corrente di scarica. Considerando una corrente costante, si può notare come la tensione in fase di carica è mediamente al di sopra della tensione in fase di scarica:

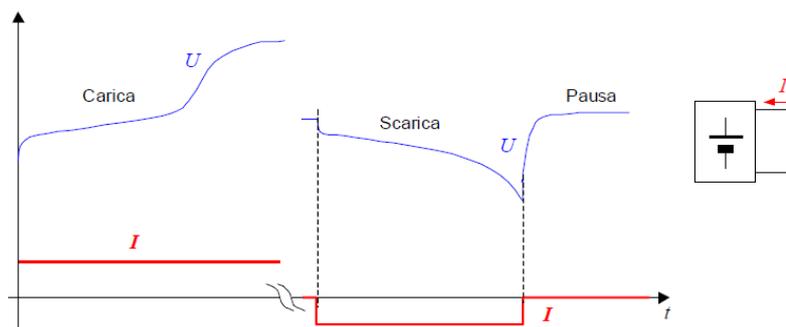


Figura 3.3 Tensione media di carica e scarica

Un particolare comportamento che si è riusciti a rilevare è quando l'accumulatore si trova carico completamente. Se si producono delle scariche a diverse temperature e valori di corrente, si nota come la carica in uscita è inversamente proporzionale alla corrente di scarica. Inoltre la capacità di scarica dipende anche dalla temperatura. Infatti per temperature comprese tra 0 °C e 30 °C, la capacità in uscita aumenta dallo 0,7% all'1%. Oltre questo range i valori sono molto variabili secondo leggi diverse. Le evidenze sperimentali hanno anche aiutato nella scelta degli accumulatori più adatti in fase di progettazione. Dal confronto tra le tradizionali batterie al Piombo e quelle al Litio, si è potuto apprezzare la minor dipendenza di quest'ultime dalla temperatura. Infatti le batterie al Litio sono molto più performanti entro i limiti di temperatura di esercizio (tra -20°C e 60°C).

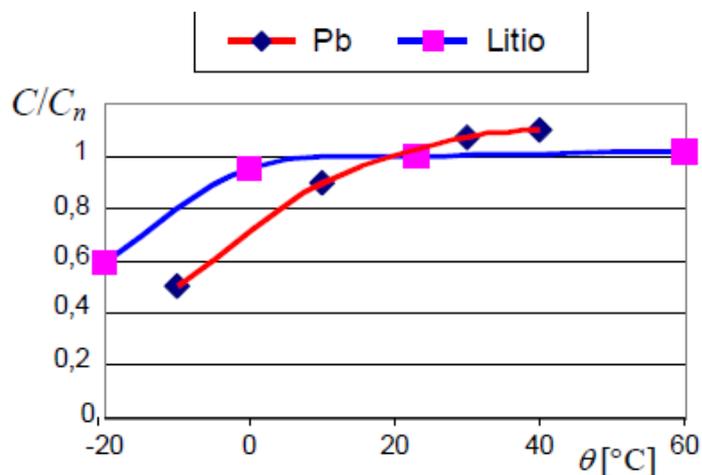


Figura 3.4 Confronto batterie Pb e Li

3.2 Autoscarica

L'autoscarica è un fattore che degrada e influisce sulle prestazioni degli accumulatori. In particolare più le batterie rimangono inutilizzate nel tempo, minore sarà il flusso di carica in uscita alla prossima carica. Il fenomeno dell'autoscarica è accentuato quanto più nuova è la batteria, ma ha il vantaggio di sparire man mano che la stessa verrà sottoposta a cicli di utilizzo. Inoltre i dati raccolti hanno permesso di capire che più è alta la temperatura più si presenterà il fenomeno dell'autoscarica. Ad esempio dopo un mese di inutilizzo le batterie al piombo passeranno dal 2% al 20% di autoscarica; quelle al Litio dal 2% all'8%. Tra gli accumulatori che presentano fenomeni di autoscarica vi sono anche le batterie Sodio-Nichel-Cloro. Infatti queste batterie utilizzano parte della loro energia per rendere costante la temperatura di cella. In generale per evitare danni funzionali, è meglio caricare a fondo gli accumulatori, per evitare che questi si possano scaricare del tutto nei periodi di inattività. In generale è meglio evitare di lasciare a riposo per molto tempo batterie con meno del 20% della carica. Inoltre è consigliabile seguire le eventuali specifiche date dal costruttore del veicolo.

3.3 Modelli Matematici

I modelli matematici attuali utilizzano circuiti equivalenti per strutturare e interpretare meglio il funzionamento degli accumulatori. Descriviamo quindi il modello a riposo:

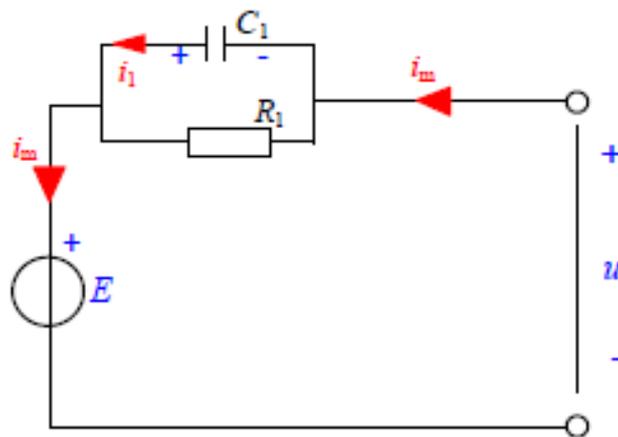


Figura 3.3.1 Schema modello a riposo

L'equazione alla maglia esterna:

$$u_c(t) = E - u(t) \quad (3.7)$$

Derivando:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{du_c}{dt} \quad (3.8)$$

Con:

$$u_c(t) = u_{c0} - \frac{1}{C} \int_0^t i_1(\tilde{t}) d\tilde{t} = u_{c0} - \frac{1}{RC} \int_0^t E - u(\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (3.9)$$

Derivando:

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{RC}(E - u) = -\frac{1}{RC}u_C \quad (3.10)$$

Risolvendo quest'ultima

$$u_C = u_{C0}e^{-t/\tau} \text{ con } \tau = RC \quad (3.11)$$

E infine si ha:

$$u = E - u_C(t) = E - u_{C0}e^{-t/\tau} \quad (3.12)$$

L'andamento temporale è:

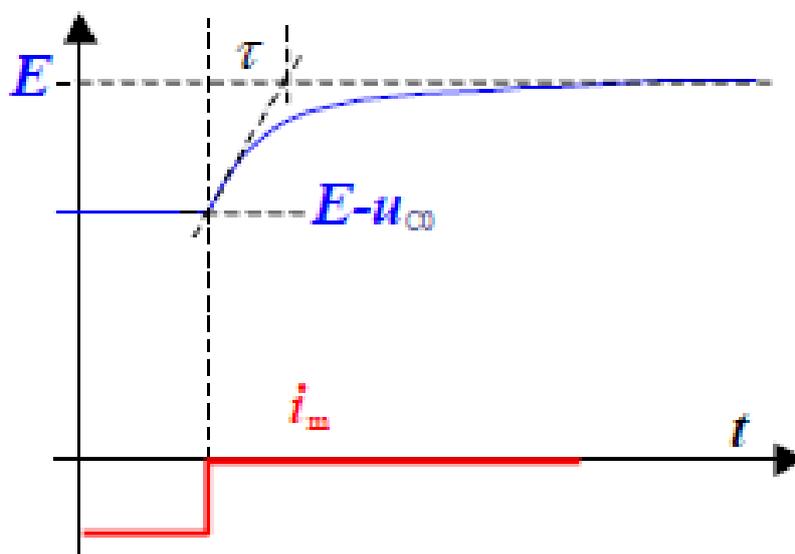


Figura 3.3.2 Andamento temporale

Risalta dai grafici ottenuti, la curva del transitorio quando è in pausa. Se andiamo a fare un focus sui dati ottenuti si può dichiarare che:

- Appena dopo il principio, dello stato di pausa, la tensione presenta un netto salto, e questo induce ad azzerare la derivata che non può avere tangenza verticale. Questo è come se fosse dovuto all'intero flusso di corrente in entrata che attraversa una resistenza.
- La curva, al contrario di quello che può sembrare non può essere approssimabile da una funzione esponenziale negativa.

Maggiore accuratezza tra modello reale e modello sperimentale si ottiene se vengono aggiunti nuovi elementi nel circuito in configurazione equivalente.

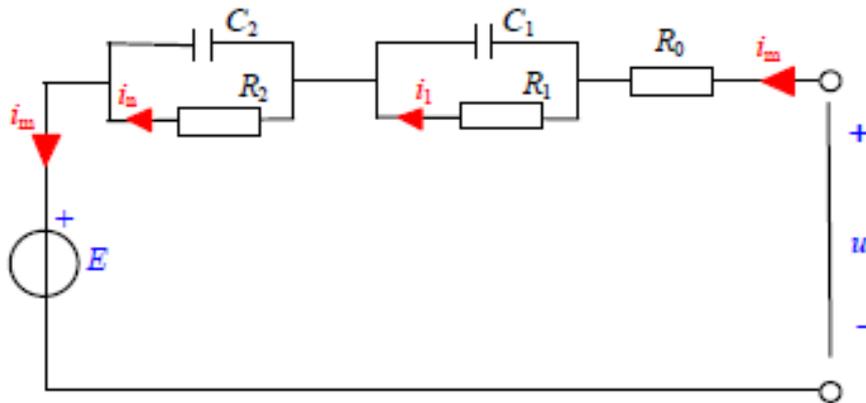


Figura 3.3.3 Circuito in configurazione equivalente

In particolare l'inserimento di gruppo RC con costanti diverse nel tempo, rendono più precisa la rilevazione dei dati sul transitorio. Questo modello però risulta inefficace in fase di scarica. Questo perché si avrebbero delle curve molto simili sia un istante prima, che dopo il transitorio, e questo lo rende inefficace.

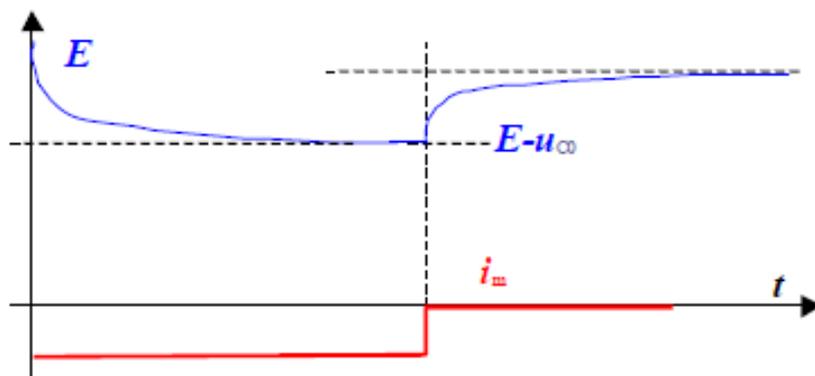


Figura 3.3.4 Monotonia della funzione E

Prendiamo ora in esame la dipendenza delle caratteristiche di un accumulatore dallo stato di carica. Si nota che nel modello sperimentale appena descritto la forza elettromotrice E è una funzione crescente monotona, con l'aumentare della carica in entrata. Questo sarà utile per determinare lo stato di carica. Per questo scopo si utilizzerà un più completo modello che aiuterà a descrivere gli accumulatori sia in fase di carica che in quella di scarica:

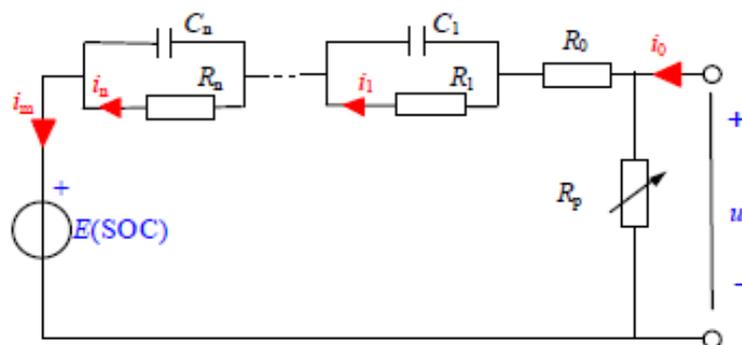


Figura 3.3.5 Accumulatori in fase di carica e di scarica

Guardando il nuovo circuito equivalente si può capire che:

- L'accuratezza del modello dipende da quanto più RC inserisco nel circuito equivalente. Questo però comporta l'aumento di parametri, i quali sono di difficile controllo;
- Il modulo R_p è equivalente ad un resistore variabile con la tensione applicata. Questo perché solo la forza elettromotrice E induce una carica nell'accumulatore;

La forza elettromotrice (E) è calcolata per mezzo dello stato di carica (SOC):

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C_Q} = SOC = 1 + \frac{1}{C_Q} \int_0^t i_m(t) dt \quad (3.13)$$

Se all'istante $t=0$ la batteria è completamente carica, si può scrivere in generale:

$$SOC(t) = SOC(0) + \frac{1}{C_Q} \int_0^t i_m(t) dt \quad (3.14)$$

R_p (resistenza in parallelo) è un indice della presenza di correnti parassite. In questo modo si possono stimare gli effetti che queste hanno sul pacco batterie. Nel circuito agiscono diverse correnti la (i_0) si divide in due, la (i_m) contribuisce alla forza elettromotrice (E) e questa è importante nella presentazione dei fenomeni carica e scarica. (i_p) è una corrente che genera fenomeni parassiti non funzionali. (R_p) ci fa capire come varia nel tempo il processo di autoscarica. Un ulteriore modello di circuito equivalente è composto da una resistenza RSD, cioè autoscaricante. Quest'ultima è messa in parallelo con la capacità (C_Q):

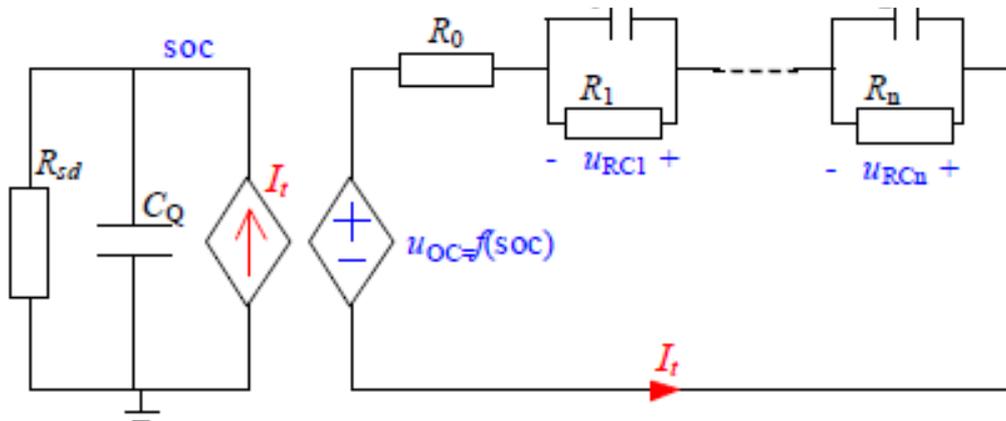


Figura 3.3.6 Circuito con resistenza RSD

Il circuito verifica la relazione:

$$soc(t) = soc(0) + \frac{1}{C_Q} \int_0^t i_t(t) dt \quad (3.15)$$

Questa relazione è sempre verificata, qualora si trascuri la resistenza RSD. Questi circuiti equivalenti, rappresentano i modelli sperimentali del funzionamento di un accumulatore che viene impiegato nella realtà progettuale. Questi sono composti dai vari elementi circuitali appena elencati che interconnessi tra di loro danno vita alle leggi elettriche che regolano i fenomeni.

3.4 Stima Del Soc

Uno dei problemi principali che si presentano in fase progettuale è proprio la stima dello stato di carica (SOC). La valutazione di questo parametro incide fortemente sull'usabilità e la longevità del veicolo stesso e dei suoi componenti funzionali. L'accumulatore deve sempre avere una carica compresa tra lo 0 e 100, in modo da garantire ottime performance. Inoltre bisognerebbe evitare di raggiungere questi due stati di carica, poiché in entrambi i casi non si sta sfruttando al massimo il motore elettrico. Inoltre le batterie saranno soggetti ad un deperimento veloce. Per valutare il SOC ci si rifà ai modelli matematici presentati poc'anzi:

$$SOC(t) = SOC(0) + \frac{1e}{c_Q} \int_0^t i_m(t) dt \quad (3.16)$$

L'integrale rappresenta un'insidia, poiché un piccolo errore di calcolo della (i_m) può ripercuotersi per alcuni giorni sulla valutazione del SOC. Per ovviare a questo rischio, si utilizza resettare l'indice calcolato, sfruttando le relazioni che intercorrono tra SOC e forza elettromotrice (E), che di solito viene valutata in una mezz'oretta. Il reset viene effettuato a fine utilizzo, quando il veicolo deve effettuare la ricarica, di solito ogni giorno.

3.5 Vita Utile

La vita utile è un obiettivo che l'ingegnere si deve porre nella realizzazione di un veicolo elettrico. Infatti tutto il pacco degli accumulatori ha uno dei costi più alti tra le varie componenti che costituiscono un veicolo di questo genere. Una valutazione attenta e minuziosa nella raccolta dati, in fase di progettazione, è di vitale importanza. Infatti è da una corretta scelta che si possono utilizzare le batterie più adatte al veicolo e al suo impiego. Nella pratica ingegneristica, una batteria ha finito il suo ciclo vitale utile quando la sua capacità si è ridotta dell'80%. Uno dei difetti che portano con sé gli accumulatori elettrochimici è che tendono ad invecchiare sin dalla loro produzione, sia per i fenomeni descritti in precedenza, sia per i consecutivi cicli di carica e scarica a cui sono sottoposti. Un fattore fortemente influente sulla vita utile degli accumulatori ad elettrolita è che questi tendono a perdere le molecole d'acqua, per via dei loro involucri e questo a discapito della capacità. Inoltre, sempre gli stessi accumulatori, sono soggetti reazioni parassite che ne degradano la capacità erogabile. Queste condizioni, però si verificano quando gli stati di carica raggiungono i limiti sopracitati di 0% e 100% di carica. La Vita Utile di un pacco batterie dipenderà da quanto è grande la capacità in fase di scarica. Infatti più è grande la fase di scarica, più alta sarà la probabilità di far insorgere i fenomeni che ne deteriorano la funzionalità. Solitamente il ciclo di vita utile viene espresso in cicli di vita tipici con fase di scarica al 90%:

Tabella 3.3.1

Batteria	Tipico Cycle life (90%)
Piombo	300-500
Litio	1000-5000
Na-NaCl	3500

3.6 Valori Nominali

I valori nominali sono molto importanti, poiché sono la base di riferimento delle varie valutazioni che il progettista può fare. Il principale dato che è necessario sapere è la corrente di scarica. In particolare un accumulatore che è in stato di carica completa, con una temperatura ambiente e una corrente di scarica costante, avrà una carica in uscita equivalente alla sua capacità nominale:

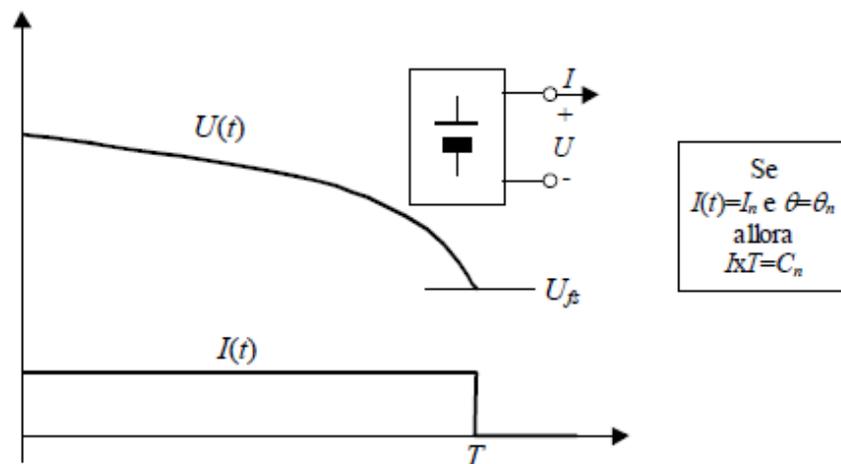


Figura 3.3.7 Accumulatore in stato di carica completa

Altri valori nominali importanti sono la tensione di fine scarica nominale U_f , il tempo di scarica nominale $T_n=C_n/I_n$. Di solito quest'ultimo viene assunto pari a 10 ore ($T_n=10$). Nei dati progettuali si parte dalla capacità nominale e dal tempo di scarica nominale per ricavare la corrente nominale I_n . La tensione nominale di un accumulatore è assunto uguale alla tensione di cella. Questo valore varia a seconda del modello e dal numero di elementi presenti nel pacco batteria.

3.7 Relazione Tra E-Soc

Consideriamo lineare la relazione tra la forza elettromotrice (E) e lo stato di carica (SOC), questa è rappresentata da un segmento di retta:

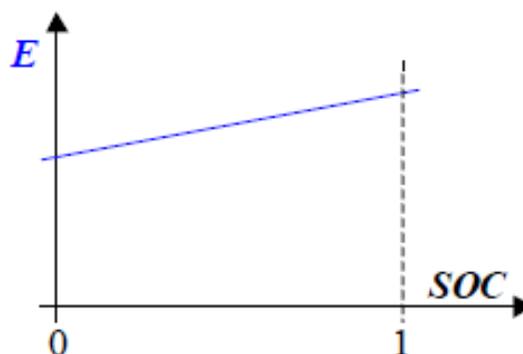


Figura 3.3.8 Relazione forza elettromotrice-stato di carica

Questa approssimazione semplifica di molto il problema, poiché possiamo interpretare le leggi elettriche per mezzo di un circuito equivalente. Infatti i condensatori sono caratterizzati dalla relazione lineare tra carica e tensione ($Q=C*U$).

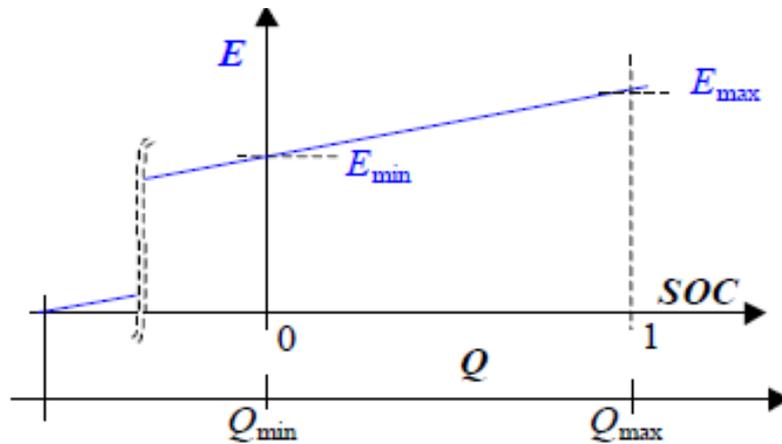


Figura 3.3.9 relazione lineare Carica-Tensione nei condensatori

La capacità del condensatore equivalente è pari all'inverso della pendenza:

$$C = \frac{Q_{max}-Q_{min}}{E_{max}-E_{min}} = \frac{C_n}{E_{max}-E_{min}} \quad (3.17)$$

Esistendo una certa diversità in termini di unità di misura, poiché si tratta di grandezze diverse ma equivalenti. Se esprimiamo la capacità di un condensatore in Farad (F) e la capacità di una batteria in Coulomb (C), allora il valore dello stato di batteria può essere calcolato come:

$$SOC = \frac{Q-Q_{min}}{Q_{max}-Q_{min}} = \frac{E-E_{min}}{E_{max}-E_{min}} \quad (3.18)$$

Nel nostro caso, avendo la tensione ai capi di un condensatore, utilizzeremo la seconda uguaglianza.

3.8 Tecniche Di Ricarica

Descriviamo ora le tecniche di ricarica. Innanzitutto, la tensione tampone (U_{float}) è quella tensione che si può applicare alla batteria, in modo permanente, senza rischiare di comprometterne la sua funzionalità. La tensione tampone (U_{float}) è molto influenzata dalla temperatura di esercizio dell'accumulatore. In ogni caso in fase progettuale questo può essere previsto secondo la relazione (valida per batterie al piombo)

$$U_{float} = 2.27 - 0.0025 * (\theta - 20) \quad (3.19)$$

(U_{float} = tensione di tampone in V, θ . temperatura in °C)

Le leggi di ricarica si basano su alcuni criteri di base:

- La corrente in entrata in un accumulatore non deve superare i valori limiti che può sopportare la batteria.

- La corrente di carica, deve essere diminuita progressivamente, man mano che lo stato di carica raggiunge il 100%. Questo evita l'insorgere di fenomeni elettrici parassiti dovuti alla dissociazione elettrolitica dell'acqua.

Un modello che evita questi fenomeni deve essere tarato con il primo tratto a corrente costante, seguito da un secondo tratto a tensione costante:

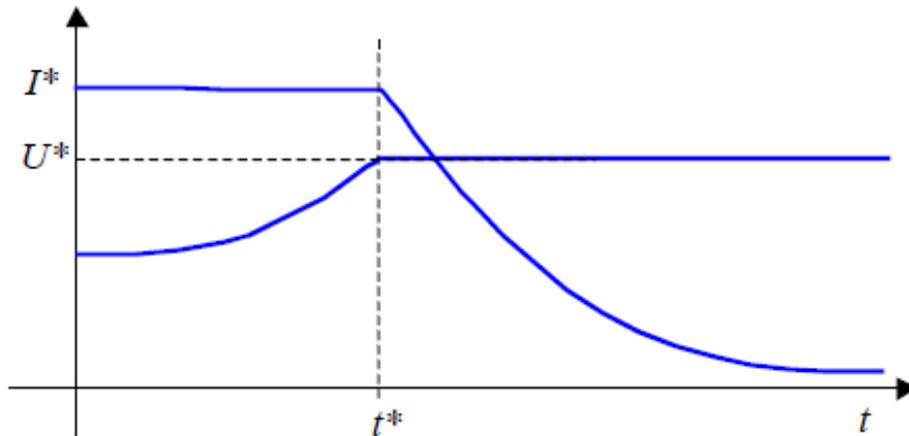


Figura 3.3.10

Questa tecnica di ricarica semplifica molti problemi e non è particolarmente difficile la sua formulazione. Poniamo lo stato di carica (SOC) uguale a 0 e a 1, rispettivamente quando la batteria è completamente scarica e quando è completamente carica. Il circuito equivalente che interpreta meglio il fenomeno è costituito da una forza elettromotrice e un resistore in serie. Questi due componenti hanno relazioni con lo stato di carica (SOC):

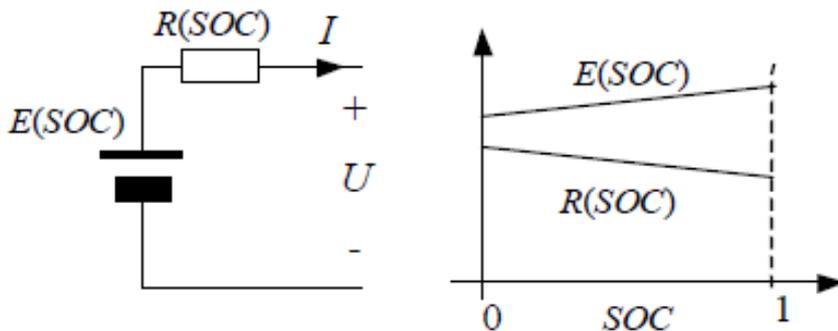


Figura 3.3.11

In particolare emerge che la forza elettromotrice (E) è proporzionale all'aumentare dello stato di carica (SOC); viceversa, la resistenza interna (R) è inversamente proporzionale.

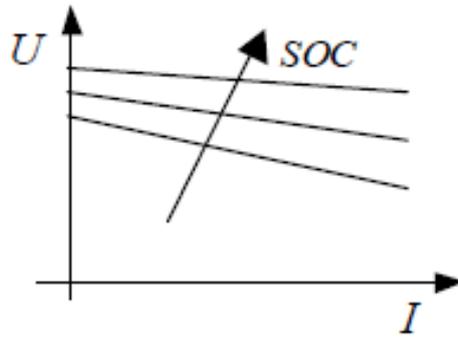


Figura 3.3.12

Il modello sinora utilizzato semplifica di molto i calcoli. Il problema principale è che se si vuole approfondire il problema, abbiamo bisogno di adottare modelli sperimentali equivalenti più complessi. A questo proposito, consideriamo, un alimentatore che abbia una caratteristica statica:

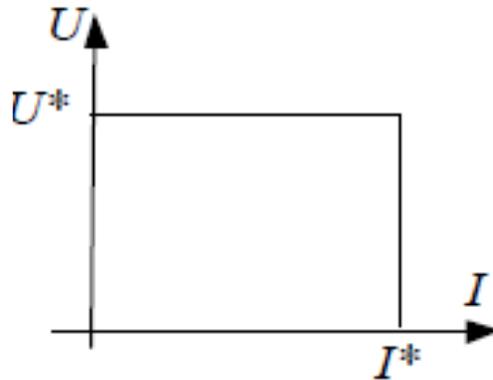


Figura 3.3.13

Collegiamo quindi un alimentatore ad un accumulatore, questo dispositivo accoppiato, andrà a lavorare sui punti d'intersezione delle caratteristiche esterne dell'alimentatore e della batteria stessa.

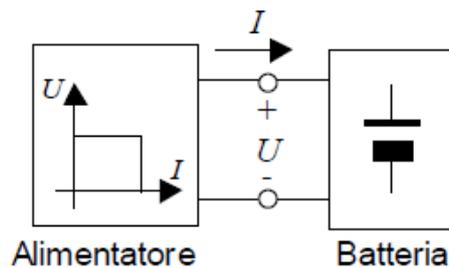


Figura 3.3.14

Il punto di lavoro, inizialmente, trasla fino al punto 1, in seguito raggiunge il confine con il tratto a tensione costante, con il punto 2, per poi spostarsi verso i punti a corrente decrescente, del punto 3:

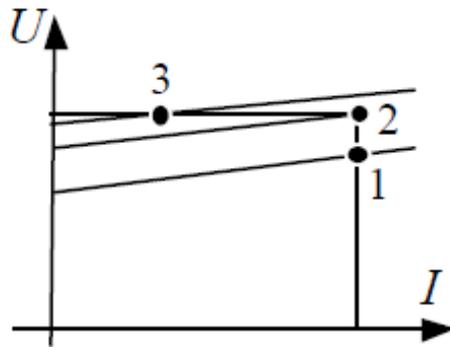


Figura 3.3.15

Quello che si ottiene è che l'aumento della forza elettromotrice (E), prevale sulla resistenza interna. Per scegliere i valori di I^* e U^* bisogna rispettare alcuni criteri:

- Il valore di I^* non deve superare il valore limite in carica. Questo viene espresso come una frazione della capacità nominale.
- La tensione U^* , deve essere scelta minuziosamente, poiché si deve evitare l'insorgere di assorbimenti a fine carica e di conseguenza avere dissociazione elettrolitica dell'acqua. Le soluzioni adottate sono quelle di utilizzare una tensione $U^*=U_{float}$, uguale a quella di tamponamento. Questo permette che a carica completata l'accumulatore rimanga sotto tensione per un tempo indefinito. In alternativa, si può porre $U^*>U_{float}$, ma in questo caso a carica completata bisognerà staccare il collegamento fisico dell'alimentazione.

4. Progetto Di Conversione

4.1 Premessa

Il presente progetto ha come obiettivo la conversione della motorizzazione del motore diesel in motore elettrico di un bus già esistente nel parco veicoli del gruppo torinese trasporti GTT. Si eseguirà un primo dimensionamento degli organi energetici e propulsivi del veicolo focalizzando maggiore attenzione nello studio del dimensionamento del pacco batterie e facendo in seguito un confronto sulle prestazioni energetiche delle tipologie di batterie ad oggi maggiormente in uso in tale campo, in particolare le tipologie trattate in tale progetto sono sostanzialmente tre:

- Batterie al piombo
- Batterie al litio
- Supercapacitori

Si vorrà inoltre effettuare un confronto tra questo prototipo ed un bus elettrico già esistente nel parco veicoli del gruppo torinese trasporti GTT al fine di effettuare un'analisi comparativa sul consumo energetico in base alle diverse soluzioni adottate. Bisogna considerare un tragitto realmente esistente, quindi si è scelta la linea che ha un percorso lungo 11,8 km con un dislivello complessivo di 28 metri:



Figura 4.1 Tragitto reale prescelto

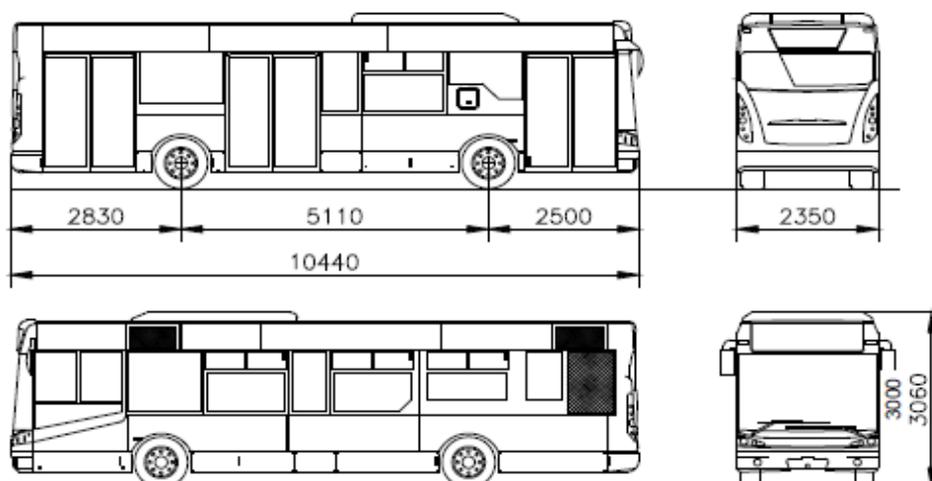
Riportiamo in Figura 4.2 la scheda tecnica del bus considerato nel progetto di tesi. Come detto in precedenza tale prototipo verrà confrontato con un veicolo elettrico già esistente nel parco veicolo GTT, come riportato in Figura 4.3.



AUTOBUS URBANO A 2 ASSI (*)
MAN NM 283 F
AUTODROMO TGM IOU/3PHSAC "TANGO"

Serie: **1014-1016**

Scheda: **UM01**



Anno immatricolazione: **2002**

CARATTERISTICHE PRINCIPALI

- autotelaio	MAN NM 283 F	
- lunghezza max	10.440	mm
- velocità max	80,0	km/h
- passo	5.110	mm
- carreggiata anteriore	1.934	mm
- carreggiata posteriore	1.895	mm
- raggio minimo di curvatura	8.300	mm
- tara (compreso conducente)	10.500	kg
- massa complessiva	15.965	kg
- alimentazione	gasolio	
- capacità serbatoio	250	l
- consumo gasolio	36	l/100km

CARROZZERIA

- tipo di carrozzeria	AUTODROMO TGM IOU/3PHSAC "TANGO"	
- colore (3)	personalizzato	
- lunghezza	10.440	mm
- larghezza	2.350	mm
- altezza	3.000	mm
- sbalzo anteriore	2.500	mm
- sbalzo posteriore	2.840	mm
- altezza pavimento min.	315	mm
- altezza pavimento max	340	mm
- porte rototraslanti	3	

CARATTERISTICHE MECCANICHE

- motore (1)	MAN D 0836 LOH02	
- posizione	posteriore verticale	
- cilindrata	6.871	cm ³
- potenza max (a 2.400 g/min.)	206 kW (280 CV)	
- coppia max (a 1.450-1.600 g/min.)	1.100	Nm
- cambio automatico	VOITH 851.3E	
- idroguida	RBL C500V	
- freno di servizio (2)	1° asse pneumoidraulico 2° asse pneumoidraulico	
- freno di soccorso	1° asse pneumoidraulico 2° asse pneumoidraulico	
- freno di stazionamento inglobato nel freno di soccorso		
- pneumatici	1° asse 275/70 R22,5 2° asse 275/70 R22,5	

CAPACITA' POSTI PER PASSEGGERI

- posti a sedere (4)	13	13(+2)
- posti in piedi	66	66
- posto carrozzeria	1	
- posti di servizio	1	1
- posti totali	81	82

NOTE:

- (*) veicolo adibito a servizio di linea urbana presso la città di Ivrea
 - (1) Conforme alla Direttiva 2001/27/CE Rif. 1999/96/CE Riga A (EURO3)
 - (2) veicoli dotati di ABS e ASR e rallentatore idraulico incorporato nel cambio
 - (3) blu RAL5015 giallo RAL 1018 rosso 2002 (logo) ; frontale e posteriore arancio standard urbano
 - (4) veicoli dotati di rampa per accesso disabili; in assenza di carrozzeria possono essere utilizzati due sedili ribaltabili
- Veicoli dotati di ARIA CONDIZIONATA

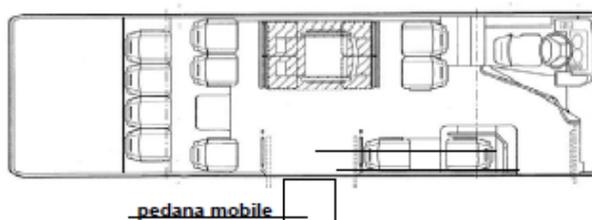
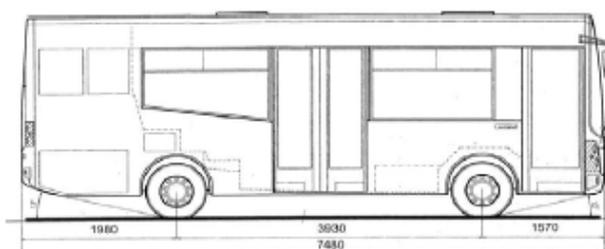
Figura 4.2 Scheda tecnica del Bus prescelto per la conversione



**AUTOBUS URBANO A 2 ASSI
EPT - CACCIAMALI "ELFO"**

Serie: **01E + 23E**

Scheda: **UC01**



pedana mobile



Anno immatricolazione: **2003**

CARATTERISTICHE PRINCIPALI

- autotelaio	Cacciamali TCC635L1E
- lunghezza max	7.480 mm
- velocità max	70 km/h
- passo	3.930 mm
- carreggiata anteriore	- mm
- carreggiata posteriore	- mm
- raggio minimo di curvatura	6.187 mm
- tara (compreso conducente)	8.250 kg
- massa complessiva	11.500 kg
- alimentazione	elettrica
- capacità batterie	180 A/h
- consumo	85,00 kWh/100km

CARROZZERIA

- tipo di carrozzeria	Cacciamali ELFO C3036
- colore (1)	giallo - blu - argento
- lunghezza	7.480 mm
- larghezza	2.260 mm
- altezza	2.800 mm
- sbalzo anteriore	1.570 mm
- sbalzo posteriore	1.980 mm
- altezza pavimento min.	350 mm
- altezza pavimento max	350 mm
- porte rototraslanti	2

CARATTERISTICHE MECCANICHE

- motore	ENOVA EDM 120
- posizione	posteriore
- cilindrata	- cm ³
- potenza max (a 1.800 g/min.)	120 kW (163 CV)
- coppia max (a 0 -1800 g/min.)	650 Nm
- rapporto al ponte	1/5.16
- idroguida	ZF8090
- freno di servizio (2)	1° asse pneumoidraulico 2° asse pneumoidraulico
- freno di soccorso	1° asse - 2° asse meccanico
- freno di stazionamento (ruote motrici 2° ass)	meccanico
- pneumatici	1° asse 225/75 R 17,5 2° asse 225/75 R 17,5

CAPACITA' POSTI PER PASSEGGERI

- posti a sedere (3)	11(+4)	11
- posti in piedi	24	24
- posto carrozzeria	-	1
- posti di servizio	1	1
- posti totali	40	37

NOTE:

- (1) colorazione esterna ed allestimento interno ideati da "GIUGIARO DESIGN"
- (2) veicoli dotati di dispositivo ABS-ASR
- (3) veicoli dotati di rampa per accesso disabili ad azionamento manuale

Figura 4.3 Scheda tecnica del Bus elettrico esistente nel parco GTT

4.2 Dati Tecnici

Il primo passo è quello della conversione della motorizzazione da motore diesel a motore elettrico, infatti osservando la scheda tecnica si può osservare che il mezzo possiede un motore diesel da 206 KW (280 CV) e una delle possibilità è quella di sostituire questo con un motore asincrono trifase collegato alle ruote senza cambio di velocità. I motori asincroni trifase possono essere considerati tra le macchine elettriche più affidabili e per meglio comprendere come è strutturato un motore asincrono trifase, di seguito forniamo una breve descrizione delle principali parti che compongono la macchina rotante e nelle quali si generano i fenomeni elettrici da cui ne scaturisce il funzionamento. Il primo elemento è lo statore e costituisce la parte del circuito magnetico che contiene gli avvolgimenti induttori alloggiati in apposite cave ricavate in corrispondenza della sua superficie interna. Lo statore è costituito da lamierini in lega d'acciaio-silicio o in acciaio massiccio, isolati tra di loro. Dalla sua struttura dipende quanto sia interessato da flussi magnetici variabili nel tempo che provocano perdite per isteresi e per correnti indotte parassite. Nelle cave ricavate nella struttura dei lamierini sono inseriti tre avvolgimenti primari (ognuno costituito da più bobine diversamente collegate tra loro), ai quali viene applicata la tensione di alimentazione e che generano il campo magnetico. Gli avvolgimenti statorici trifase possono essere collegati a stella oppure a triangolo. Questo è possibile con motori dotati di morsettiera con 6 morsetti, permettendo di alimentare lo stesso motore con tensioni trifase di rete differenti. Il secondo elemento è il rotore che viene posizionato all'interno dello statore, e costituisce il circuito indotto della macchina. Per un motore a gabbia di scoiattolo il rotore è costituito da un sistema di sbarre conduttrici (rame o alluminio) coassiali all'asse di rotazione, e pressofuse direttamente nelle cave ricavate lungo tutta la periferia esterna del nucleo ferromagnetico. Le sbarre vengono chiuse in cortocircuito da due anelli conduttori posti agli estremi che costituiscono anche un fissaggio meccanico per le sbarre stesse. Si ottiene così un rotore estremamente compatto e robusto, al quale si fissa anche l'albero del motore. Il campo magnetico indotto, che costituisce il principio di funzionamento del motore, porta quindi in rotazione l'albero del motore convertendo l'energia elettrica in meccanica.

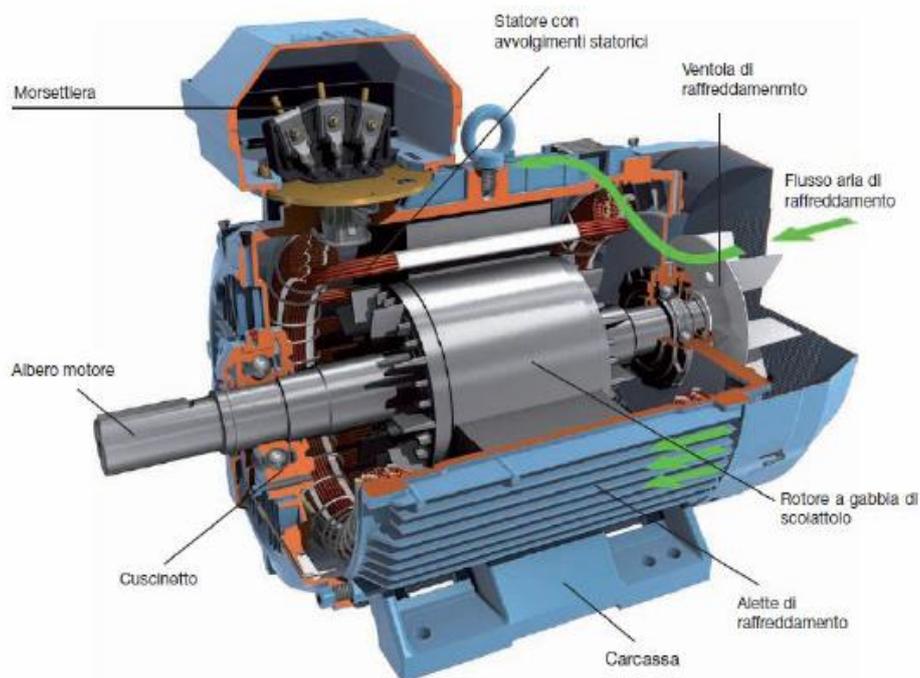


Figura 4.4 Schema motor

4.2.1 Dinamica Del Veicolo

L'analisi dinamica longitudinale inizia considerando il veicolo in moto a velocità costante su una strada piana. Le forze che devono essere vinte per mantenere costante la velocità sono la resistenza aerodinamica e quella al rotolamento. Al crescere della velocità l'importanza della prima aumenta rispetto alla seconda e ad un certo punto diviene persino più importante. Se la strada è in pendenza, alla resistenza al rotolamento ed a quella aerodinamica deve essere aggiunta la componente del peso in direzione parallela alla velocità. Tenendo anche in considerazione la portanza aerodinamica, la resistenza totale al moto può essere scritta nella forma:

$$R_t = R_r + R_a + R_p \quad (4.1)$$

Dove:

$$R_r = \left[mg \cos(\alpha) - \frac{1}{2} \rho v^2 S C_z \right] (f_0 + K v^2) \quad (4.2)$$

È la resistenza al rotolamento, con i seguenti valori sperimentali di f_0 :

Tabella 4.1

Coefficients sperimentali f_0 di resistenza al rotolamento			
Pneumatici per autovettura:		Pneumatici per camion e autobus:	
Asfalto omogeneo, pneumatici normali	0,013	Asfalto omogeneo, pneumatici a bassa resistenza	0,08
Calcestruzzo liscio	0,015	Asfalto omogeneo, pneumatici normali	0,010
Calcestruzzo rugoso	0,017	Asfalto omogeneo, pneumatici di piccolo diametro	0,013
Lastricato ottimo	0,018	Terra	0,05 - 0,2
Lastricato buono	0,022	Sabbia sciolta, uso in fuoristrada	0,2 - 0,5
Lastricato scadente	0,033		
Macadam	0,02 - 0,035		
Terra	0,045 - 0,16		
Sabbia sciolta, uso in fuoristrada	0,15 - 0,35		

K si ricava tramite l'espressione seguente:

$$K = (0,5/10) * [3,6]^2 = 0,00000648 \quad (4.3)$$

Gli altri termini sono:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x \quad (4.4)$$

Che è la resistenza aerodinamica.

$$R_p = mg \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

È la resistenza offerta dalla pendenza stradale.

L'espressione finale diviene:

$$R_t = \left[mg \cos(\alpha) - \frac{1}{2} \rho v^2 S C_z \right] (f_0 + K v^2) + \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x + mg \sin(\alpha) \quad (4.6)$$

Per le leggi della fisica affinché il veicolo proceda ad una velocità stabilita deve sussistere una forza di avanzamento F_a che contrasti la resistenza totale R_t cioè che sia di verso opposto e di modulo almeno pari:

$$F_a > R_t \quad (4.7)$$

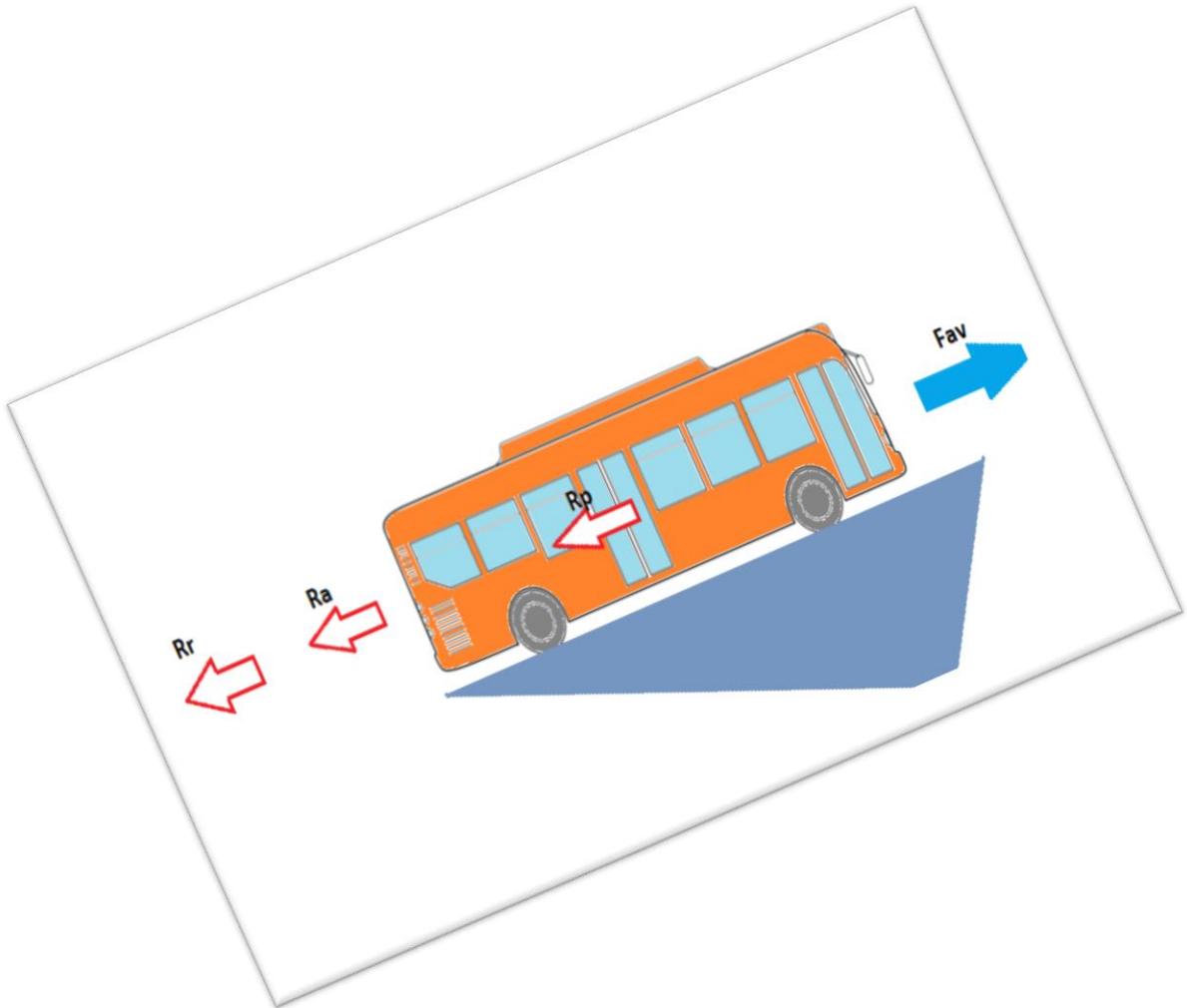


Figura 4.5 Bus piano inclinato

La potenza necessaria al moto P_n a velocità costante può essere ottenuta semplicemente moltiplicando il valore della resistenza totale per la stessa velocità:

$$P_n = R_t * v \quad (4.8)$$

il moto è quindi possibile solamente se la potenza disponibile risulta essere maggiore o uguale alla potenza necessaria effettiva ottenuta come rapporto tra P_{n_max} e i rendimenti di trasmissione, motore e convertitore:

$$P_{disp} \geq P_{n_eff} = \frac{P_{n_max}}{\eta_{tr} * \eta_{mot} * \eta_{conv}} \quad (4.9)$$

I termini presenti nelle equazioni hanno i seguenti significati:

- η_{conv} : rendimento del convertitore
- η_t : rendimento del sistema di trasmissione
- η_m : rendimento del motore elettrico di trazione
- V : velocità del veicolo (m/s)
- g : accelerazione di gravità [9.81 m/s²]
- f_v : coefficiente di attrito volvente
- ρ_a : densità dell'aria [1.202 kg/m³]
- A_f : area frontale del veicolo [m²]
- C_D : coefficiente di aerodinamicità del veicolo
- M_v : massa totale del veicolo [kg]

Dai dati di progetto si evince che il dislivello totale è pari a 28 metri quindi è possibile calcolare l'angolo alfa rappresentativo della pendenza del percorso, quindi considerando metà del percorso ovvero 11,8/2=5,9 metri si ricava un $\alpha=0,004$ valore del tutto trascurabile, quindi non verrà considerato né il contributo della resistenza offerta dalla pendenza stradale né la componente in asse z.

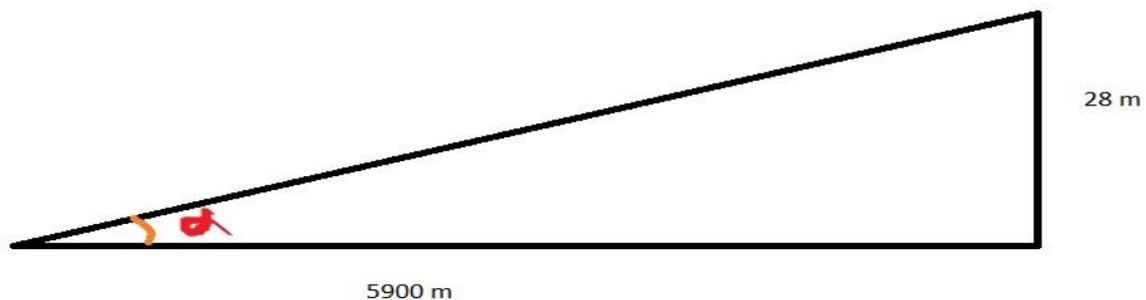


Figura 4.6

Assumendo per il bus un C_x o C_D pari a 0,6, per i tre rendimenti un valore pari a 0,9, una massa del veicolo pari a 16000 kg con l'aggiunta del peso massimo dei passeggeri 82*70=5740 Kg con un totale $M=16000+5740=21740$ Kg, un coefficiente di attrito volvente pari a 0,65, calcolata l'area frontale A_f o S pari a 6,9 m², considerando una velocità media di 10 Km/h e sostituendo nell'espressione si ricava il valore della potenza che dovrà fornire il motore :

$$P_n=10373W=10,373Kw \quad (4.10)$$

4.2.2 Recupero In Frenata

Il secondo passo sarà quello di dimensionare il pacco batterie necessario a fornire una quantità di energia in relazione ai dati di progetto, infatti considerando che una parte della potenza totale venga recuperata durante la fase di frenatura, l'effettiva energia che il pacco batterie dovrà fornire sarà ricavato come differenza tra la potenza in trazione moltiplicata col rispettivo tempo di trazione e l'aliquota di tale potenza per il tempo di frenata, dal grafico sottostante si nota che nel range da 10 a 20 km/h l'energia recuperata in percentuale data come differenza tra la curva in alto, ovvero la linea di tendenza dei risultati ottenuti senza recupero e la curva più in basso che è quella relativa al massimo recupero in frenata applicabile (frenata brusca) che però risulta poco confortevole per i passeggeri, oppure dalla curva centrale che è quella rappresentativa del recupero di energia con frenata più confortevole, e tale differenza si attesta intorno al 40%

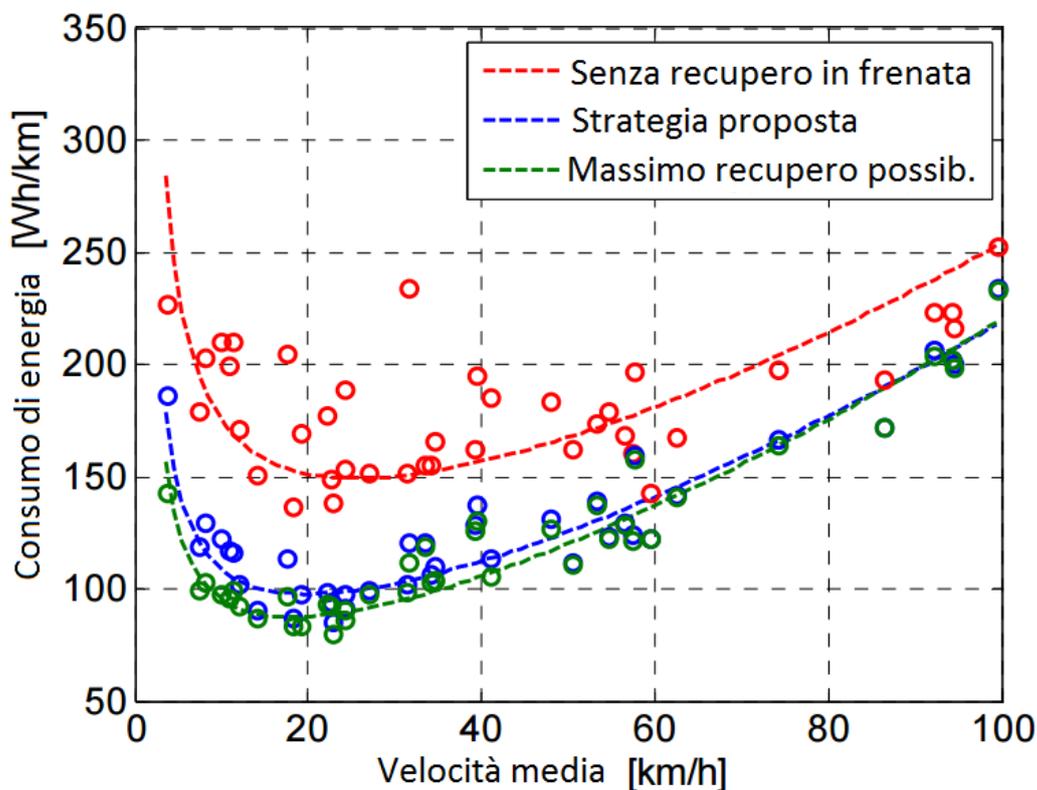


Figura 4.7

Per il calcolo del tempo di trazione si consideri il tragitto che dovrà percorrere il bus elettrico che sarà pari a 11,8 Km e tale tragitto verrà percorso un numero pari a 6,61 considerando anche il tragitto necessario per l'andata e il ritorno in autorimessa, quindi:

$$t_t = 78/10 = 7,8 \text{ ore} \quad \text{tempo di trazione} \quad (4.11)$$

L'energia di scarica necessaria sarà quindi:

$$E_D = (P_n * t_t) - \alpha (P_n * t_t) = (10,373 * 7,8) - 0,4 (10,373 * 7,8) = 80,909 - 32,363 = 48,546 \text{ Kwh}$$

$$\text{con } \alpha = 0,4 \quad (4.12)$$

Lo stesso risultato poteva essere ricavato per via teorica considerando l'energia cinetica posseduta dal veicolo un istante prima di decelerare:

$$E_{rec_eff} = \frac{1}{2}mv^2\eta_{sist_rec} \quad (4.13)$$

Considerando un rendimento del sistema di recupero pari a 0,4 si ottiene un energia di recupero pari a

$$E_{rec_eff} = 31,696 \text{ Kwh} \quad (4.14)$$

Che è circa il 40% dell'energia totale. Tale dato può essere preso in considerazione per il dimensionamento degli accumulatori al litio e per i supercondensatori mentre i costruttori di batterie al piombo non danno facilmente indicazioni sulle correnti massime che una batteria può gestire senza danni in frenata, danno invece indicazioni sulla ricarica rapida delle batterie che in alcuni casi può arrivare a due volte la corrente ammissibile in una scarica di 1 ora, valore indicato come 2C. Per correnti maggiori, la tensione del pacco salirebbe a valori non accettabili per una corretta gestione del sistema, e quindi le potenze di recupero sono necessariamente limitate, approssimativamente la metà di quelle possibili in scarica, quindi per tale tipologia non verrà considerata alcuna energia di recupero, quindi per tale batterie l'energia sarà:

$$E_D = 10,373 * 7,8 = 80,909 \text{ Kwh} \quad (4.15)$$

4.3 Pacco Batterie

Il dimensionamento del pacco batterie dovrà essere fatto per le tre differenti tipologie di batterie trattate nel progetto, ovvero batterie al piombo, batterie al litio e supercondensatori. Essi presenteranno valori minimi e massimi dello stato di carica diversi e di conseguenza diverso sarà il valore della capacità energetica del sistema di accumulo quindi per determinarla si deve necessariamente conoscere oltre all'energia di scarica, anche il valore massimo e minimo dello stato di carica SOC:

$$E_{CS} = \frac{E_D}{SOC_t - SOC_b} \quad (4.16)$$

I termini presenti nell'equazione hanno i seguenti significati:

- E_D : energia di scarica
- SOC_t : valore massimo dello stato di carica
- SOC_b : valore minimo dello stato di carica

4.3.1 Batterie Al Piombo

Considerando una tensione del motore di 360 V è logico dimensionare la tensione del bus DC con una tensione di almeno 370 V, e considerando che per le batterie al piombo valori tipici di SOC sono:

valore massimo dello stato di carica : $SOC_t = 0,95$
valore minimo dello stato di carica : $SOC_b = 0,3$

si può ricavare l'energia accumulata dal pacco batterie:

$$E_{cs} = 124,475 \text{ Kwh} \quad (4.17)$$

Si consideri una tensione di cella pari a 2V, da cui si ricava il numero di celle poste in serie:

$$N = 370/2 = 185 \quad (4.18)$$

Mentre la capacità si ricava partendo dal valore di energia di scarica E_D dividendola per la tensione del bus DC 370V:

$$C = 218,67 \text{ Ah} \quad (4.19)$$

Scegliendo delle batterie C_{10} tale pacco batterie potrà fornire per 10 ore consecutive una corrente di:

$$I = 218,67/10 = 21,8 \text{ A} \quad (4.20)$$

Per quanto riguarda il calcolo del tempo di ricarica bisogna fare alcune considerazioni sulla corrente di ricarica, infatti nel caso specifico delle batterie al piombo la corrente di ricarica deve essere al massimo 1/10 della capacità delle batteria stessa, quindi essa sarà pari a 21,8A. Considerando una tensione del caricabatteria di 340V si ricava la potenza di ricarica:

$$P_R = V * C_R = 340 * 21,8 = 7236,5 \text{ W} = 7,412 \text{ Kw} \quad (4.21)$$

Durante la fase di ricarica l'energia da recuperare sarà quella consumata giornalmente ovvero $E_D = 80,909 \text{ Kwh}$, da qui possiamo ricavare il tempo totale di ricarica del mezzo:

$$T = E_D / P_R = 10 \text{ ore}$$

4.3.2 Batterie Al Litio

Le batterie al litio sono quelle con la più alta densità di energia esistente, e presentano i seguenti valori di stato di carica:

valore massimo dello stato di carica : $SOC_t = 0,95$
valore minimo dello stato di carica : $SOC_b = 0,25$

dai quali è possibile ricavare il valore di energia accumulata

$$E_{cs} = 69,351 \text{ Kwh} = 69351 \text{ Wh} \quad (4.22)$$

Considerando un valore di tensione per cella pari a 3,7 V ricaviamo il numero necessario di celle da porre in serie per avere una tensione di 370 V del bus DC:

$$N=370/3.7= 100 \quad (4.23)$$

La capacità del pacco batteria è:

$$C= E_D \backslash V=131,2 \text{ Ah} \quad (4.24)$$

Scegliendo delle batterie C₁₀ tale pacco batterie potrà fornire per 10 ore consecutive una corrente di:

$$I=13,1 \text{ A} \quad (4.25)$$

Sapendo che per le batterie al litio la corrente di ricarica può essere 1\5 della capacità d'accumulo quindi:

$$I_R =131.2/5= 26,2 \text{ A} \quad (4.26)$$

La potenza di ricarica sarà calcolata sempre con una tensione di ricarica pari a 340 V dunque:
 $P_R=V \cdot I_R = 340 \cdot 26,2 =8921,6 \text{ W} = 8,921 \text{ Kw}$ (4.27)

Durante la fase di ricarica l'energia da recuperare sarà quella consumata giornalmente ovvero $E_D=48,546 \text{ Kwh}$ dunque il tempo di ricarica si ricava come:

$$T= E_D / P_R= 5 \text{ ore} \quad (4.28)$$

4.3.3 Supercondensatori

Tale tecnologia permette di sfruttare completamente le fasi di carica e scarica, quindi possiamo considerare valori di stato di carica:

valore massimo dello stato di carica : $SOC_t = 1$

valore minimo dello stato di carica : $SOC_b =0$

di conseguenza l'energia accumulata coincide con l'energia di scarica:

$$E_{CS} =48,546 \text{ Kwh} = 48,546 \text{ Wh} \quad (4.29)$$

Con la capacità sempre di $C=131,2 \text{ Ah}$

Si potrebbe ad esempio fare la scelta di avere 4 modulo ciascuno da 92,5V posti in serie per avere una tensione d'uscita paria a 370V. I supercondensatori rispetto ai classici accumulatori elettrochimici permettono tempi di ricarica dell'ordine dei minuti e quindi non avrebbe senso dimensionare l'intero pacco batterie per effettuare una sola ricarica, anziché fare un dimensionamento più ridotto ma effettuare più ricariche durante la giornata.

4.4 Ricarica Conduttiva E Induttiva

La linea attualmente in uso dal gruppo GTT è quella percorsa da autobus elettrici ELFO, sui quali vengono effettuati due tipi di ricarica, quella conduttiva (effettuata nel periodo di riposo ovvero quello notturno) e quella induttiva (effettuata ai capolinea). Ogni autobus inizia il servizio con le batterie cariche al 100% grazie alla ricarica conduttiva per poi effettuare 12 ricariche induttive nelle 8 corse complete. Il ciclo di ricarica rapida induttiva ha una durata di circa 11 minuti ed ha la funzione di ricaricare parzialmente le batterie dei mezzi dal 9 al 14 %, in tal modo è possibile garantire il funzionamento dell'autobus per un'intera giornata di lavoro senza le lunghe soste che sarebbero necessarie nel caso in cui le ricariche previste fossero solo quelle induttive tradizionali. Un esempio di gestione operativa con ricarica induttiva ci è dato dal grafico sottostante:

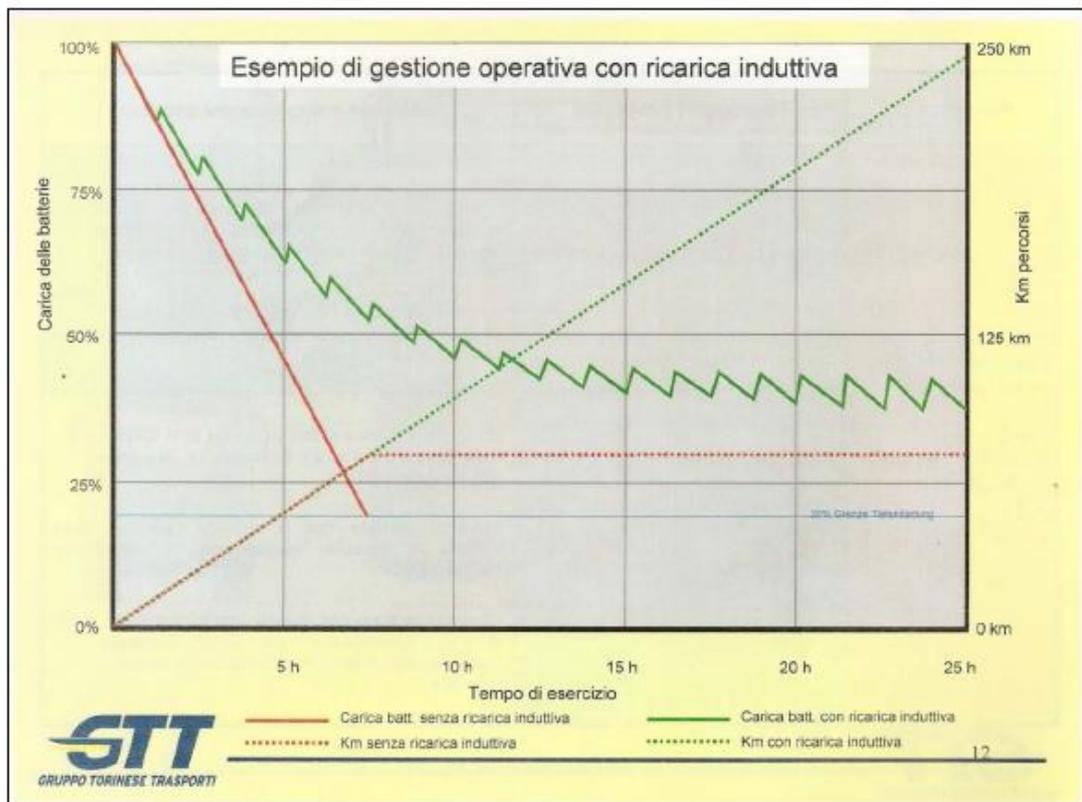


Figura 4.8

Da tale grafico si osserva quanto l'impiego della sola ricarica conduttiva comporti un rapido esaurimento delle batterie, garantendo un'autonomia al mezzo inferiore ai 100 km (linea rossa), mentre l'ausilio della ricarica induttiva garantisce un'autonomia molto più elevata (linea verde). Per tale progetto sono state utilizzate due diverse tipologie di batterie, ovvero batterie piombo-gel attualmente in uso contro i supercondensatori Maxwell. Oltre alla differente tipologia di accumulatori utilizzata nel progetto, differente è anche il sistema di ricarica, infatti con le batterie al piombo-gel il sistema in uso è il Wampfler con un dimensionamento tale da effettuare due ricariche per ogni percorso, uno all'inizio e l'altro a metà dei 11,8. Il secondo sistema utilizzato con i supercondensatori Maxwell è il sistema K-Bus che permette il recupero d'energia in frenata pari al 40% del consumo di energia totale e inoltre il dimensionamento del pacco di supercondensatori è fatto in maniera tale da effettuare più ricariche durante un singolo percorso in particolare sei.

Partendo dal primo sistema, si consideri che il consumo di energia secondo i dati di valutazione ambientale ed energetica prodotti da GTT, è per ogni bus di circa 1 kWh per kilometro, e considerando che un autobus a combustione interna di analoghe caratteristiche consuma circa 4,27 kWh per kilometro, pari a 0,43 litri di gasolio, si evince subito il rilevante minor consumo energetico degli autobus elettrici rispetto a quello dei bus a motore endotermico. In base alle considerazioni fatte il pacco batteria è così dimensionato:

Tabella 4.2

Consumo bus	1 kWh/km
Pacco batterie a bordo bus	56 batterie piombo-gel da 6V del peso di kg. 34 l'una per complessivi 336V/180Ah

Per quanto riguarda il dimensionamento del pacco di supercondensatori in base alle considerazioni precedentemente fatte si ha:

Tabella 4.3

Consumo bus	0,6 kWh/km
Pacco supercondensatori a bordo bus pacco (max) supercondensatori presso pensilina	435 supercondensatori Maxwell MC Power Series BCAP3000 P270 da 2,7 Volt, di 0,55 kg l'uno per complessivi 1,45 kWh di energia immagazzinabile

Come si può osservare in questo caso il dimensionamento del pacco batterie è decisamente più ridotto rispetto al progetto iniziale in quanto si sfrutta la proprietà di ricarica veloce per questa tipologia di batterie, da effettuare più volte durante il tragitto.

Particolarmente importante è il confronto tra le due diverse tipologie adottate considerando quali sono i consumi reali durante il tragitto:

Tabella 4.4

Dati di percorso e di consumo

GTT (TORINO) - Linea Star 1	Distanza in km	m. s.l.m.	Energia richiesta dislivello (kW)	K-BUS						WAMPFLER					
				K-BUS			EDLC			WAMPFLER			Batterie		
				Rifornimento kWh	Consumo in kWh	Carica Residua kW/h	n.	kg.	€	Rifornimento kWh	Consumo in kWh	Carica Residua kW/h	n.	kg.	€
CAVALLI CAPOLINEA		250		1,420		1,42	435	263	€ 23.186	6,000		6,00	56	1904	€ 20.000
Magenta	0,44	248	-0,06		0,204	1,22					0,38	5,62			
Duca Degli Abruzzi	0,52	246	-0,06		0,252	0,96					0,46	5,16			
Ferraris	0,29	244	-0,06		0,114	0,85					0,23	4,93			
G.A.M.	0,30	243	-0,03		0,15	0,70					0,27	4,66			
Vittorio Emanuele II	0,36	241	-0,06		0,156	0,54					0,3	4,36			
ARSENALE	0,34	239	-0,06	1,200	0,144	1,60	368	222	€ 19.593		0,28	4,08			
Arcivescovado	0,32	237	-0,06		0,132	1,47					0,26	3,82			
Roma	0,45	236	-0,03		0,24	1,23					0,42	3,40			
Carlo Emanuele II	0,47	235	-0,03		0,252	0,98					0,44	2,96			
Maria Vittoria	0,22	232	-0,09		0,042	0,93					0,13	2,83			
S. Ottavio	0,28	230	-0,06		0,108	0,83					0,22	2,61			
S. OTTAVIO	0,10	230	0	1,200	0,06	1,97	368	222	€ 19.593		0,1	2,51			
Gaudenzio Ferrari	0,42	228	-0,06		0,192	1,77					0,36	2,15			
Regina Margherita	0,26	226	-0,06		0,096	1,68					0,2	1,95			
Guastalla	0,30	224	-0,06		0,12	1,56					0,24	1,71			
Largo Belgio	0,26	224	0		0,156	1,40					0,26	1,45			
Ricasoli	0,33	223	-0,03		0,168	1,23					0,3	1,15			
Ospedale Gradenigo	0,39	222	-0,03		0,204	1,03					0,36	0,79			
OSPEDALE GRADENIGO CAPOLINEA	0,15	222	0	1,200	0,09	2,14	368	222	€ 19.593	6,000	0,15	6,64			
Regina Margherita	0,34	224	0,06		0,264	1,88					0,4	6,24			
S. Giulia	0,3	224	0		0,18	1,70					0,3	5,94			
Guastalla	0,31	225	0,03		0,216	1,48					0,34	5,60			
Gaudenzio Ferrari	0,29	228	0,09		0,264	1,22					0,38	5,22			
S. OTTAVIO	0,24	228	0	1,200	0,144	2,27					0,24	4,98			
Rosine	0,29	230	0,06		0,294	2,04					0,35	4,68			
Accademia Albertina	0,32	234	0,12		0,312	1,73					0,44	4,19			
Carlo Alberto	0,27	235	0,03		0,192	1,53					0,3	3,89			
Lagrange	0,18	236	0,03		0,138	1,40					0,21	3,68			
Gramsci	0,28	237	0,03		0,198	1,20					0,31	3,37			
ARSENALE	0,33	239	0,06	1,200	0,258	2,14					0,39	2,98			
Vittorio Emanuele II	0,42	241	0,06		0,312	1,83					0,48	2,50			
Galleria d'Arte Moderna	0,45	243	0,06		0,33	1,50					0,51	1,99			
Ferraris	0,18	244	0,03		0,138	1,36					0,21	1,78			
Duca Degli Abruzzi	0,24	246	0,06		0,204	1,16					0,3	1,48			
Magenta	0,50	248	0,06		0,36	0,80					0,56	0,92			
Palagiustizia	0,47	250	0,06		0,342	0,45					0,53	0,39			
CAVALLI CAPOLINEA	0,25	250	0		0,15	0,30					0,25	0,14			
Totali	11,86	28	0	7,420	7,12					12,000	11,86				

La simulazione sino ad ora mostrata evidenzia il grande vantaggio che si ha nell'utilizzare il sistema K-BUS. Di per se il bus elettrico della linea Star che sfrutta il sistema Wampfler con batterie al piombo-gel presenta già significative performance migliorative rispetto ad una linea con bus a motore endotermico standard. Nella tabella sottostante si vuole evidenziare come il costo dell'energia elettrica consumata è pari a circa un quarto rispetto al costo del carburante necessario per alimentare un bus di pari caratteristiche alimentato a gasolio:

Tabella 4.5

Tecnologia	Consumo l/km	Consumo kWh/km
Autobus linea Star	---	0,97
Autobus di pari caratteristiche (Alé MAN) con motore endotermico	0,43	4,27

4.5 Fattori Di Dimensionamento

Lo studio sino ad ora effettuato mette in evidenza il dimensionamento degli accumulatori elettrochimici in prima approssimazione, ovvero su tale analisi non sono stati considerati alcuni dei parametri fondamentali che caratterizzano le proprietà delle diverse tipologie di accumulatori.

Diamo adesso una stima di quanto questi parametri possono incidere sul dimensionamento complessivo di progetto.

Tabella 4.6

Tipologia	Energia massica Wh/kg	Potenza massica (†) W/kg	Efficienza energetica %	Vita cicli all'80% di scarica	Auto scarica % al mese	Costo €/kWh
Pb-acido	30-45	250	80-85	500-1000	3-15	100-150
Ni-MH	70-95	200-300	70-75	800-2000	2-8	500-900
Litio-ioni NMC	150-180 (*) 60-130 (°)	300-500 (*) 1300-2000 (°)	>95	500-2000	2-8	400-900
Na-NiCl	100-120	155-190	>95	3500	15 al giorno	400-500

4.5.1 Energia Massica

Tale parametro è ovviamente molto importante per il dimensionamento del pacco batteria infatti esso misura la quantità di energia che può accumulare la batteria per unità di peso, misurata appunto in Wh/kg. Nel caso in esame di batterie al piombo esse hanno un energia massica o specifica di 45 Wh/kg e dovendo accumulare un energia di $E=124,475$ kWh, il peso complessivo del pacco batterie sarebbe di

$$M_{pb} = 2766 \text{ Kg}$$

Per le batterie al litio l'energia specifica è di 150 Wh/kg quindi dovendo accumulare un valore di energia pari a $E=69,351$ Kwh quindi si ha che il peso totale diviene pari a

$$M_{li} = 462 \text{ kg}$$

ovvero circa un terzo rispetto alle batterie al piombo.

Infine per i supercondensatori si ha un'energia massica di 5 Wh/kg e quindi per un accumulo di energia di $E_{sc} = 48,546 \text{ Kwh}$ si avrà una massa di

$$M_{sc} = 9709 \text{ Kg} \quad (4.30)$$

Ovvero 2/3 del peso del mezzo stesso, quindi dato inaccettabile per il dimensionamento con una sola ricarica giornaliera.

4.5.2 Densità Di Energia

Esso rappresenta l'energia che può accumulare la batteria per unità di volume, ed è importante valutarlo in fase di progetto in quanto le batterie in un veicolo non possono essere troppo voluminose né troppo ingombranti.

4.5.3 Cicli Di Vita

Tutte le batterie si degradano gradualmente via via che vengono utilizzate. Il numero di cicli di carica (e quindi di scarica) ammissibile determina la vita media di una batteria. Questo ne influenza ovviamente il costo, e da come si può osservare dalla tabella si passa progressivamente da 1000 cicli per le batterie al piombo a 2000 cicli per quelle al litio per poi avere le migliori caratteristiche con i supercapacitori con 1 milione di cicli. La vita in cicli di un accumulatore dipende fortemente dalla profondità a cui esso viene scaricato: una batteria con una vita in cicli con scarica al 100% pari a 500 può facilmente sopportare diverse migliaia di cicli se sottoposta a scariche con profondità del 50%. Un certo sovradimensionamento della batteria quindi, se da un lato ne aumenta costo peso e ingombro, dall'altro ne incrementa, in maniera anche considerevole, la vita.

4.5.4 Costo

Ultimo ma non per importanza è la funzione costo degli accumulatori, infatti tale funzione dipende sia dai materiali utilizzati sia dalla vita media della batteria. Anche una batteria costosa può essere accettabile se dura a lungo. Viceversa, si può accettare di dover cambiare una batteria spesso, purché costi poco. Valori tipici sul costo delle tre tipologie di batterie in esame sono:

- batterie al piombo 100 €/kWh
- batterie al litio 1000 €/kWh
- supercondensatori 6000 €/kWh

In base alle considerazioni fatte si intuisce subito che la funzione costo è direttamente proporzionale con le proprietà degli accumulatori elettrochimici.

5. Sistemi Di Ricarica E Impatto Sulla Rete E Sull'ambiente

5.1 Connessione Tra Veicolo E Rete Elettrica

Dovuta attenzione merita l'analisi dei processi di interconnessione tra rete elettrica e veicoli. Questo aiuta, ad evidenziare gli eventuali fattori problematici e a focalizzare le diverse strategie atte a risolvere gli stessi. Ora conosciamo meglio alcune caratteristiche principali del sistema di ricarica: esso utilizza corrente alternata con una frequenza di 50 Hz; in seguito la corrente viene distribuita all'utente finale ad un valore dato di tensione nominale. Il veicolo invece, di solito, è dotato di un generatore di corrente continua che viene identificato come il "pacco batterie". La tensione lato varia, sia in base alla potenza all'ingresso della batteria, sia a causa della carica di quest'ultima. Inoltre c'è da sottolineare la presenza di un sistema elettrico secondario che è costituito da accumulatori con tensione a 12 V. Questi rendono possibile il funzionamento dei sistemi ausiliari. Quindi possiamo dire che per alimentare un veicolo elettrico si rende necessario rispondere a diverse questioni. In primis c'è il bisogno di rendere funzionale il collegamento fisico tra le batterie e la rete elettrica. Poi bisogna trasformare la corrente elettrica da alternata a continua per permettere la ricarica degli accumulatori. E infine c'è la necessità di rendere più stabile possibile la tensione di ricarica degli stessi. Presentati gli attori che interagiscono, passeremo ora in rassegna le più diffuse tecniche per la ricarica.

5.2 Tecnica Di Ricarica A Bordo E A Terra

Il pacco batteria è formato da un insieme di dispositivi che ne permettono il controllo della ricarica. La complessità nell'insieme può aumentare o diminuire a seconda della scelta del sistema di ricarica. In effetti più sono lenti i tempi di ricarica, meno complessità si avranno dal punto di vista tecnico-ingegneristico. Al contrario, laddove si vogliono più veloci tempi di ricarica, allora si avranno maggiori e più sofisticati dispositivi. In base alla locazione fisica del pacco batteria si hanno due tipi di ricarica: ricarica a bordo e ricarica a terra. Se la strumentazione è locata nel veicolo allora si parla di ricarica a bordo. In questo caso il dispositivo di ricarica deve fornire la corrente necessaria. Inoltre in alcuni il tutto deve essere predisposto per una ricarica in sicurezza. Gli accumulatori posti nel veicolo sono, di solito, alimentati in corrente alternata. Quindi per permettere la carica direttamente dalla rete elettrica, c'è bisogno di trasformare l'energia elettrica in corrente continua. Il secondo metodo di ricarica è quella più tradizionale. Si chiama ricarica a terra, e infatti tutti i dispositivi sono al di fuori del veicolo. In molti casi questo sistema viene adottato per permettere la ricarica di specifici modelli. Anche in questa tipologia di ricarica si deve trasformare l'energia da alternata a continua. Una parte molto riconoscibile di questi caricabatteria sono le colonnine, che se presenti in maniera massiva, allora si comincia a parlare di stazioni di servizio. In base al numero di colonnine si possono avere stazioni di ricarica grandi, medie e piccole. Tra i dispositivi più utilizzati per la ricarica ci sono i MOSFET e gli IGBT. Questi hanno il vantaggio di fornire in modo più che preciso la tensione e la corrente in uscita. Inoltre sempre questi due modelli sono quelli che hanno raggiunto una completa conformità alle normative vigenti. Secondo la direttiva IEC 61851-1 si possono avere 3 classi di potenza di carica:

- monofase (230V-16A, 3.7kW);
- trifase (400V-32A, 22-43kW);
- carica veloce (AC:500V-250A, 220kW DC: 600V-400A, 240kW);

Tra queste classi non c'è una rilevante discrepanza dei dati e dei tempi di ricarica. Per sapere cosa scegliere per effettuare la ricarica, bisogna prendere in considerazione sia il tempo che si ha a disposizione, sia l'ubicazione in cui questo processo sarà portato a termine. I sistemi di ricarica sono un peso per la rete elettrica nazionale, per questo la migliore soluzione da adottare nella costruzione di simili impianti, è di produrre l'energia, per intero o in parte, da fonti rinnovabili.

5.3 Modalità Di Connessione

Il collegamento fisico tra la rete elettrica nazionale e il veicolo può avvenire per mezzo di tre varianti, che noi chiameremo di Tipo A, di Tipo B, e di Tipo C.

- Nel collegamento di tipo A, il cavo è dotato di un connettore, ed è direttamente collegato al sistema di alimentazione, e alla ricarica si collega con la presa del veicolo:

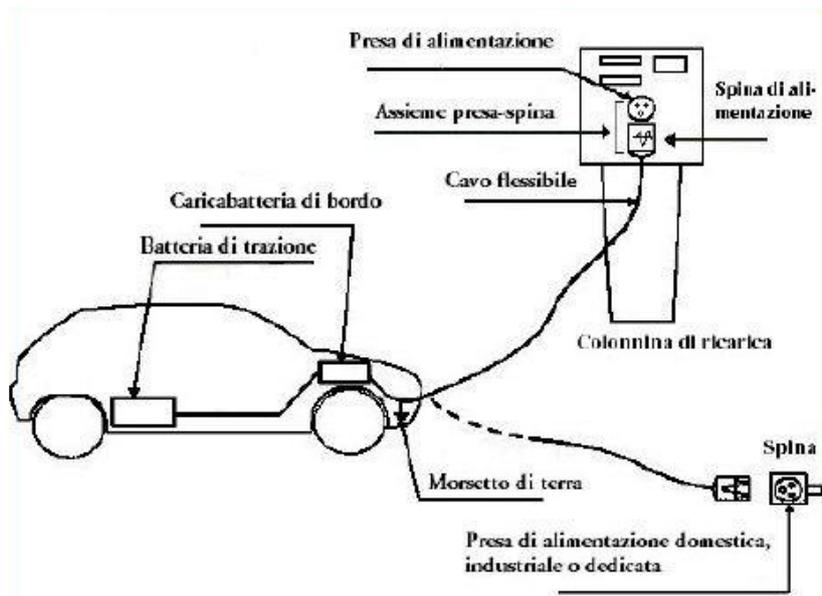


Figura 5.1

- Nel collegamento di tipo B, il cavo d'alimentazione per collegarsi al veicolo è fornito di eventuale strumentazione di controllo. Mentre non è collegato in modo fisso al sistema di alimentazione e neanche al veicolo:

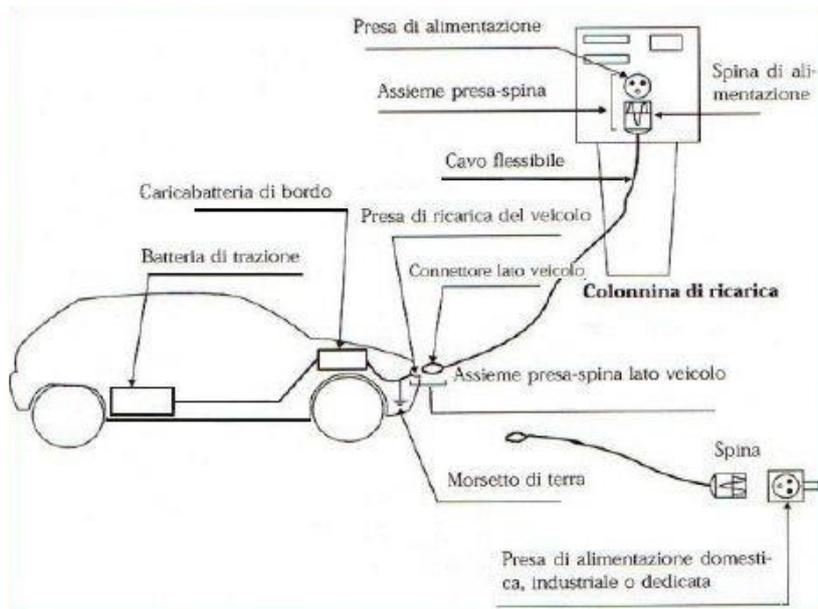


Figura 5.2

- Nel collegamento di tipo C, l'alimentazione è direttamente collegata al veicolo.

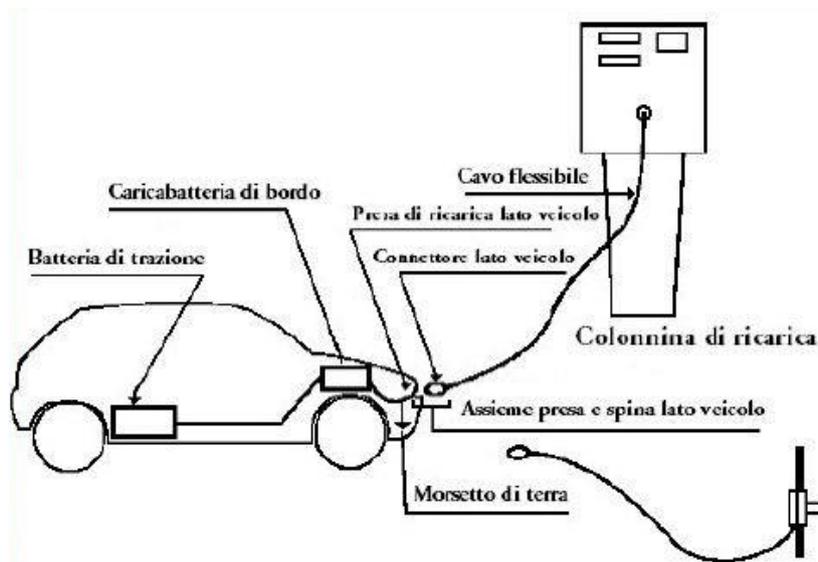


Figura 5.3

Ogni soluzione ha dei Pro e dei Contro. Ma in generale se il cavo è presente nel veicolo si può usufruire di più stazioni di ricarica. Mentre le altre due soluzioni permettono di ottimizzare peso, costi e tempi di costruzioni dovuti alla minore complessità dei cavi e delle strumentazioni. Tutti questi fattori e tipologie contribuiscono a far lievitare i costi di costruzione.

5.4 Ricarica Induttiva

Una delle altre modalità di ricarica è la ricarica induttiva. In questo caso l'energia elettrica viene trasmessa tramite un accoppiamento elettromagnetico. Questa modalità si presenta molto sicura data la totale assenza di contatto tra i conduttori. La ricarica può essere avviata semplicemente parcheggiando l'autoveicolo nelle vicinanze dei sensori che creeranno l'accoppiamento dando inizio alla ricarica induttiva. In alternativa si può sempre mettere in contatto le due parti manualmente. Tra i difetti da migliorare c'è il rendimento che è ancora piuttosto basso rispetto alle modalità di ricarica tradizionali.

5.5 Tempi Di Ricarica

I tempi di ricarica hanno una rilevanza molto alta poiché questi influenzano anche i costi e tutto il progetto. Se per esempio si scegliesse di privilegiare i tempi di ricarica, si otterrebbero sicuramente ricariche veloci, ma questo comprometterebbe la longevità del pacco batterie. Le linee di pensiero in questo senso sono molte, ma se volessimo specificare i problemi principali allora si può fare riferimento al seguente elenco:

- Scarsa longevità degli accumulatori
- Carico considerevole della rete elettrica nazionale per le ricariche giornaliere
- Lievitamento dei costi
- Potenza troppo alta che può essere pericolosa

Mentre quello che di positivo può essere evidenziato è:

- Autonomia aumentata
- Diminuzione dell'ingombro e quindi del peso
- Aumento complessivo dell'efficienza energetica

A livello ingegneristico questa tipologia di ricarica non presenta ulteriori problemi, ma nella fase di progetto e realizzazione richiede notevoli sforzi economici.

5.6 Scelta Della Tipologia Di Ricarica

In fase di progettazione bisogna decidere la tipologia di ricarica. Ad oggi le alternative possono ricadere o su una ricarica di tipo conduttivo, o su di una di tipo induttivo. Se si sceglie un sistema di ricarica conduttivo si hanno vantaggi di gran lunga maggiori. Infatti quest'ultimo ha una struttura semplice. Questo ne riduce i costi. Al contrario un sistema di ricarica induttivo presenta costi elevati e scarsa efficienza complessiva. Quindi facendo un confronto ci si rende conto che anche i dati, allo stato attuale delle cose, danno ragione di utilizzare un sistema di ricarica conduttivo: infatti si ha un'efficienza che va dal 4% al 20%. Questa scelta è ancora più importante se si vuole realizzare una stazione di ricarica pubblica. A questo proposito è piuttosto urgente che le case automobilistiche dell'elettrico stabiliscano quale sistema adottare, in modo da standardizzare le infrastrutture di servizio. Ad oggi l'Europa preferisce il metodo conduttivo, ma in Giappone e in America non emerge ancora un preciso orientamento.

5.7 Stazioni Di Ricarica

Dopo aver stabilito la tipologia di ricarica, bisogna fissare che tipo di stazione di ricarica costruire. In particolare in una stazione di ricarica sono presenti un insieme di colonnine che si interfacciano tra di loro e vengono gestiti da una colonnina che funge da dispositivo utile per i pagamenti. Se si vuole invece creare una rete più distribuita che copra il territorio è meglio optare per delle unità di colonnine isolate. Prendendo in rassegna tutti i motivi favorevoli e sfavorevoli si giunge alle seguenti osservazioni:

Se abbiamo colonnine isolate:

- Aumenta la comodità d'uso e la versatilità del servizio, oltre che la sua efficacia diretta sul territorio che può essere coperto in modo capillare.
- Facile installazione e integrazione con la rete elettrica nazionale.

Stazioni di ricarica:

- Maggior numero di utenti serviti contemporaneamente.
- Miglior grado di controllo e sicurezza, grazie alla concentrazione in un sol luogo di più colonnine. Inoltre i clienti si possono fidelizzare maggiormente.
- Migliore ripartizione dei costi.

C'è da aggiungere che l'ubicazione della stazione è sicuramente una scelta strategica. Infatti questa essere facilmente raggiungibile, avere superficie disponibile ad un numero minimo funzionale di utenti.

Conclusioni

Il problema delle emissioni nocive da parte dei veicoli alimentati da combustibili fossili e il conseguente esaurimento delle materie prime legate al petrolio ha spinto la società ma soprattutto i costruttori di automobili a realizzare veicoli elettrici. Sicuramente lo sviluppo di nuove tecnologie in tale campo e quindi la diffusione di tali veicoli permetterà un incremento dell'efficienza dello sfruttamento delle fonti energetiche nonché un'importante riduzione delle emissioni di agenti inquinanti responsabili dell'effetto serra. Lo sviluppo di tale settore è passato dallo studio di veicoli ibridi sino alla progettazione di veicoli con sola alimentazione elettrica anche se la sua diffusione è ancora limitata all'uso prevalentemente urbano. Altro importante campo di sviluppo è la conversione di veicoli già esistenti ma con alimentazione a combustione interna in alimentazione elettrica, e proprio su questo si è basato il lavoro di tesi. Per tale progetto si è voluto prendere in considerazione un bus del parco veicoli dell'azienda torinese trasporti GTT che possiede una motorizzazione diesel e convertirlo in bus elettrico, quindi si è preso in considerazione un tragitto già esistente e calcolato tramite la dinamica del mezzo qual'era la potenza necessaria a percorrere tale tragitto durante l'arco della giornata lavorativa. Si è quindi scelta una tipologia di motore elettrico che potesse sostituire in termini prestazionali il motore diesel e quindi la fase seguente del progetto si è basata sulla scelta del pacco batteria più idoneo. La scelta degli accumulatori elettrochimici è caduta su tre differenti tipologie ovvero batterie al piombo, batterie al litio e supercondensatori, quindi è seguito uno studio sulla capacità nominale del pacco batteria necessario a sostenere gli 80 km giornalieri effettuando una sola ricarica notturna. Tramite le specifiche tecniche degli accumulatori si è messo in evidenza che nelle condizioni di sola ricarica notturna non avrebbe avuto senso utilizzare un pacco batteria con tecnologia dei supercondensatori in quanto la massa di quest'ultimi sarebbe diventato un altro problema critico da affrontare come il costo, ma tale scelta non avrebbe avuto senso in quanto in tal modo non veniva sfruttato uno dei vantaggi che i supercondensatori hanno rispetto ai più diffusi accumulatori elettrochimici ovvero tempi di ricarica brevi. Scelta più saggia era quella delle restanti due tipologie di batterie dove si è notato un costo d'acquisto maggiore ma discrete caratteristiche tecniche in termini di tempi di ricarica per le batterie al litio rispetto alle batterie al piombo che hanno un costo iniziale decisamente inferiore ma a fronte di tempi di ricarica più lunghi della categoria. La seconda fase di progetto è stata quella di considerare la possibilità di effettuare più ricariche durante un singolo tragitto, e i risultati prima ottenuti sono stati confrontati con un progetto già esistente fatto su un altro veicolo elettrico del parco GTT denominato elfo, nel quale sono state prese in considerazione due sistemi di ricarica nello specifico il sistema Wampfler con batterie al piombo e una ricarica parziale a metà percorso, e il sistema K-bus che grazie ai supercondensatori è possibile effettuare ben cinque ricariche parziali per ogni singolo tragitto. I risultati hanno dimostrato che le spese affrontate per l'installazione di più punti di ricarica sono a beneficio di un più ridotto dimensionamento del pacco batteria, considerando però anche l'ipotesi di mal funzionamento di una delle stazioni di ricarica in particolar modo nel caso di supercondensatori dove sarà necessario aggiungere un ulteriore pacco batterie con tecnologia al litio per sopperire in caso di necessità. In questo lavoro di tesi si è voluto eseguire un primo dimensionamento degli organi necessari alla trazione dunque motore elettrico e pacco batterie in un'analisi di primo ordine ovvero considerando una pendenza trascurabile del percorso e una velocità costante del mezzo. In conclusione, si evince che questo lavoro rappresenta lo studio preliminare per la conversione ad un veicolo elettrico, in futuro sarà necessario correggere il dimensionamento dei componenti in funzione alle diverse condizioni del manto stradale e relative pendenze nonché alle tecnologie di accumulatori elettrochimici e non disponibili in commercio, allo scopo di costruire un prototipo che sia il più efficiente possibile.

Bibliografia

Capitolo 1

- Barsali S., “*Sistemi elettrici di bordo: attualità e prospettive*”, Pisa, 14 giugno 2002
- Chan C. C., *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles*, Proc. IEEE, vol. 95, pp. 704–718, Apr. 2007.
- Emadi A., Young J. L., and Kaushik R., “*Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, Giugno 2008
- Imai K., Ashida T., Zhang Y., and Minami S., “*Theoretical Performance of EV Range Extender Compared with Plugin Hybrid*”, Journal of Asian Electric Vehicles, Volume 6, No 2, Dicembre 2008
- Riboli G., Sala F., “*Studio di un veicolo ibrido serie con configurazione innovativa*”, Tesi di laurea, 2008/2009
- Sung-Tae J., Yeong P., Lee J.M., “*Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle, IEE Colloquium on Machines and Drives for Electric and Hybrid Vehicles* vol.124 n.1, pp.141-149, ottobre 2003.

Capitolo 2

- Burke A.F., “*Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, Aprile 2007
- Denbigh K. “*I principi dell'Equilibrio Chimico*”-Casa Editrice Ambrosiana, Milano (1977)
- Dibner, B. “*Alessandro Volta and the Electric Battery*” - Grolier Publishing, Franklin Watts, Inc. (1964)
- Tironi E., Piegari L., Musolino V., Grillo S., “*Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti(batterie + supercondensatori)*”, ENEA Report RdS/2011/34

Capitolo 3

- Chen M., Rinc'on-Mora G.A., *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance*
- Hussein A., Batarseh I.: ‘*An Overview of Generic Battery Models*’, Power and Energy Society General Meeting, IEEE (2011)
- Kai S., Qifang S. ‘*Overview of the Types of Battery Models*’, Proceedings of the 30th Chinese Control Conference (22-24 luglio 2011)

Moubayed N., Kouta J., Dernayka A., Outbib R.: '*Parameter identification of the lead-acid battery model*', Photovoltaic Specialists Conference, PVSC'08. 33rd IEEE (2008)

Sato S., Kawamura A. '*A New Estimation Method of State of Charge using Terminal Voltage and Internal Resistance for Lead Acid Battery*', Power Conversion Conference, (2002)

Tremblay O., Dessaint L.A., Dekkiche A. '*A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles* Electrical Engineering Department, Ecole de Technologie Superieure

Capitolo 4

Bruni S., *Appunti di Meccanica dell'Autoveicolo*. Politecnico di Milano. Milano, set. 2002.

Genta G. *Meccanica dell'autoveicolo. Collana di Progettazione e Costruzione delle Macchine*. Torino: Libreria Editrice Universitaria Levrotto & Bella, 2000.

GTT, «*Irisbus 491FCY.12 CITYCLASS Fuel Cell*,»

Guiggiani M.. *Dinamica del Veicolo*. Torino: CittàStudiEdizioni, 1998.

Universita degli Studi di Padova Dipartimento di Ingegneria Elettrica "*Veicoli Elettrici Ibridi*" 19 gennaio 2009

Capitolo 5

Bartolini A. "*L'Energia Elettrica*", *Infrastrutture di ricarica per lauto elettrica*, gennaio 2010

Mauri G. "*L'Energia Elettrica*", *Rete elettrica e reti intelligenti* gennaio 2010

Pede G., Rossi E., Villante C *Studio di una stazione di ricarica rapida per linea di trasporto pubblico urbano* (ENEA) settembre 2012