

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione di un pacco batteria per
motocicletta ibrida**



Relatore

Prof. Andrea Tonoli

Tutor aziendale

Fabrizio Impinna

Studente

Lorenzo Angaramo

Anno Accademico 2018/2019

C'è una forza motrice più forte
del vapore, dell'elettricità
e dell'energia atomica:
la volontà.
Cit. Albert Einstein

Sommario

L'attività proposta s'inserisce nell'ambito riguardante i sistemi di trazione elettrica per veicoli ibridi/elettrici. Nello specifico, lo studio si focalizza sullo sviluppo progettuale di un prototipo di pacco batteria per motocicletta ibrida. L'obiettivo principale è quello di effettuare un'analisi comparativa fra due soluzioni progettuali, basate sull'utilizzo di differenti tipologie di celle (pouch cells e celle cilindriche).

Il lavoro è strutturato in una prima fase di ricerca e di studio sullo stato dell'arte, atto ad approfondire le caratteristiche delle soluzioni presenti in commercio, seguita dall'attività di progettazione e dall'analisi comparativa delle due soluzioni. In particolare, nell'iter progettuale si prendono in considerazione i seguenti aspetti: la definizione dei requisiti di progetto, l'identificazione del volume e della posizione del pacco batteria all'interno del telaio, il dimensionamento elettrico dei moduli, lo studio dei materiali impiegati, la progettazione preliminare del sistema di raffreddamento, la realizzazione della linea di segnale e la messa in sicurezza. In questo studio non viene considerata la progettazione della struttura esterna del pacco batteria.

Dall'analisi comparativa emerge che, il pacco batteria costituito dalle celle cilindriche è leggermente sovradimensionato, a livello energetico, rispetto alla soluzione costituita dalle celle a sacchetto (pouch cells). Quest'ultima però, risulta essere più ingombrante e pesante, per la presenza di maggior struttura all'interno del modulo. In conclusione, quest'attività propone una solida base progettuale che potrà essere utilizzabile per future applicazioni. In tal caso, si consiglia un eventuale approfondimento sull'aspetto termico del pacco batteria, con adeguate simulazioni ed una successiva analisi progettuale della struttura esterna.

Indice

1	Introduzione	9
2	Stato dell'arte	11
2.1	Specifiche tecniche delle celle	11
2.2	Chimica delle celle più comuni in commercio	13
2.2.1	Cella al piombo acido	13
2.2.2	Cella al nichel-cadmio (NiCd)	14
2.2.3	Cella al nichel-metal-idruro (NiMH)	15
2.2.4	Cella sodio-zolfo (Na-S)	15
2.2.5	Cella agli ioni di litio (Li-Ion)	16
2.2.6	Cella ai polimeri di litio (Li-Poly)	19
2.2.7	Confronto fra le più comuni celle in commercio	20
2.3	Forma e struttura delle celle in commercio	22
2.3.1	Celle cilindriche (cylindrical cell)	22
2.3.2	Celle a bottone (button cell)	25
2.3.3	Celle a sacchetto (pouch cell)	26
2.3.4	Celle prismatiche (prismatic cell)	29
2.4	Motociclette ibride ed elettriche in commercio	31
2.4.1	Energica Ego	31
2.4.2	Zero DS	34
2.4.3	Honda PCX hybrid	35
2.4.4	Piaggio MP3 Hybrid 300ie	37
2.4.5	Vespa elettrica ed ibrida	39
2.5	Connessioni elettriche nel pacco batteria	40
2.5.1	Collegamenti elettrici cella-cella	41
2.5.2	Connessione dei tab delle celle	43
2.5.3	Connessione fra i moduli	46
2.6	Sistemi di raffreddamento	48
2.6.1	Raffreddamento a fluido	49
2.6.2	Raffreddamento tramite PCM	56
3	Requisiti di progetto del pacco batteria	59
3.1	Definizione dei requisiti di progetto	59
3.2	Analisi della forma e della posizione del pacco batteria	60
3.3	Forma del pacco adottata	65

4	Prima soluzione progettuale	69
4.1	Dimensionamento elettrico	69
4.2	Tipo di cella adottata	70
4.3	Struttura interna della macro cella	74
4.4	Struttura del modulo	76
4.4.1	Componenti di potenza nel modulo	77
4.4.2	Componenti di segnale nel modulo	85
4.4.3	Sistema di raffreddamento del modulo	88
4.4.4	Isolamento elettrico	92
4.4.5	Serraggio del modulo	94
4.5	Pacco batteria	96
5	Seconda soluzione progettuale	99
5.1	Tipo di cella adottata	99
5.2	Struttura interna del modulo	102
5.2.1	Disposizione delle celle	103
5.2.2	Componenti di potenza del modulo	105
5.2.3	Componenti di segnale nel modulo	107
5.2.4	Sistema di raffreddamento del modulo	108
5.2.5	Isolamento elettrico	112
5.2.6	Serraggio del modulo	115
5.3	Pacco batteria	116
6	Analisi comparativa delle due soluzioni	119
7	Conclusioni	123

Capitolo 1

Introduzione

Attualmente, si sta assistendo ad un periodo di forte crescita e sviluppo per quanto concerne la mobilità elettrica. Questo fenomeno ha un'importante valenza sociale ed ambientale per via della particolare attenzione verso il rispetto della Natura, ormai in balia degli effetti prodotti dall'inquinamento globale. Il cambiamento climatico drasticamente in corso, ha generato in alcune società, nuove politiche atte a ridurre l' emissioni di sostanze inquinanti, al fine di limitare e contenere i danni all'ambiente.

Questo fenomeno sociale, sta generando dei risvolti economici, nel settore industriale, agroalimentare e soprattutto in ambito automotive. In quest'ultimo mercato, molte case automobilistiche stanno lanciando sul mercato nuovi veicoli di natura ibrida, nate dall'integrazione fra il motore termico e la trazione elettrica. Questi veicoli ibridi (HEV - Hybrid Electric Vehicle) sono considerati attualmente, il miglior compromesso per adattarsi alle nuove esigenze del mercato, senza dover stravolgere l'intera produzione. Il passo successivo, già intrapreso da alcune aziende di nicchia, sarà quello di giungere alla completa elettrificazione dei veicoli.

Il concetto di propulsione elettrica applicato alla mobilità quotidiana, può sembrare innovativo, in realtà tale tecnologia è già stata studiata e sperimentata nella prima metà dell'Ottocento. All'epoca, il fenomeno non riscosse il successo desiderato a causa dei vari problemi tecnologici legati all'autonomia del pacco batteria. Infatti, negli ultimi anni dello stesso secolo, la trazione elettrica venne abbandonata a favore del motore termico, sostenuto dall'elevata disponibilità dei combustibili fossili.

In questi ultimi decenni, l'evoluzione tecnologica ha fatto incredibili passi in avanti, sia dal punto di vista elettrico che elettronico. Inoltre, anche la chimica delle celle è cambiata ed è stata perfezionata, andando ad aumentare l'autonomia e l'affidabilità dei pacchi batteria. Quest'ultimo, è l'elemento principale della propulsione elettrica ed è oggetto di studi sotto molti punti di vista.

L'obiettivo di questa attività è quello di sviluppare un prototipo di pacco batteria per motocicletta ibrida. Questa scelta progettuale deriva dalle analisi effettuate sullo stato dell'arte. Infatti, al giorno d'oggi, le motociclette ibride diffuse, sono di media-bassa potenza (in particolare scooter) e non esistono pacchi batteria standard, da catalogo. Pertanto, l'attività propone la progettazione di un pacco batteria, idoneo per essere integrato in una motocicletta ibrida. Tale iter progettuale potrà essere utilizzabile in future applicazioni, per ampliare l'offerta commerciale. Nello specifico, vengono messi a confronto due soluzioni di prototipi di pacco batteria, aventi tipologie di celle differenti, celle a sacchetto (pouch cells) e celle cilindriche. Il risultato finale dell'attività è quello di mettere in evidenza i punti di forza e di debolezze delle due soluzioni progettuali analizzate.

Il lavoro di questo studio è svolto prevalentemente con il software di modellazione 3D *Solidworks* e con fogli di calcolo *Microsoft Excel*.

Struttura della tesi

La tesi si suddivide in sette capitoli che trattano i seguenti argomenti:

- **Capitolo 1:** Introduzione dell'argomento e dell'obiettivo dell'attività.
- **Capitolo 2:** Ricerca ed approfondimento sullo Stato dell'Arte.
- **Capitolo 3:** Definizione dei requisiti progettuali del prototipo di pacco batteria e studio della forma.
- **Capitolo 4:** Descrizione della prima soluzione progettuale del prototipo di pacco batteria.
- **Capitolo 5:** Descrizione della seconda soluzione progettuale del prototipo di pacco batteria.
- **Capitolo 6:** Analisi comparativa fra le due soluzioni progettuali.
- **Capitolo 7:** Conclusioni.

Capitolo 2

Stato dell'arte

Nello *stato dell'arte* vengono presi in considerazione gli aspetti peculiari delle batterie secondarie. Pertanto, vengono riportate le caratteristiche principali delle batterie, la chimica delle celle in uso. Inoltre, si analizzano alcuni esempi di moto ibride ed elettriche presenti in commercio. Nelle ultime due sezioni vengono affrontate le diverse tipologie di connessioni elettriche e di sistemi di raffreddamento dei pacchi batteria.

Uno degli elementi chiave che compone il pacco batteria dei veicoli ibridi ed elettrici è la tipologia di cella. Quest'ultima ha il compito di accumulare l'energia elettrica nella fase di ricarica e di rilasciarla al motore elettrico nella fase di scarica, al fine di permettere il moto del veicolo per una certa autonomia di percorrenza. Le prestazioni di un veicolo ibrido o elettrico dipendono fortemente dalla tipologia di cella.

2.1 Specifiche tecniche delle celle

Per effettuare un'analisi completa delle varie tipologie di celle presenti nel mercato, occorre conoscere a priori le caratteristiche tecniche delle medesime, che vengono riportate in questo paragrafo, secondo la classificazione effettuata da *MIT Electric Vehicle Team*[59]:

- Tensione nominale di cella
Rappresenta il valore di differenza di potenziale che non provoca danni alla cella. Normalmente le celle funzionano entro un certo range di tensione, i cui valori limite vengono riportati nella scheda tecnica della cella. L'unità di misura è il Volt [V].
- Cut-off voltage della cella (tensione di taglio)
Tale specifica identifica il valore di tensione che ha la cella quando è completamente scarica. Anche qui l'unità di misura è il Volt [V].
- Capacità nominale di cella
La capacità nominale rappresenta la quantità di carica che una cella può erogare quando è sottoposta a scarica, con una certa corrente di scarica, fino al raggiungimento della condizione di cut-off voltage. La capacità è calcolata moltiplicando la corrente di scarica [A] per il tempo di scarica [h], pertanto l'unità di misura è [Ah]. A livello pratico tale grandezza viene definita come la corrente che la cella deve fornire per scaricarsi completamente in un'ora. La capacità è una grandezza intrinseca, che dipende dal tipo di chimica della cella. Diminuisce sempre all'aumentare del C-rate.
- Energia nominale di cella
Questa specifica risalta la capacità di accumulo di energia elettrica complessiva della cella

e viene calcolata moltiplicando la capacità di cella [Ah] per la tensione di cella; l'unità di misura è il Watt [Wh]. Come la capacità nominale anche l'energia nominale varia a seconda della chimica di cella e diminuisce al crescere del C-rate.

- Densità di energia di cella

Tale grandezza rappresenta l'energia elettrica accumulata per unità di peso [Wh/kg] o di volume [Wh/l] di cella. Entrambe dipendono dalla chimica di cella e una volta raggiunto il parametro energetico di progetto del pacco, definiscono il suo peso e il suo volume rispettivamente. In letteratura inglese, la densità energetica per unità di peso prende il nome di *specific energy* o *gravimetric energy density* mentre quella volumetrica prende il nome di *energy density* o *volumetric energy density*. La densità di energia è un parametro utilizzato per effettuare il confronto fra celle di diversa forma e tipologia.

- Potenza di cella

Si ottiene dal prodotto della tensione di cella [V] per la corrente di cella [A]. Conoscendo la dipendenza della tensione dalla corrente, si può valutare l'andamento della potenza di una cella al crescere della corrente di scarica. Una parte della potenza sviluppata viene dissipata sotto forma di calore, per l'*Effetto Joule*.

- Densità di potenza della cella

Tale grandezza rappresenta la potenza accumulata per unità di peso [W/kg] o di volume [W/l] di cella. Entrambe dipendono dalla chimica di cella e una volta raggiunto il parametro di potenza previsto dal progetto del pacco, definiscono il suo peso e il suo volume rispettivamente. In letteratura inglese, la densità di potenza per unità di peso prende il nome di *specific power* mentre quella volumetrica prende il nome di *power density*. La densità di potenza, insieme alla densità di energia sono dei parametri assoluti utilizzati nel confronto fra celle di diversa forma e tipologia.

- Vita

Indica il numero di volte che la cella può venire scaricata e ricaricata prima che le sue prestazioni in termini di capacità nominale scendano sotto un limite prefissato (generalmente al 75-80% del valore iniziale).

- Autoscarica

Tale fenomeno di degradazione comune a tutti i tipi di celle, può verificarsi nel periodo di stoccaggio o comunque di non utilizzo della cella e si traduce in una perdita di capacità e in una diminuzione della tensione della cella. Generalmente dovuto a una trasformazione chimica indesiderata dei materiali attivi che formano i terminali, in seguito a dissoluzione nell'elettrolita o per corrosione. La vita di una batteria è fortemente legata all'entità del processo di autoscarica ed esso è più rapido all'aumentare della temperatura.

- Corrente massima di scarica (continuativa) della cella

Stabilisce il valore della corrente massima che scarica la cella in modo continuativo. Tale parametro viene imposto dall'azienda produttrice che fissa tale limite, al di sopra del quale, la cella in fase di scarica potrebbe danneggiarsi o vedersi ridurre la sua capacità.

- Corrente massima di scarica impulsiva della cella

Definisce il valore della corrente massima che la cella può sopportare in fase di scarica, per specifici brevi periodi di tempo. Tali impulsi sono definiti dall'azienda produttrice al fine di evitare il danneggiamento della cella e solitamente vanno da una durata di 10 fino a 30 secondi.

- Tensione e corrente di ricarica di cella
Sono due grandezze imposte dalla ditta produttrice della cella che assicurano una ricarica sicura della cella.
- Resistenza interna della cella
Identifica il valore massimo o medio di resistenza Ohmica, generalmente differente fra la fase di scarica e di carica della cella.
- C-rate e E-rate
Nelle specifiche tecniche la corrente di scarica della cella viene definita anche attraverso il C-rate, che è un parametro normalizzato rispetto alla capacità, in modo tale da rendere confrontabile fra di loro diverse celle. A livello pratico definisce la velocità di scarica della cella, infatti è una misura della corrente di scarica necessaria ad esaurire l'intera capacità della cella stessa. L'unità di misura è $[h^{-1}]$. Per determinare il valore della corrente di scarica della cella, riferito al determinato C-rate, è necessario moltiplicare la capacità di cella per il valore di C-rate stesso. Per esempio una cella da 2,5 Ah di capacità se presenta un C-rate unitario, questa si scaricherà in un'ora con una corrente di 2,5 Ampere. Se la medesima cella presentasse un C-rate raddoppiato, allora la scarica completa avverrebbe in mezz'ora, sotto una corrente di scarica di 5 Ampere. Similmente E-rate definisce la potenza di scarica per esaurire completamente la capacità di cella. Valgono gli stessi ragionamenti visti in precedenza con il C-rate.

2.2 Chimica delle celle più comuni in commercio

In questo paragrafo vengono riportate le diverse tipologie di batterie secondarie più utilizzate in commercio e vengono messi in rilievo le principali caratteristiche.

2.2.1 Cella al piombo acido

Tale accumulatore è il più vecchio sistema di accumulo ricaricabile, molto usata su automobili, moto e altri veicoli a motore principalmente per consentire l'avviamento del motore termico ed alimentare tutte le utenze elettriche di bordo. Tipicamente, una batteria al piombo acido, presente nei veicoli, è costituita dalla serie di 6 celle (ognuna da 2 V). Sono formate da un catodo di ossido di piombo, da un anodo di piombo spugnoso e come elettrolita si ha una soluzione di acido solforico diluito in acqua distillata[62]. Per la natura stessa degli elettrodi, il piombo essendo un elemento pesante è pericoloso, per la possibile fuoriuscita dell'acido. Le celle al piombo sono in grado di fornire una f.e.m di circa 2 V con una densità di energia di circa 35 Wh/kg per circa 1200 cicli[62]. Il maggior vantaggio di quella chimica è il suo basso costo: una batteria grande (es. 70 Ah) è relativamente economica, se confrontata alle altre chimiche. Comunque, questa cella presenta meno densità d'energia rispetto alle altre tipologie attualmente diffuse[68]. Inoltre, per colpa di eventuali cortocircuiti ed essendo soggetto all'invecchiamento dei materiali, la vita di tale cella è stimata intorno ai 200-300 cicli di carica.

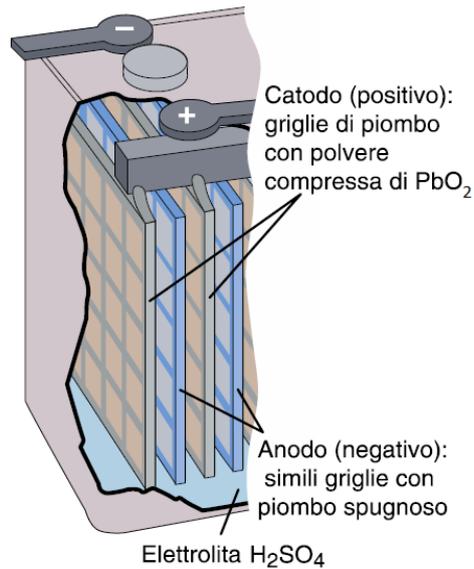


Figura 2.1: Sezione di una batteria piombo acido[62].

2.2.2 Cella al nichel-cadmio (NiCd)

Queste celle usano un ossido di Nichel per catodo, il cadmio per anodo, un sale per elettrolita. Sono in grado di fornire una f.e.m di circa 1,2 V con una densità di energia di circa 45 Wh/kg per un numero di cicli che va da 1000 (modello aperto) a 2000 (modello ermetico)[62].

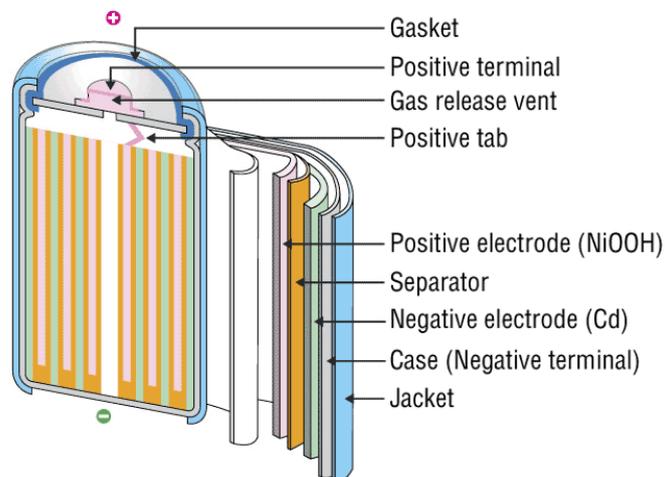


Figura 2.2: Sezione di una batteria nichel cadmio[62].

Presenta degli svantaggi[62], come il fatto di essere più costosa, di avere densità di potenza inferiore all'accumulatore Pb e inoltre si ha la carbonatazione dell'elettrolita per via di biossido atmosferico. Il principale problema di tale batteria è l'effetto memoria, per cui se per più volte si ferma la scarica a un livello parziale, questo sarà memorizzato come ultimo stadio di scarica. La batteria dimentica la sua capacità originaria. Tale fenomeno è dovuto alla crescita delle dimensioni dei cristalli di cadmio che causa la diminuzione della superficie elettrochimica attiva. In alcuni casi è possibile che i cristalli crescano tanto da penetrare il separatore e

cortocircuitare i due elettrodi, rendendo la batteria inservibile. Sono state rimosse dal mercato, per colpa dell'elevata tossicità del cadmio.

2.2.3 Cella al nichel-metal-idruro (NiMH)

Alla fine degli anni '60 del 900[62], è stato scoperto che alcune leghe metalliche ($LiNi_5$ e $ZrNi_2$) sono in grado di immagazzinare atomi di idrogeno che possono poi partecipare a reazioni reversibili. Nelle moderne batterie NiMH l'anodo è costituito da leghe di diversi metalli (V, Ti, Zr, Ni, Cr, Co, Fe), mentre il catodo è realizzato con ossido o idrossido di nichel e come elettrolita si ha KOH. La tensione di cella è di 1,4 Volt. Tali celle sono abbastanza simili a quelle nichel cadmio, ma hanno una maggiore densità di energia (70 Wh/kg)[68] e sono meno pericolose quando vengono smaltite in discarica[10]. Il nichel metal idrato ha in gran parte sostituito il nichel cadmio come cella ricaricabile in applicazioni per i consumatori. Inoltre, vi sono anche delle applicazioni nel campo automotive, nei veicoli ibridi come la *Toyota Prius* o la *Honda Insight/Civic*. Rispetto alle tipologie precedenti non sono molto più costose e soffrono molto meno dell'effetto "memoria".

2.2.4 Cella sodio-zolfo (Na-S)

Tale tipologia di cella è stata sviluppata intorno al 1960 dall'azienda Ford Motor Company[22]. In essa troviamo zolfo liquido all'elettrodo positivo mentre in quello negativo sodio liquido, separati da un elettrolito di ceramica beta allumina allo stato solido, il quale permette unicamente agli ioni Na^+ di passarvi attraverso, unendosi allo zolfo e formando polisolfuri di sodio[68]. Tale processo è reversibile in quanto l'applicazione di energia elettrica libera gli ioni positivi del polisolfuro di sodio attraverso l'elettrolito per riformare sodio elementare. Ogni cella ha circa 2 V di tensione e nonostante funzioni a temperature[68] dell'ordine dei $300^{\circ}C$. Tali temperature sono richieste per poter mantenere allo stato liquido i due elettrodi e ottenere un'elevata conduttività elettrica. Questa cella presenta come vantaggi un'elevata densità di energia e una vita in numero di cicli altrettanto importante.

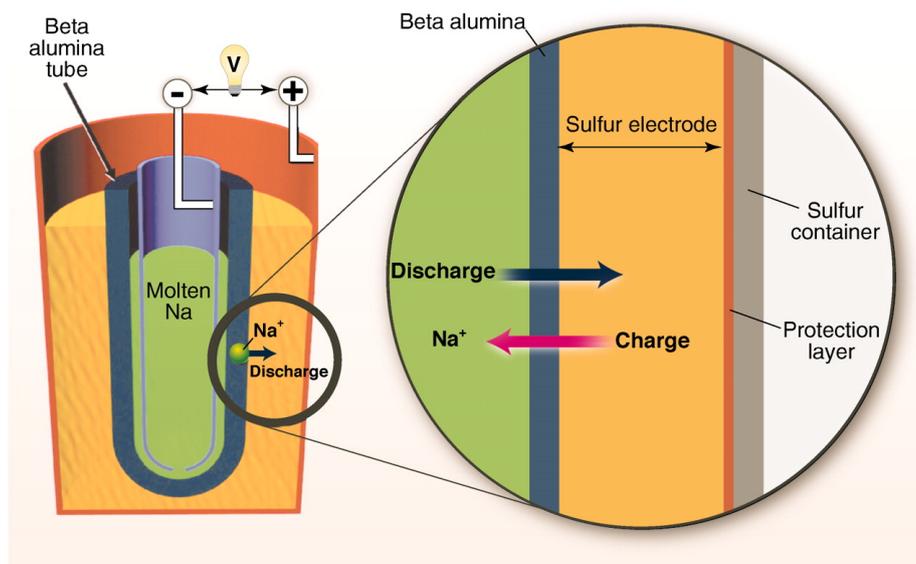


Figura 2.3: Sezione di una cella sodio-zolfo[11].

2.2.5 Cella agli ioni di litio (Li-Ion)

La batteria ricaricabile[67] nota come accumulatore agli ioni di litio (a volte abbreviato Li-Ion) è un tipo di batteria comunemente impiegato nell'elettronica di consumo ed è costituita da un certo numero di celle aventi tale chimica. È attualmente uno dei tipi più diffusi di batteria per laptop e telefono cellulare, nonché per alcune auto elettriche. *Gilbert N. Lewis*[67] fabbricò le prime batterie al litio nel 1912; la batteria ricaricabile agli ioni di litio necessitò di altri settant'anni di sviluppo prima che fosse sicura abbastanza per essere usata in massa sul mercato e la prima versione commerciale fu creata dalla *Sony* nel 1991. Tale tecnologia ha avuto e ha tutt'ora molto successo perché il litio è attraente per la sua leggerezza e il suo potenziale elettrico. Qui di seguito vengono riportate le caratteristiche principali[62] delle celle agli ioni di litio:

- alta energia specifica (fino a 250 Wh/kg);
- alta potenza specifica (fino a 500 W/kg per 20 secondi);
- alta tensione di cella (dai 3,3 ai 4,2 Volt);
- alta velocità di ricarica;
- bassa resistenza elettrica interna;
- elevato numero di cicli (vita);
- elevata disponibilità della materia prima;
- non soggette all'effetto memoria;
- bassa manutenzione;
- efficienza energetica elevata;
- celle poco pesanti.

Esistono differenti soluzioni tecnologiche che sfruttano questa chimica. Una delle tecnologie più diffuse usa un anodo di grafite e vari componenti per il catodo. L'elettrolita è un sale di litio sciolto in un solvente organico anidro. Gli studi attuali si concentrano sulla struttura del catodo; in passato, a causa dell'utilizzo di catodi in litio metallico, si presentava il problema dell'instabilità chimica, che spesso portava a surriscaldamenti ed esplosioni[19]. A seguito di questi inconvenienti la produzione di batterie si è concentrata sulla sostituzione del catodo a litio metallico con un catodo a litio non metallico, in particolare verso il catodo a ioni di litio dispersi in una matrice cristallina di un ossido stabile[19]. Vengono elencate le tipologie di celle agli ioni di litio, attualmente in commercio:

- litio-cobalto LCO ($LiCoO_2$)
- litio-ferro-fosfato LFP ($LiFePO_4$)
- litio-ossido di titanio LTO ($Li_4Ti_5O_{12}$)
- litio-ossido di manganese LMO ($LiMn_2O_4$)

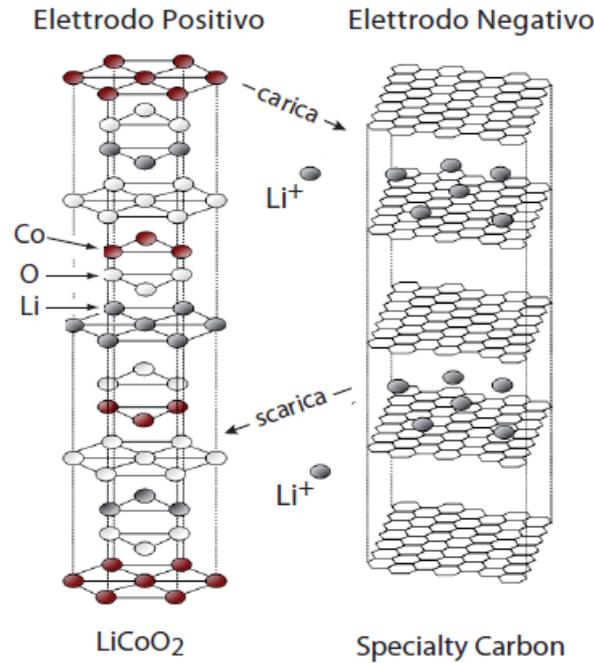


Figura 2.4: Struttura chimica della cella ioni di Litio[19].

Per quanto concerne gli svantaggi delle celle agli ioni di litio, possono riassumersi principalmente in queste macro voci:

- Instabilità termica (thermal runaway).
- costo elevato;
- processo di smaltimento delle batterie, complesso ed costoso;

Thermal runaway

Nel seguito viene riportata una trattazione del fenomeno e delle sue cause, [9]. Una batteria agli ioni di litio può esplodere se surriscaldata o caricata eccessivamente. In casi estremi, con un aumento della temperatura non controllato, si genera l'instabilità termica (thermal runaway). Ciò si verifica quando si innesca una reazione a catena inarrestabile determinata dalla temperatura, che rilascia tutta l'energia immagazzinata nella batteria nel giro di pochi millisecondi. Quando questo accade, la temperatura aumenta molto rapidamente fino a diverse centinaia di gradi centigradi, il separatore della batteria diventa improvvisamente conduttivo, si rompe e si infiamma o esplose. Il rischio di instabilità termica comincia ad una temperatura di 60°C e diventa critico a 100°C . Il momento in cui la deriva termica viene effettivamente attivata dipende dalla causa. Oltre alle cause puramente termiche, anche fattori meccanici ed elettrici possono portare all'instabilità termica. Ad esempio, un incidente può far sì che del materiale penetri in una cella di batteria e generi un cortocircuito interno, o che la cella della batteria si possa deformare a causa di un urto o di un grande impatto ed innescare un corto circuito esterno. Anche la carica e la scarica della batteria possono generare instabilità termica. Il fenomeno è particolarmente critico in fase di carica rapida, motivo per cui le correnti di carica devono essere attentamente monitorate. Lo stesso vale per il sovraccarico della batteria, con il superamento della tensione massima specificata nella scheda tecnica, vedere la figura 2.5.

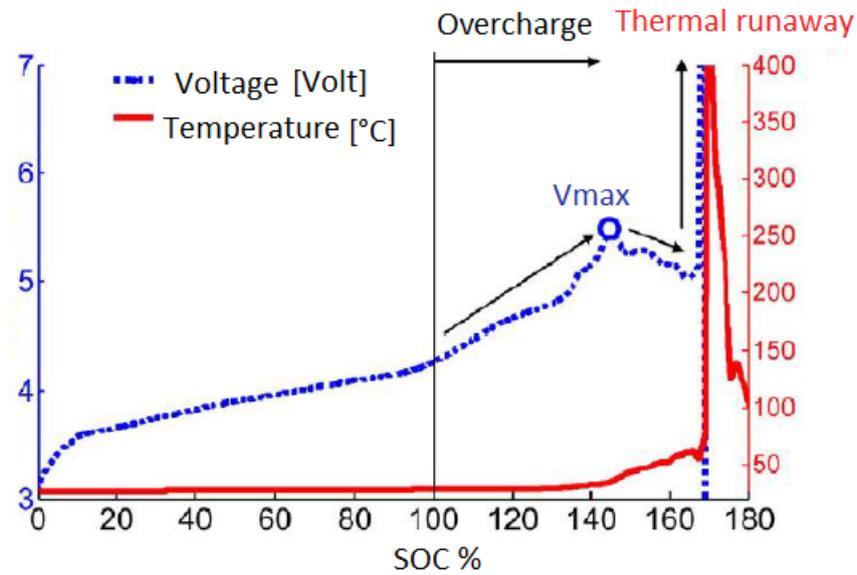


Figura 2.5: Andamento della temperatura durante la fase di ricarica, con raggiungimento dell'instabilità termica nel caso di sovraccarico della cella.[9]

Per evitare tale problematica, la cella deve essere munita di alcuni dispositivi di sicurezza (descritti nel paragrafo 2.3). Inoltre, l'elettronica del pacco batteria deve essere in grado di monitorare costantemente alcune grandezze fondamentali della cella (temperatura, tensione nominale, livello di carica e scarica ecc.) e deve intervenire con opportune logiche di controllo.

Tutto ciò comporta ad un incremento di costi, sia a livello di cella, sia a livello di pacco batteria. Lo smaltimento di questa tipologia di cella, non viene approfondito in quest'attività.

2.2.6 Cella ai polimeri di litio (Li-Poly)

La batteria ricaricabile nota come litio-polimero o litio polimerica (abbreviato Li-Poly o LiPo) è l'evoluzione della cella agli ioni di litio. Rispetto alla cella precedente, possiede la seguente caratteristica: l'elettrolita in sale di litio non è contenuto in un solvente organico, ma si trova in un composito di polimero solido, come ad esempio il poliacrilonitrile. Vi sono molti vantaggi in questo tipo di costruzione, tra cui il fatto che il polimero solido non evapora e non è infiammabile. Tale tecnologia è apparsa nel commercio destinato all'elettronica di consumo soltanto nel 1996, in precedenza era esclusivamente utilizzata solo in ambito militare[69].

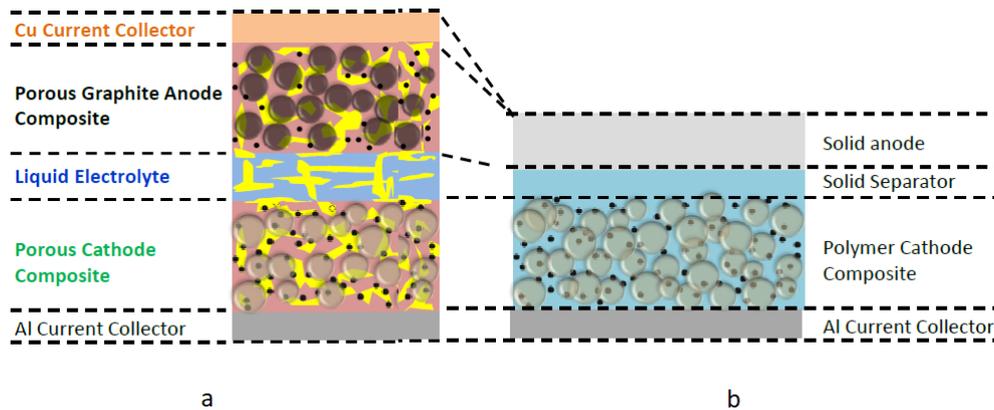


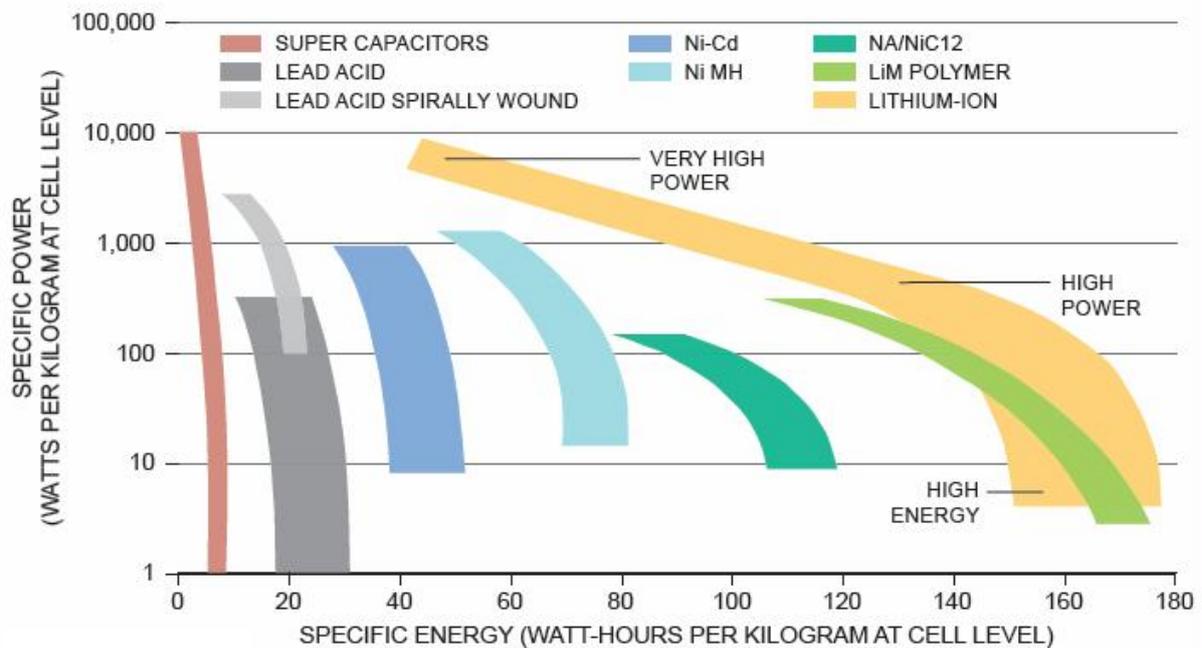
Figura 2.6: Confronto fra le strutture chimiche della cella a ioni (a) e a polimeri di litio (b).[62]

Per quanto concerne le caratteristiche tecniche[69] di tale tipologia di cella, la densità di energia può arrivare fino ai 250 Wh/kg (mentre con la soluzione agli ioni di litio, si aggira intorno ai 200 Wh/kg). Inoltre, il polimero solido è più stabile chimicamente rispetto all'elettrolita liquido, garantendo una vita più lunga in termini di cicli di carica. La tensione di cella si aggira intorno ai 3,7 Volt con una durata media di 1000 cicli di ricarica. Uno dei grandi vantaggi della tecnologia Li-Poly è che i costruttori possono sagomare la forma alle batterie più o meno come vogliono: questo può essere importante per i costruttori di telefoni cellulari, che costantemente lavorano su telefoni sempre più piccoli, sottili e leggeri.

Inoltre, sono molto usate nei pacchi batteria delle auto elettriche. Le batterie al litio vengono spesso utilizzate anche in quasi tutti i campi del modellismo dinamico. Sempre più diffuso è anche l'utilizzo di tali accumulatori nel softair[69].

2.2.7 Confronto fra le più comuni celle in commercio

In questo sotto paragrafo vengono messe a confronto le principali caratteristiche delle batterie più utilizzate in commercio, precedentemente descritte e non.



Fonte: Johnson Controls

Figura 2.7: Potenza specifica e densità di energia di alcune tipologie di celle[20].

Come si può notare dalla figura 2.7 le celle che hanno elevata potenza specifica sono poco energetiche e viceversa. Per tanto nella progettazione dei pacchi batteria è fondamentale individuare il giusto compromesso, in modo tale che la cella scelta possa soddisfare le richieste di energia e potenza previste dal progetto. Si osserva che, le celle agli ioni di litio e al litio polimerico presentano prestazioni migliori, rispetto alle altre celle, funzionando in un campo di potenza-energia più ampio.

Nella tabella 2.8, vengono sintetizzate le caratteristiche rilevanti delle celle prese in analisi, al variare della loro chimica. Si osserva che le celle al litio possiedono prestazioni migliori rispetto alle altre chimiche infatti, oltre ad avere un'elevata densità di energia, durano più a lungo nel tempo, non sono soggette all'effetto memoria e hanno una contenuta autoscarica.

Tipo	Densità di energia	Tensione di una cella	Durata di vita (cicli di carica)	Tempi di carica	Auto scarica mensile	Tensione minima di ricarica (per cella)	Effetto memoria
Piombo	30-50 Wh/kg	2,4 V	200-300	8-16 h	5 %	2,3 V	?
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	1500	1 h	> 20 %	1,25 V	Si
Ni-MH	60-120 Wh/kg	1,25 V	300-500	2-4 h	> 30 %	1,25 V	parziale
Ni-MH LSD	60-120 Wh/kg	1,25 V	1800	2-4 h	< 2 %	1,25 V	parziale
Alcalina	80-160 Wh/kg	1,5-1,65 V	100	1-16 h (secondo la capacità)	< 0,3 %	a seconda della batteria	?
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,7 V	500-1000	2-4 h	10 %	3,7 V	No
Li-Po	130-200 Wh/kg	3,7 V	1000	2-4 h	10 %	3,7 V	No

Figura 2.8: Caratteristiche delle celle attualmente in commercio[68].

2.3 Forma e struttura delle celle in commercio

In questo paragrafo si analizzano la forma e la struttura interna delle celle in commercio infatti, le batterie al litio possono essere costruite in una vasta gamma di forme e dimensioni in modo da riempire efficientemente gli spazi disponibili nei dispositivi che le utilizzano. Si presentano principalmente in tre configurazioni distinte:

1. Cilindriche (Cylindrical cell)
2. Batterie a bottone (Button cell)
3. A busta (Pouch cell)
4. Prismatiche (Prismatic cell)

2.3.1 Celle cilindriche (cylindrical cell)

Le celle cilindriche sono estremamente diffuse in commercio e vengono utilizzate sia come accumulatori primari che secondari. Queste celle sono molto diffuse perché sono facili da realizzare e da assemblare insieme, la loro struttura cilindrica può sopportare pressioni interne senza deformarsi e garantiscono un'elevata sicurezza durante il loro funzionamento[63]. Rispetto alle altre celle, questa tipologia presenta una densità di energia molto elevata (fino a 300 Wh/kg), una vita in termini di numero di cicli altrettanto elevata, inoltre sono economiche ma come svantaggio presentano capacità modeste ($1,1 \div 5Ah$).¹ Vengono solitamente utilizzate nei computer portatili e in diverse attrezzature mediche[63].

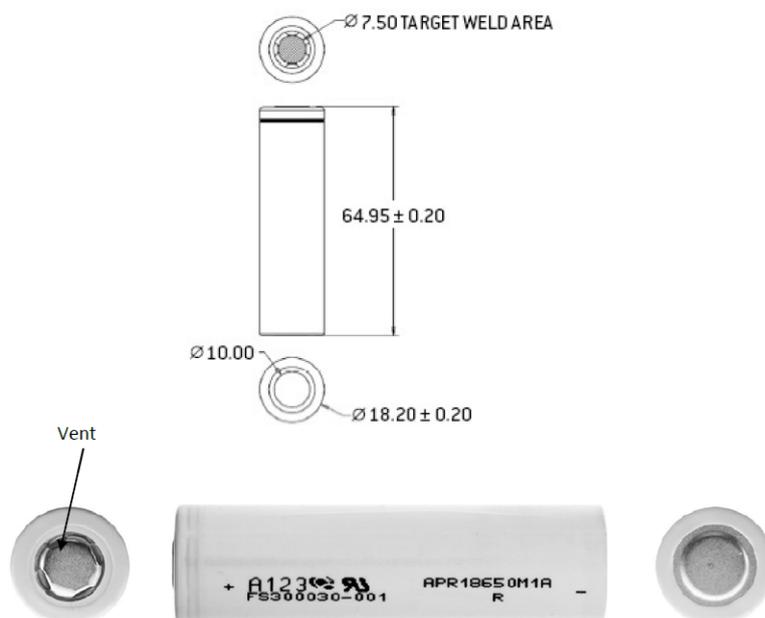


Figura 2.9: Cella cilindrica dell'azienda A123[55], modello APR18650m1A, dal codice alfa numerico emerge che la cella ha diametro di 18 mm e lunghezza di 65 mm.

¹I valori numerici relativi alla densità di energia e alla capacità possono cambiare al variare della dimensioni della cella cilindrica e dal tipo di azienda produttrice.

Struttura interna della cella

Nel seguito si descrivono i componenti interni e i dispositivi di sicurezza, presenti all'interno della cella cilindrica[47].

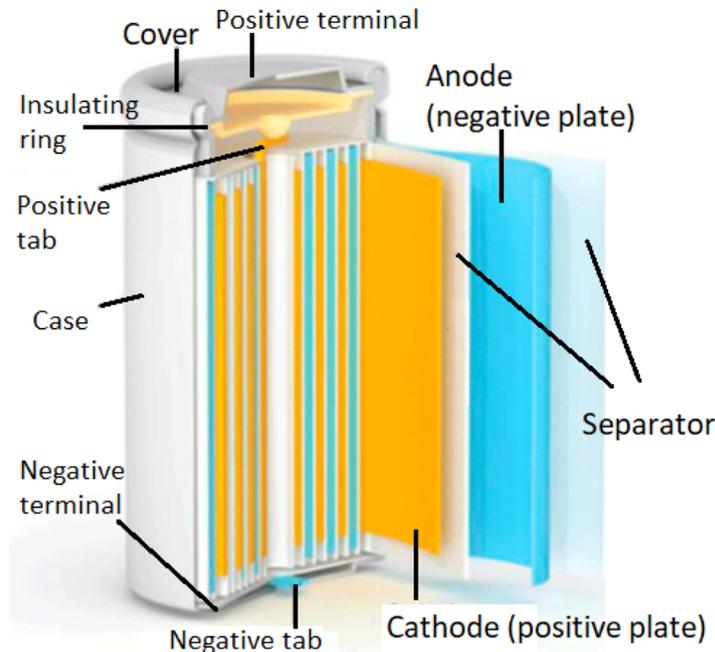


Figura 2.10: Sezione della cella cilindrica[21].

L'elettrodo positivo (catodo) è costituito da un foglio di alluminio ricoperto da un determinato materiale. I materiali di rivestimento più usati in comune sono il litio-ossido di cobalto ($LiCoO_2$), litio-ossido di magnesio ($LiMnO_2$), litio- fosfato di ferro ($LiFePO_4$). L'elettrodo negativo (anodo) è invece costituito da un foglio di rame rivestito con un altro materiale. Il grafene è uno dei materiali più usati come rivestimento. Al fine di evitare cortocircuiti interni, viene posto fra i due elettrodi uno strato poroso di plastica (separator). Questo strato permette grazie alla sua porosità, di far passare gli ioni di litio e allo stesso tempo impedisce il passaggio della corrente fra i due elettrodi per il fatto che è costituito da materiale plastico. Lo spessore del separatoro è nell'ordine dei $20 \mu m$ ed è solitamente realizzato in polietilene (PE) o polipropilene (PP). Questa tipologia di materiale non genera problemi durante l'immersione del separatoro nel bagno dell' elettrolita.

Connettori nella cella cilindrica

Nella cella cilindrica sono presenti dei connettori[47], i quali essendo costituiti da materiale conduttivo, consentono il passaggio della corrente da un dispositivo all'altro.

- Terminale positivo (Positive terminal)
Il terminale positivo è un materiale conduttore che consente la connessione fra il terminale positivo della cella con quello del dispositivo ad esso collegato. La maggior parte di questi terminali è realizzata in acciaio inossidabile ed è sempre locata nella parte alta della cella cilindrica.
- Terminale negativo (Negative terminal)
IL terminale negativo è un materiale conduttore che connette insieme il terminale negativo della cella con quello del dispositivo ad esso collegato. Anche in questo caso il terminale è

realizzato in acciaio inossidabile. Il terminale negativo è sempre locato nella parte bassa della cella.

- Terminale positivo a lamina (Positive tab)
Questo dispositivo ha il compito di connettere insieme il terminale positivo con l'elettrodo positivo della cella. Solitamente, come terminale, si utilizza una sottile lamina in alluminio.
- Terminale negativo a lamina (Negative tab)
Questo dispositivo ha il compito di connettere insieme il terminale negativo con l'elettrodo negativo della cella. In alcuni casi si utilizza come terminale negativo l'involucro della cella (case), pertanto il terminale negativo a lamina viene saldato a tale involucro. Il materiale tipicamente utilizzato per realizzare tale lamina è il nickel.

Dispositivi di sicurezza

I dispositivi di sicurezza[47] sono degli elementi fondamentali durante l'utilizzo della cella cilindrica, questo perché al suo interno sono presenti dei materiali con elevata densità energetica e inoltre l'elettrolita risulta essere infiammabile.

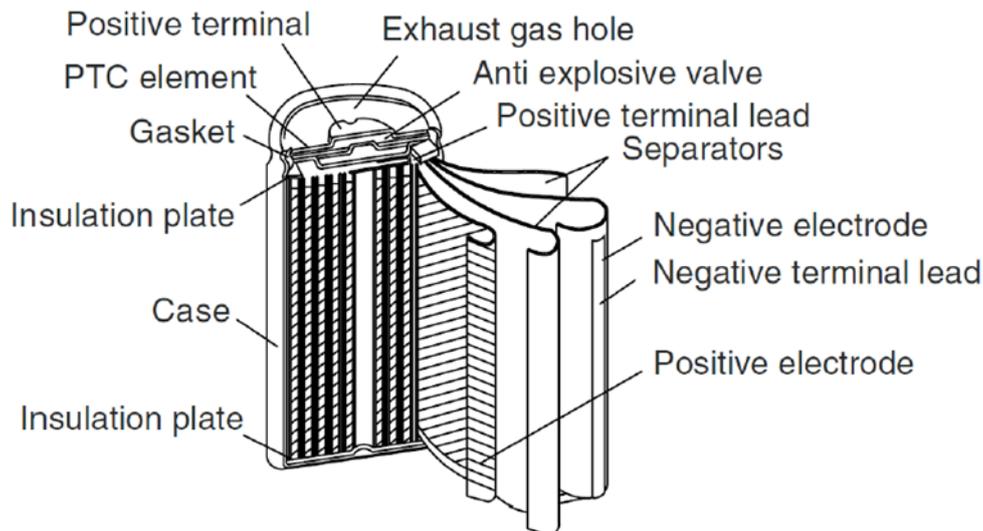


Figura 2.11: Sezione di una cella cilindrica[45].

- Involucro (Case)
Nei dispositivi di sicurezza rientra il contenitore (case) il quale protegge da urti e pressioni esterne il contenuto della cella, evitando danni e deformazioni.
- Disco isolante (Insulation plate)
Al fine di evitare cortocircuiti fra le varie parti conduttive, all'interno della cella cilindrica, vengono montati due dischi isolanti (insulate plate). Il primo è collocato fra la parte alta della cella e il gasket, mentre il secondo è situato fra la parte bassa della struttura interna della cella e il can, vedi figura 2.11.
- PTC (Positive Temperature coefficient) element
Tale dispositivo costituito da materiale composito limita il passaggio nella cella della corrente al raggiungimento delle alte temperature; infatti, quando la cella è in prossimità

al raggiungimento della temperatura critica, questo elemento diventa una resistenza aggiuntiva e limita il passaggio della corrente. Questo dispositivo solitamente è locato fra il terminale positivo e la valvola anti-esplosione.

- Valvola anti-esplosione

In presenza di operazioni insolite, ad esempio sovraccarico, danno fisico alle celle e cortocircuiti interni, si sviluppano dei gas che aumentano la pressione all'interno della cella, la quale è solitamente munita di una valvola di sfogo. Tale valvola è costituita da una membrana calibrata che si rompe ad un determinato valore di pressione; una volta rotta, non può più funzionare. Tale valvola di sicurezza è locata fra il dispositivo PTC e il disco isolante.

- Meccanismo di ventilazione (Exhaust gas hole or gas release vent)

Le celle cilindriche sono dotate di una membrana richiudibile grazie ad una valvola a molla, la quale in caso di sovrappressioni si apre e permette al gas di scaricarsi verso l'esterno. Tale valvola funziona dopo l'apertura della valvola anti-esplosione.

Inoltre nel caso in cui si sviluppasse delle pressioni troppo elevate e pericolose, per motivi di sicurezza, interviene il CID (Charge Interrupt Device) che disconnette fisicamente e irreversibilmente la cella dall'intero sistema.

- Guarnizione (Gasket)

Dalla figura 2.12, si osserva come la guarnizione sigilli perfettamente lo spazio fra l'involucro esterno (Can) e il terminale positivo. Infatti, durante la fase finale della costruzione della cella, la parte alta ("la testa") della cella viene sottoposta a diversi cicli di compressione al fine di sigillarla con il Can. Dato che l'involucro (Can) molto spesso è collegato al terminale negativo a lamina, viene utilizzata tale guarnizione proprio per evitare il passaggio di corrente fra i due terminali ai suoi lati. Ovviamente tale dispositivo deve resistere ad elevati carichi di compressione.

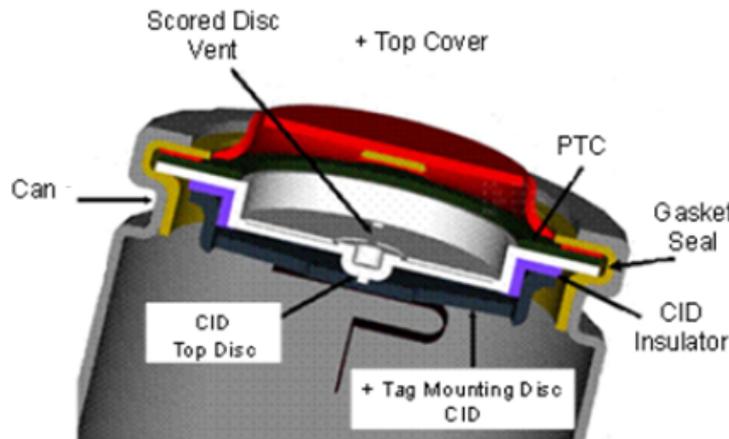


Figura 2.12: Sezione della parte alta di una cella cilindrica[42].

2.3.2 Celle a bottone (button cell)

La cella a bottone è una soluzione progettuale molto compatta diffusasi verso il 1980[63], come accumulatore nei dispositivi mobili. Si possono raggiungere tensioni elevate collegando le celle in serie all'interno di un tubo. Telefoni cordless, dispositivi medici e cassette di sicurezza

usavano tale soluzione per l'accumulo dell'energia. Attualmente queste celle non sono per lo più non ricaricabili e si trovano negli orologi, nei dispositivi medici mobili, negli apparecchi acustici, nelle chiavi delle macchine eccetera.

Nonostante siano piccole, facili ed economiche da produrre, attualmente la loro richiesta sta diminuendo a favore delle altre soluzioni tecnologiche. Inoltre, rientra fra i principali svantaggi, il fatto che se la ricarica avviene troppo rapidamente, tale tipo di cella si espande a causa dei gas rilasciati al suo interno. Non hanno al loro interno nessun dispositivo di ventilazione di sicurezza e per tanto dopo 10-16 ore[63] raggiungono la ricarica completa; recentemente si stanno studiando nuove soluzioni per ridurre i tempi di ricarica.

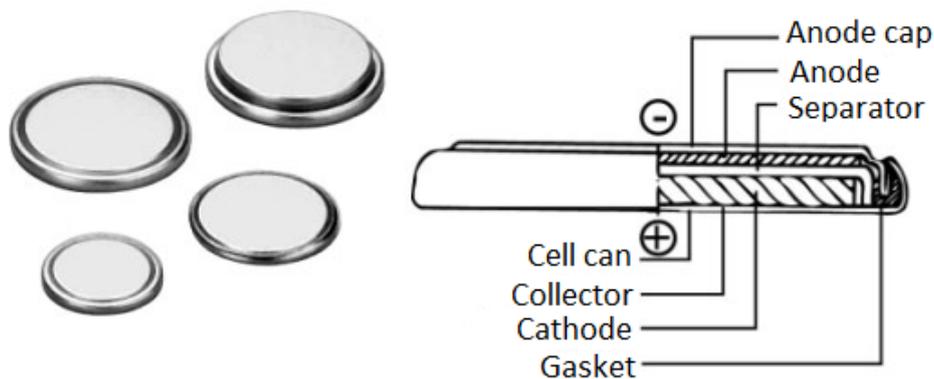


Figura 2.13: Sezione della button cell, fonte *Sanyo and Panasonic*[63].

2.3.3 Celle a sacchetto (pouch cell)

Questa tipologia di cella ha tipicamente una forma rettangolare, "a busta", non disponendo di un contenitore rigido, il peso è molto ridotto. Inoltre, in virtù delle ampie superfici di scambio termico, il raffreddamento è notevolmente facilitato. Come punto di debolezza, è necessario evidenziare la bassa resistenza meccanica, che richiede un sistema di impacchettamento idoneo. Inoltre, bisogna tenere in considerazione, in fase di progettazione del pacco, di un margine di spazio fra una cella e quella successiva, perché in fase di carica e scarica le celle rilasciano gas che ne deformano la struttura. Queste celle presentano al loro interno una struttura laminata, leggera ed economica da realizzare. Rispetto alle celle cilindriche, presentano capacità molto più elevate ($3 \div 260Ah$) ma densità di energia più contenute ($40 \div 260Wh/kg$).² Sono spesso utilizzate in applicazioni di consumo, militari e automotive[63].

²I valori numerici relativi alla densità di energia e alla capacità possono cambiare al variare della dimensioni della cella e dal tipo di azienda produttrice.



Figura 2.14: Pouch cell dell'azienda A123, modello AMP20M1HD-A[4].

La struttura della pouch cell è costituita dalla sovrapposizione di diversi strati di materiale laminati, come si evince dalla dalla figura 2.15.

Struttura interna della cella

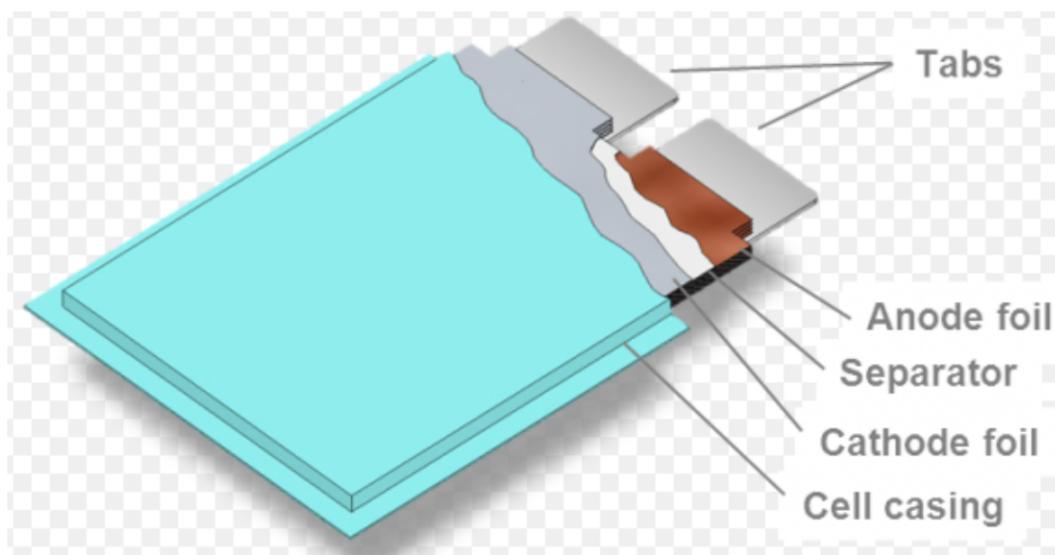


Figura 2.15: Struttura interna di una Pouch cell[24].

L'anodo solitamente è realizzato con uno foglio laminato in rame, mentre il catodo è in alluminio. La parte terminale che fuoriesce dalla cella prende il nome di tab. Il tab in rame costituisce il terminale negativo, mentre quello in alluminio il terminale positivo; solitamente i tab fuoriescono dalla cella sullo stesso lato, ma esistono anche dei modelli di pouch cell dove i due tab escono sui due lati opposti.

Questa tipologia di cella ottimizza l'uso dello spazio raggiungendo fino al 95%[63] dell'efficienza di impaccettamento, ma necessita di un precarico idoneo che metta a "pacco" le celle all'interno del modulo, limitando l'insorgere di giochi interni dovuti alle vibrazioni.

La chimica utilizzata nelle pouch cell è comunemente basata sul litio polimerico.

Dispositivi di sicurezza

Durante i cicli di carica e scarica della pouch cell,³a causa della decomposizione di una determinata quantità dell'elettrolita (SEI)⁴, vengono rilasciati dei gas dalla cella, i quali devono essere gestiti nel miglior modo possibile utilizzando degli accorgimenti in fase di progetto. Le celle di piccole dimensioni possono dilatarsi del $8 \div 10\%$ rispetto alla forma iniziale, dopo 500 cicli, mentre le celle più grandi raggiungono tale espansione intorno ai 5000 cicli[63]. Oltre ai potenziali danni strutturali causati dalla pressione generata dai gas, quest'ultimi sono anche infiammabili. Pertanto, come già detto in precedenza, è necessario lasciare un margine di spazio fra una cella e l'altra per consentire la deformazione delle celle stesse.

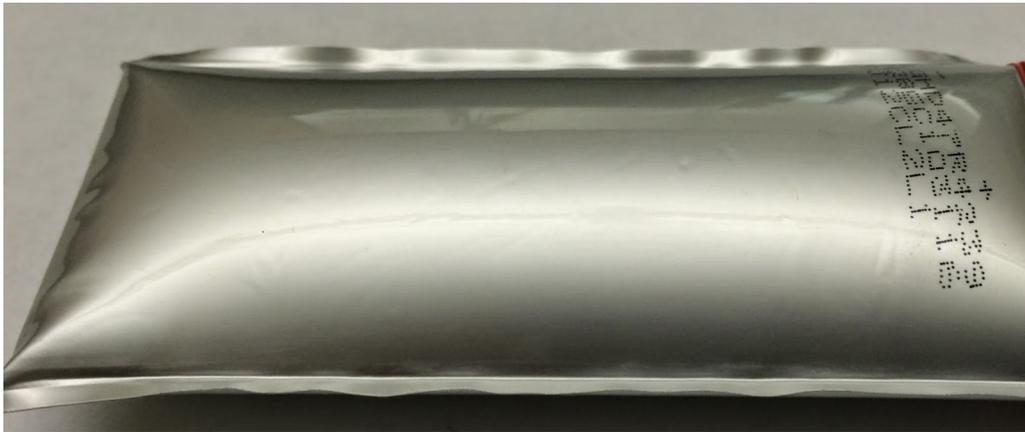


Figura 2.16: Espansione della Pouch cell a causa dei gas sviluppati[51]. Fra questi gas è presente l'anidride carbonica CO_2 e il monossido di carbonio CO .

Come soluzione a tale problema, visibile in figura 2.16, a livello progettuale, si è previsto l'introduzione su un lato della cella di una "gasbag", cioè una camera che possa ospitare i gas prodotti. I gas entrano in tale camera mentre si sta formando lo strato solido SEI, durante il primo ciclo di carica. Il gas viene poi fatto evacuare tramite una membrana elastica o tramite altri dispositivi o soluzioni tecnologiche. Nei cicli successivi la quantità di gas generato si riduce notevolmente ma resta comunque presente.

³in particolare il fenomeno risulta più intenso durante il primo ciclo di carica.

⁴SEI è l'acronimo di *solid electrolyte interface*, tale decomposizione dell'elettrolita è stata studiata dal Professore *Jeff Dahn* e il suo team dell'Università *Dalhousie*, nel 2016 in collaborazione con *Tesla Motors*.

2.3.4 Celle prismatiche (prismatic cell)

Questa tipologia di cella presenta un contenitore prismatico di alluminio o di acciaio sottile che permette un ottimo impacchettamento e sfruttamento dello spazio. Queste celle sono prevalentemente utilizzate negli smartphone, tablet e in alcuni laptop e presentano capacità variabili fra gli 800 mAh e i 5000 mAh[63]. In ambito automotive, presentano dimensioni e capacità più elevate ($20 \div 60Ah$)[63] e vengono utilizzate per alimentare i sistemi di propulsione nei veicoli ibridi ed elettrici. Tra gli svantaggi principali, oltre al peso, la cella prismatica è costosa da fabbricare, ha un ciclo vita più corto rispetto alle altre tipologie e risulta essere più difficile da raffreddare[63].

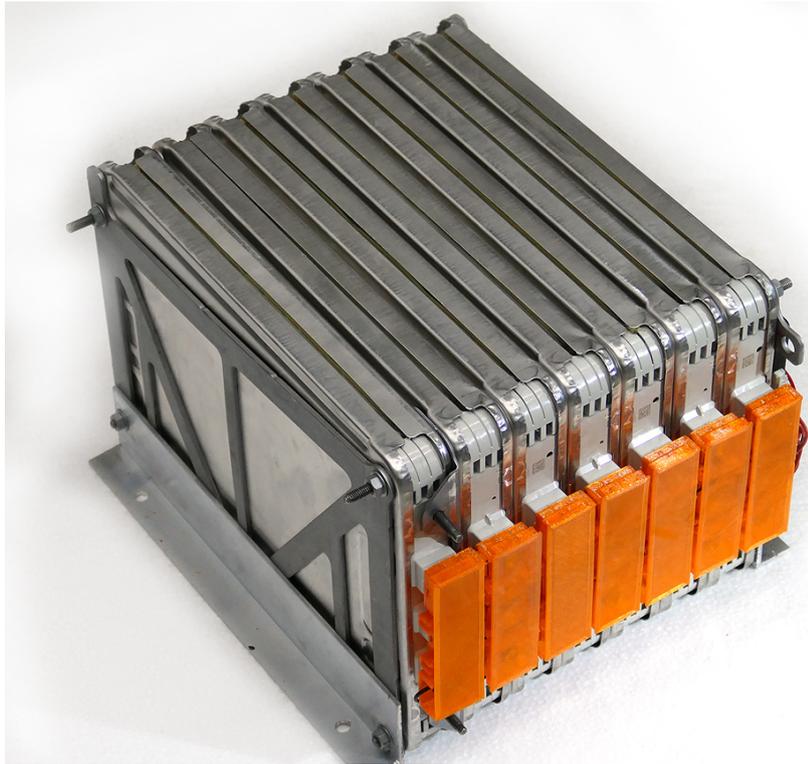


Figura 2.17: Modulo del pacco batteria della Nissan Leaf, seconda generazione, da 60 Ah di capacità[14].

Struttura interna della cella

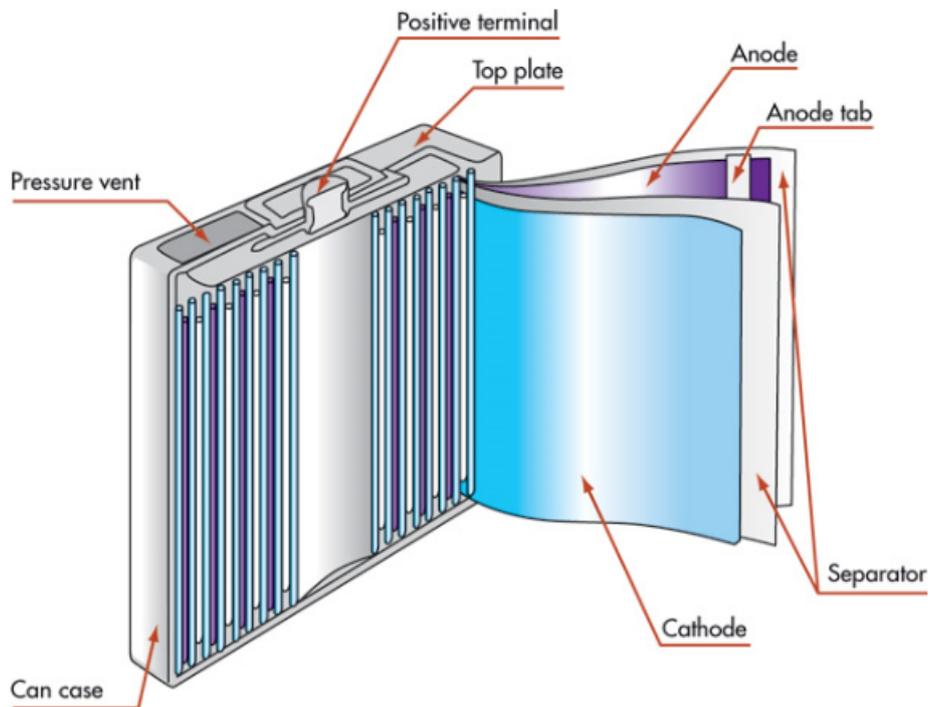


Figura 2.18: Struttura interna della cella prismatiche[18].

La cella prismatiche necessita di un involucro esterno che possa generare il giusto stato di compressione e che al tempo stesso possa proteggere la parte interna da urti esterni. Come nella cella cilindrica, si ha una struttura costituita da più strati sovrapposti di anodo e catodo, intervallati fra di loro da dei fogli separatori isolanti elettricamente. Anche qui il case può fungere da un terminale e nella parte alta della cella sono presenti gli stessi dispositivi di sicurezza già descritti precedentemente nel paragrafo delle celle cilindriche. Solitamente, all'interno della cella, si sviluppano dei gas e si tollera una dilatazione della cella intorno ai $5 \div 8$ mm dopo 500 cicli[63].

2.4 Motociclette ibride ed elettriche in commercio

In questo paragrafo vengono riportati alcuni esempi commerciali di moto ibride ed elettriche, focalizzandosi sulle caratteristiche tecniche e sulla disposizione dei pacchi batteria. Queste informazioni saranno utili per i capitoli a seguire, nella definizione dei requisiti di progetto e nell'analisi comparativa delle due soluzioni progettuali.

2.4.1 Energica Ego

Fra le motociclette appartenenti alla categoria elettrica, l'*energica Ego* risulta essere un ottimo caso di studio. La moto possiede un motore sincrono a magneti permanenti in grado di sviluppare una potenza di 107 kW (circa 145 CV) da 4900 a 10500 giri/minuto e una coppia di 200 Nm da 0 a 4700 giri/minuto. Grazie a tali caratteristiche, l'*energica Ego* è più veloce di una 600 supersport.



Figura 2.19: *Energica Ego*.

Come si evince dalla figura 2.20, il pacco batteria è posizionato nella parte anteriore del telaio, occupando parte del volume che nei modelli termici è destinato al serbatoio e alle testate del motore. La tecnologia di cella utilizzata è quella a polimeri di litio; il pacco è costituito da due semi-gusci e da un setto centrale finalizzato al raffreddamento delle celle.



Figura 2.20: Alloggiamento del pacco batteria nella moto *Energica Ego*[38].

Caratteristiche del pacco	valore	unità
Energia massima	13,4	[kWh]
Energia nominale	11,7	[kWh]
Tensione nominale	300	[Volt]
Corrente di picco (scarica)	400	[A]
C-rate (carica)	2	[h ⁻¹]
Peso	115	[kg]
Tempo di ricarica (0-100% SOC)	3,5	[h]
Tempo di ricarica con DC Fast Charge	30	[min]
Autonomia batteria	150-200	[km]
Ciclo di vita @80% capacità	1200	[cicli]

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche del pacco batteria dell'*Energica Ego*[28].

Prototipizzazione del pacco batteria

In questo paragrafo, si riportano gli step utilizzati dalla ditta *CRP meccanica*[38], per la realizzazione di un prototipo del pacco batteria dell'*Energica Ego*. Il sistema di raffreddamento progettato sfrutta specifici percorsi di ventilazione naturale, progettati e realizzati all'interno dello stesso pacco. Il pacco è costituito da due gusci laterali che si serrano fra di loro appoggiandosi su una piastra di raffreddamento in alluminio (detta "setto centrale"). Quest'ultimo serve a convogliare l'aria in entrata, mentre la moto si muove, ed agevola la dissipazione del calore. La piastra è provvista di una pluralità di fori passanti che comunicano con l'esterno e che la attraversano longitudinalmente. In questo processo di prototipazione, due semi-gusci che compongono la cassa e il setto centrale di raffreddamento in un primo momento, sono stati realizzati mediante la tecnologia della sinterizzazione laser selettiva, utilizzando Windform® LX 2.0, un materiale composito a base poliammidica caricato con fibre di vetro. In un secon-

do step, il pacco è stato realizzato in alluminio sfruttando la tecnica della fusione in sabbia e resina sinterizzata, nota anche come Rapid Casting. Nella terza fase, quella di produzione, il componente è stato realizzato mediante fusione tradizionale in sabbia, utilizzando la stessa lega impiegata nella seconda fase.



Figura 2.21: Immagini del pacco batteria durante il processo di prototipazione[38]: a) prototipo stampato in 3D con la tecnologia della sinterizzazione laser selettiva; b) pacco batteria realizzato in alluminio con la tecnica della fusione in sabbia; c) componente finito.

Dalle esperienze in ambito racing elettrico e dai pochi esempi di moto elettriche attualmente sul mercato, l'azienda *CRP* ha notato che le casse batteria spesso vengono realizzate in materiale composito, ma questo genera problematiche derivanti da eventuali scivolate e cadute della moto durante l'utilizzo, dove non si garantirebbe la massima sicurezza per il pilota, perché solitamente il composito non è strutturale.

2.4.2 Zero DS

Un ulteriore modello di moto elettrica, presente sul mercato, è la *Zero DS*. Dispone di un motore brushless compatto, che non richiede un sistema di raffreddamento a liquido o ad aria forzata e nessun intervento di manutenzione ordinaria. A seconda del modello scelto, il motore sviluppa potenze che vanno dai 25 kW (34 CV) a 4300 giri/minuto fino ai 45 kW (60 CV) a 5300 giri/minuto, erogando una coppia massima di 110 Nm.



Figura 2.22: Modello *Zero DSR*[41].



Figura 2.23: Pacco batteria Z-Force, presente nel modello *DSR 14.4*[41].

Come nel caso dell'*Energica Ego* il pacco batteria è posizionato nella parte anteriore del telaio, occupando il volume, che nei modelli termici è destinato al serbatoio e alle testate del motore. Per soddisfare le esigenze dei modelli più avanzati, il pacco batterie della SR/F è dotato di un dissipatore di calore in alluminio e di un'interfaccia di scambio termico che garantiscono il raffreddamento costante delle celle per le massime prestazioni a lungo termine del propulsore, indipendentemente dallo sforzo a cui è sottoposto.

Caratteristiche del pacco	valore	unità
Energia massima	14,4	[kWh]
Tempo di ricarica standard @ 0-100%	9,8	[h]
Tempo di ricarica con Charge Tank @ 0-100%	2,5	[h]
Tempo di ricarica con caricatori supplementari @ 0-100%	2,8	[h]
Autonomia ciclo urbano	262	[km]
Autonomia autostrada	126	[km]

Tabella 2.2: Caratteristiche tecniche pacco batteria della *Zero DSR 14.4* [41].

2.4.3 Honda PCX hybrid

Questo recente⁵ scooter della *Honda* appartiene alla sua precedente versione 125 di cilindrata con l'aggiunta della propulsione ibrida. Su tale veicolo, sono presenti due pacchi batteria agli ioni di litio, atti ad alimentare la trazione ibrida e la batteria al piombo da 12 V (per l'iniezione, luci e cruscotto).



Figura 2.24: *Honda Pcx hybrid*[1].

Tale moto ibrida oltre ad avere un motore termico mono cilindro raffreddato ad acqua, ad esso combina un motore elettrico AC.

⁵in vendita sul mercato dal Settembre 2018.

Caratteristiche principali	valore	unità
Potenza max, motore termico @8500 giri/minuto	9	[kW]
Potenza max, motore elettrico @3000 giri/minuto	1,4	[kW]
Coppia max, motore termico @5000 giri/minuto	12	[Nm]
Coppia max, motore elettrico @3000 giri/minuto	4,3	[Nm]
Cilindrata	124	[cc]

Tabella 2.3: Caratteristiche tecniche della moto *Honda Pcx hybrid*[30].

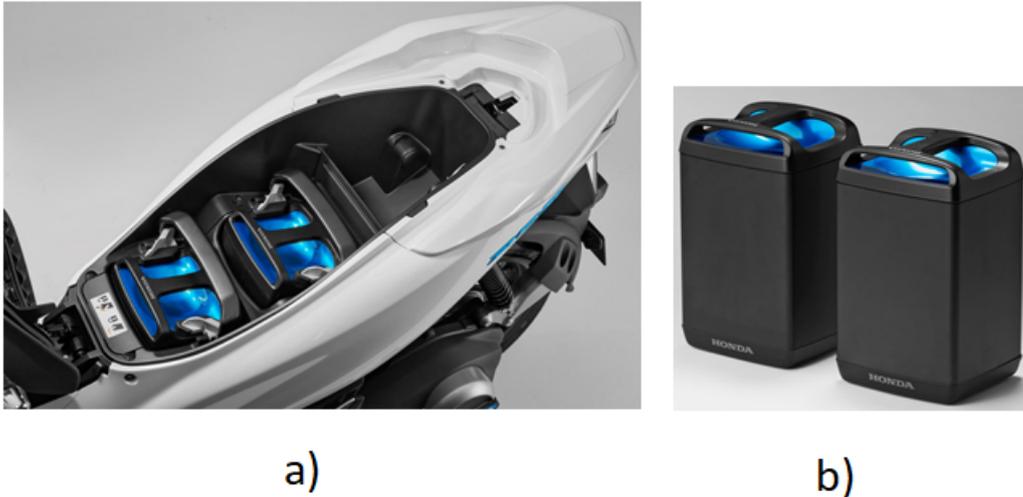


Figura 2.25: a) Alloggiamento dei pacchi batteria[58]; b) Pacchi batteria[1].

La batteria agli ioni di litio è alloggiata nella parte posteriore del sottosella (il cui volume scende da 28 a 23 litri, rispetto al modello a propulsione termica), mentre la centralina di controllo PDU (Power Drive Unit) è posizionata nel retroscudo. Rispetto al modello termico, il peso complessivo aumenta di 5 kg, da 130 a 135 kg.

Le due batterie sono collegate in parallelo fra di loro, presentando una capacità raddoppiata a parità di tensione (50,4 Volt).

Caratteristiche del pacco	valore	unità
Capacità nominale	20,8	[Ah]
Tensione massima	50,4	[Volt]
Tempo di ricarica standard	–	[h]

Tabella 2.4: Caratteristiche tecniche del singolo pacco batteria della *Honda Pcx hybrid*[30].

2.4.4 Piaggio MP3 Hybrid 300ie

In questo scooter, il motore termico 300 cc lavora in sinergia con il motore elettrico garantendo ripresa e accelerazione paragonabili a quelle di uno scooter 400 cc con motorizzazione termica (valori calcolati su un utilizzo al 65% della modalità Hybrid Power⁶ e al 35% di quella elettrica). Infatti, la propulsione sfrutta un layout ibrido di tipo "parallelo" nel quale i due motori, elettrico e a scoppio, lavorano in maniera integrata per fornire simultaneamente potenza alla ruota, in particolare nelle partenze da fermo e ogni volta che è richiesta una accelerazione o una ripresa particolarmente vivace.

Attualmente è il primo ed unico veicolo in tutto il settore automotive ad utilizzare batterie agli ioni di litio abbinate alla tecnologia Plug-In, offrendo la possibilità di ricarica da rete elettrica.



Figura 2.26: Scooter *Piaggio MP3 Hybrid 300ie*, dotato di Plug-In.

Tale scooter abbina al motore termico a quattro tempi (singolo cilindro), un motore sincrono brushless a magneti permanenti, raffreddato ad aria.

⁶Modalità di guida che massimizza le prestazioni.

Caratteristiche principali	valore	unità
Cilindrata	278	[cc]
Potenza motore ibrido @7500 giri/minuto	18,2 (25)	[kW (CV)]
Potenza motore elettrico	2,6 (3,5)	[kW (CV)]
Coppia motore ibrido @3500 giri/minuto	27,5	[Nm]
Coppia motore elettrico	15	[Nm]

Tabella 2.5: Caratteristiche tecniche della moto *Piaggio MP3 Hybrid 300ie*[49].

Il pacco batterie, con elettronica di controllo integrata, è posizionato nel vano sottosella e consente inoltre di mantenere lo spazio sufficiente ad alloggiare un casco ed altri oggetti.

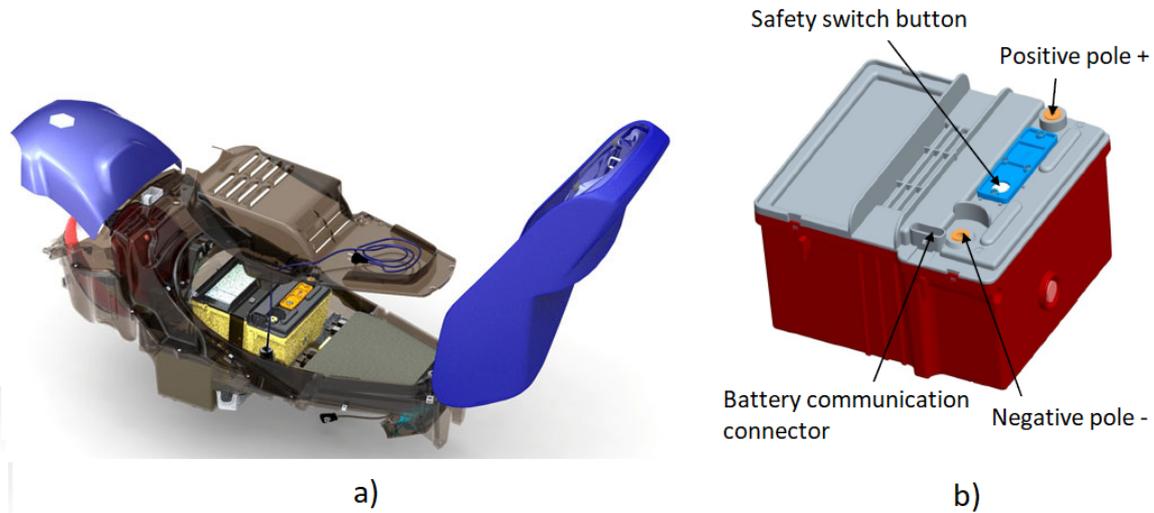


Figura 2.27: a) Alloggiamento del pacco batteria nel sottosella ; b) Pacco batteria[49].

Caratteristiche del pacco	valore	unità
Capacità nominale	31	[Ah]
Tensione nominale	37	[Volt]
Energia nominale	1,2	[kWh]
Corrente di scarica	60	[A]
Corrente di scarica di picco (30 s)	100	[A]
Corrente di carica	30	[A]
Corrente di carica di picco (30 s)	80	[A]
Ciclo di vita	1500	[cicli]
Peso	12	[kg]
Tempo di ricarica standard	3	[h]
Autonomia batteria (modalità puro elettrico)	20	[km]

Tabella 2.6: Caratteristiche tecniche del pacco batteria della moto *Piaggio MP3 Hybrid 300ie*[49].

2.4.5 Vespa elettrica ed ibrida

Dal 2018, il gruppo *Piaggio* ha lanciato sul mercato la *vespa elettrica* con una sua versione ibrida, denominata *Elettrica X*. In tabella 2.7, vengono riportate le caratteristiche tecniche dei due modelli.



Figura 2.28: *Vespa elettrica*.

Caratteristiche tecniche	versione elettrica	versione ibrida
Potenza del motore continuativa [kW]	4	4
Potenza del motore massima [kW]	3,5	3,5
Capacità nominale batteria [Ah]	86	42
Tensione nominale batteria [Volt]	48	48
Energia nominale batteria [kWh]	4,2	2
Peso della batteria [kg]	25	25
Tipo di celle	LG Chem	LG Chem

Tabella 2.7: Caratteristiche tecniche dei modelli di *Vespa* ibrida ed elettrica[64].

2.5 Connessioni elettriche nel pacco batteria

Per permettere il funzionamento della trazione ibrida, solitamente sono necessari elevati valori di energia e di potenza nominale che normalmente una singola cella non può soddisfare. Per raggiungere tali obiettivi è giocoforza utilizzare più celle collegate fra di loro. Pertanto un pacco batteria è solitamente costituito da più moduli interconnessi, i quali al loro interno sono costituiti da un certo numero di celle, collegate in serie e/o in parallelo. Come discusso nel paragrafo 2.3, le celle presentano dei terminali (positivi e negativi), chiamati tab, di diversa forma (alette rettangolari, a disco ecc.), che permettono il collegamento elettrico fra le celle stesse e/o con i bus bar⁷. In questo paragrafo, vengono trattate le connessioni elettriche utilizzate per realizzare la linea di potenza del pacco batteria.

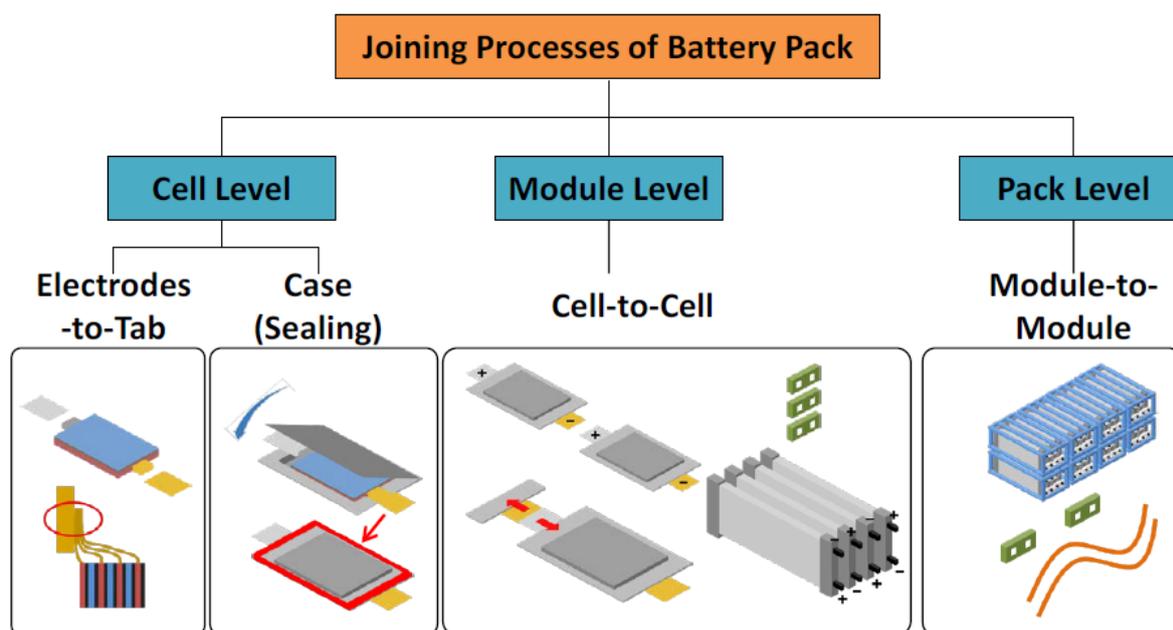


Figura 2.29: Connessioni elettriche presenti all'interno di un pacco batteria.

In questa attività non vengono affrontate le connessioni elettriche presenti all'interno delle celle, trattandosi di un argomento vasto, complesso e gestito in diverso modo dalle aziende produttrici. Mentre, a livello di modulo, nel primo paragrafo di questa sezione vengono evidenziati i vari tipi di collegamenti elettrici fra le celle, necessari al raggiungimento dei requisiti di progetto desiderati. Nel paragrafo successivo vengono presentate diverse soluzioni tecnologiche utilizzate per realizzare fisicamente questi collegamenti elettrici. Invece, l'ultimo paragrafo riguarda le connessioni fra i vari moduli costituenti il pacco batteria.

⁷Conduttori di rame o di alluminio utilizzati per collegare più celle fra di loro.

2.5.1 Collegamenti elettrici cella-cella

A livello modulare, come detto in precedenza, è necessario collegare più celle fra di loro (in serie, in parallelo e misto serie-parallelo) per poter soddisfare i parametri progettuali del pacco batteria.

Collegamento in serie: per realizzare tale tipo di connessione, si necessita collegare il terminale negativo di una cella con il terminale positivo dell'altra. In questo modo la tensione risultante è pari alla somma delle tensioni di ogni cella collegata, mentre la capacità rimane invariata.

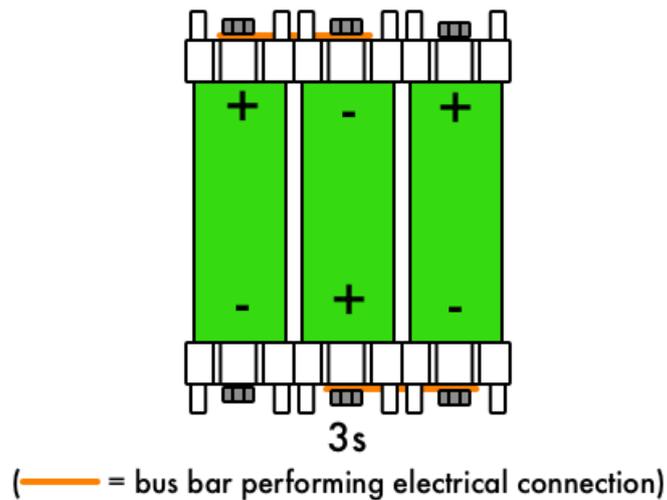


Figura 2.30: Collegamento in serie di celle cilindriche[40].

Quando le celle sono collegate in serie a comporre una batteria ricaricabile, è importante che esse siano tutte abbinata con la stessa capacità. La curva di scarica del pacco batteria è data dalla somma delle curve di scarica delle singole celle, scalate rispetto alla tensione. Nel caso di un pacco composto da celle diverse, potrebbero insorgere problematiche legate al sovraccarico di alcune celle rispetto alle altre, richiedendo complicate logiche d'intervento da parte del BMS. Quindi, se le celle del pacco sono identiche, tutte lavoreranno con lo stesso quoziente di stress.

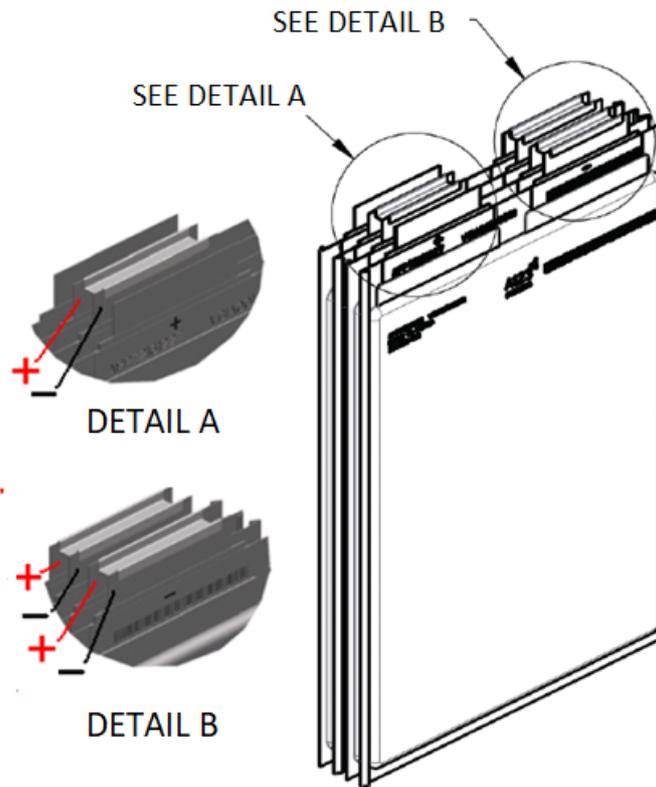


Figura 2.31: Collegamento in serie delle pouch cells, A123[55].

Collegamento in parallelo: si ottiene collegando rispettivamente fra loro, il terminale positivo/negativo della cella con quello positivo/negativo della cella successiva). La capacità risultante è la somma delle capacità di ogni cella connessa, mentre la tensione rimane invariata.

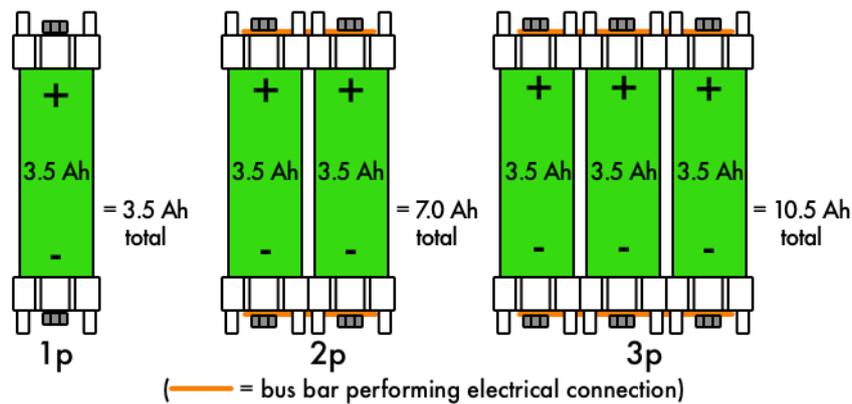


Figura 2.32: Collegamento in parallelo delle celle[40].

Anche qui è giocoforza collegare fra loro celle identiche, al fine di evitare quozienti di stress diversi sulle celle.

Collegamento serie-parallelo: si ottiene combinando i due metodi visti in precedenza, generando le combinazioni di tensione e capacità desiderate. Le celle della figura 2.33 sono orizz-

zontalmente collegati in serie. I due pacchi risultanti sono invece collegati (verticalmente) in parallelo.

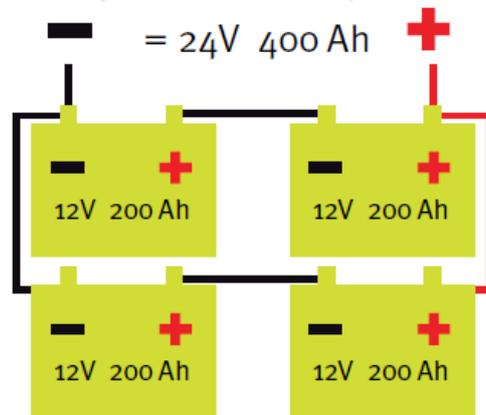


Figura 2.33: Collegamento serie-parallelo delle celle[19].

2.5.2 Connessione dei tab delle celle

In questo paragrafo, vengono messi in evidenza le soluzioni tecnologiche adottate nell'attività, per realizzare fisicamente i collegamenti elettrici fra le celle stesse e/o con le bus bar. In linea generale si possono distinguere due macro categorie di connessioni: per saldatura e meccaniche. Vengono nel seguito elencate alcune delle tipologie di connessioni maggiormente diffuse in questo ambito[2]:

- Saldatura per ultrasuoni (UMW)
- Saldatura a resistenza (RSW)
- Saldatura micro TIG
- Saldatura laser
- Saldature elettromagnetiche (MPW/EMPT)
- Micro Clinching (unione per deformazione)
- Connessione meccanica
- Bus bar laminate

Nel seguito vengono descritte solamente le soluzioni tecnologiche adottate nei due casi di progetto. Le considerazioni che hanno portato alla decisione del tipo di connessione, sono riportate rispettivamente nei paragrafi 4.4.1 e 5.2.2. delle due soluzioni progettuali.

Ultrasonic Wire/Wedge Bonding UWB (Saldatura per ultrasuoni): questa tecnica nata intorno al 1970[2] è tutt'ora molto utilizzata nel settore elettronico, per la realizzazione di interconnessioni fra i circuiti integrati e le schede per circuito stampato. In questi ultimi anni si sta diffondendo rapidamente anche per la realizzazione dei collegamenti elettrici presenti nel pacco batteria. Infatti, *Tesla Motors* utilizza UWB all'interno dei suoi pacchi, come si veda nella figura 2.35. Il wire bonding è una saldatura che rientra nella macro-categoria saldatura

per ultrasuoni, che sfrutta il calore generato dall'attrito fra due superfici per unirle insieme. Il processo inizia premendo un filo o un nastro di alluminio⁸ sul substrato a cui verrà legato. Il filo viene poi fatto vibrare a frequenze ultrasoniche di circa 100 kHz. Questo fa sì che gli atomi metallici nel filo si mescolino con gli atomi metallici nel substrato e grazie al calore formatosi, si genera per fusione, una connessione solida (dopo poche centinaia di millisecondi). Il processo viene schematizzato in figura 2.34.

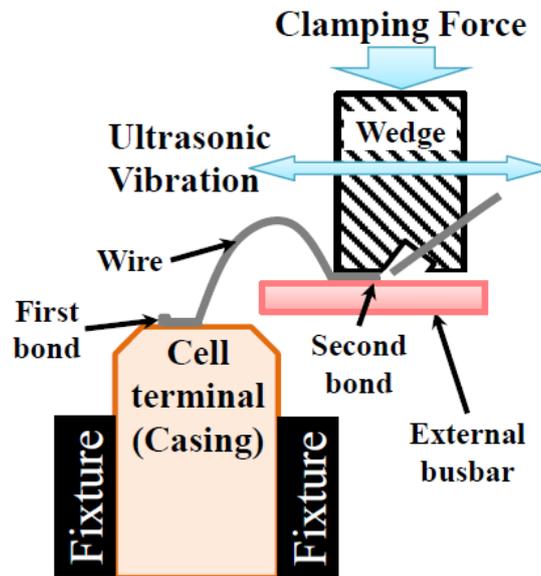


Figura 2.34: Schema di processo della saldatura wire bonding[2].

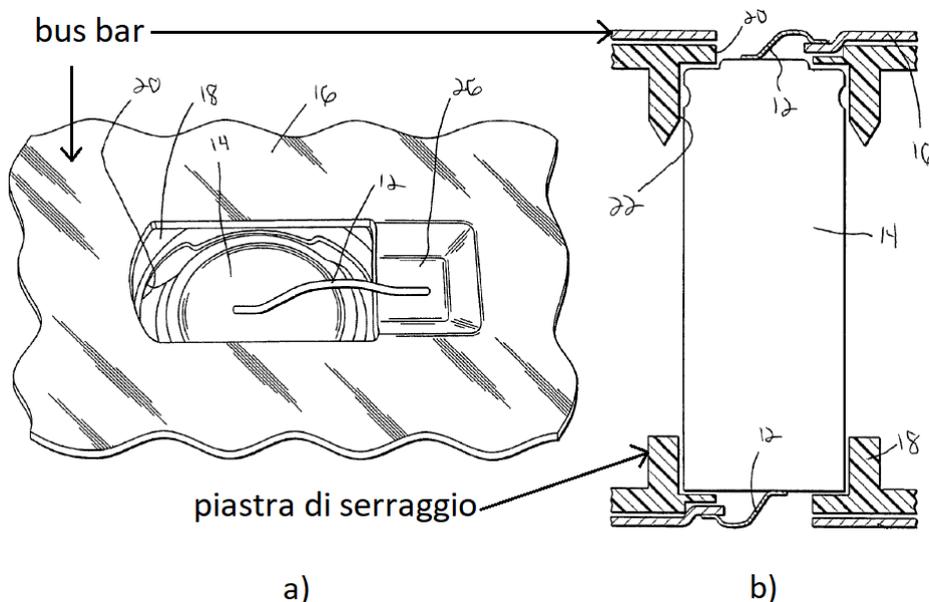


Figura 2.35: Vista dall'alto (a) e in sezione (b) del sistema di serraggio e collegamento elettrico WB, adottato da *Tesla Motors Patent*[54].

⁸Il materiale del filo può cambiare a seconda della lega metallica (Al, Cu, Au) inserita all'interno dello strumento utilizzato.

Questa tecnica produce una qualità di connessione molto affidabile e flessibile in quanto possono ospitare differenti lunghezze di filo, direzioni diverse e diverse altezze tra le celle collegate. Tuttavia, si richiede una superficie di incollaggio estremamente piatta e pulita per funzionare correttamente. Se c'è grasso, polvere o altri contaminanti, la saldatura non avrà successo. Questa tecnica non è adatta per far passare correnti elevate, anche se in quest'ultimi anni si sta cercando di superare tale limite.

Connessione meccaniche: le connessioni elettriche all'interno del pacco batteria, fra i diversi moduli e/o fra i tab delle celle, possono essere realizzate mediante dei collegamenti meccanici, utilizzando ad esempio bulloni, molle eccetera. Come mostrato nella figura 2.36, il collegamento con bullone è sovente utilizzato nel caso delle celle prismatiche. Un altro esempio di fissaggio meccanico per le celle prismatiche è l'utilizzo di molle che tengono a contatto le bus bar ai tab, in un contenitore progettato su misura. Lo svantaggio principale è che tali metodi comportano ad un aumento del peso del pacco e richiedono del tempo durante la fase di montaggio. Di conseguenza, l'assemblaggio meccanico è spesso utilizzato nella costruzione di pacchi batteria di piccole dimensioni o di prototipi.

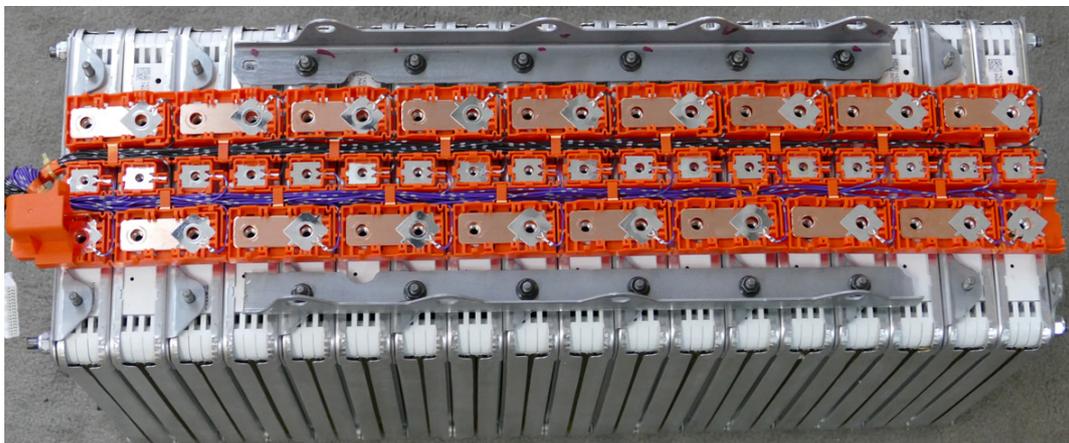


Figura 2.36: Particolare sulle connessioni delle celle prismatiche all'interno del pacco batteria della *Vectrix - VX-1* [13].

I collegamenti meccanici sono applicabili anche per la pouch cell per via dei tab ad aletta distanti dal case, ma bisogna garantire un perfetto contatto su tutta la superficie del tab. Pertanto, fra i tab, vengono inseriti degli elementi elastici, come si vede in figura 2.37 per massimizzare il contatto.

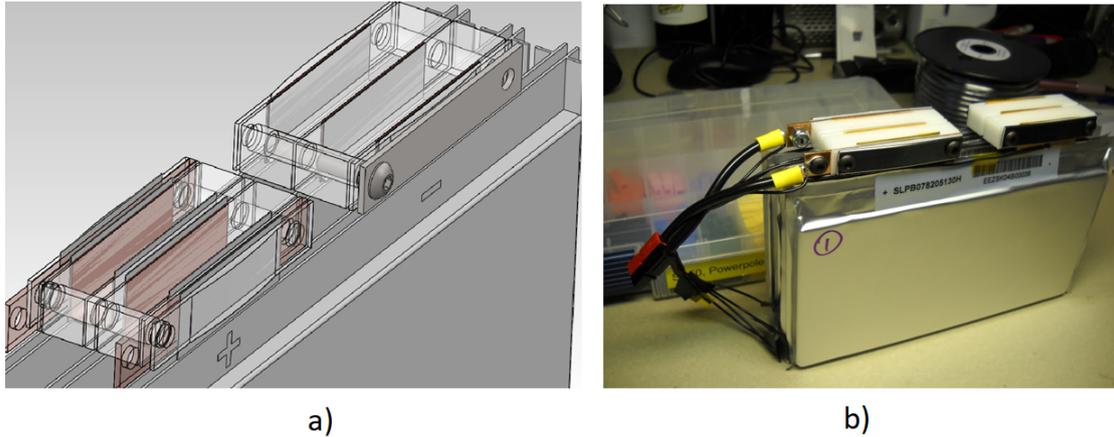


Figura 2.37: Esempio di connessione meccanica tramite bullone, applicata ai tab della pouch cell[27].

Per quanto riguarda le celle cilindriche, attualmente sono in commercio diversi kit di montaggio, che prevedono solitamente l'uso di collegamenti filettati per collegare le celle con i bus bar. Questi kit vengono spesso adoperati nella realizzazione di pacchi batteria per bici e monopattini elettrici. Tale soluzione è molto economica e facile da realizzare; di contro però vi è lo svantaggio dovuto all'incremento del peso e del volume del pacco e inoltre, la qualità del contatto elettrico è inferiore ed limitata rispetto a quella ottenuta con i processi di saldatura.



Figura 2.38: Kit di montaggio per le celle cilindriche dell'azienda *Vruzend*[65].

2.5.3 Connessione fra i moduli

Una volta stabilita la configurazione interna del modulo e tutti i suoi relativi aspetti (geometria, sistema di raffreddamento, disposizione delle celle, collegamenti elettrici fra le celle, ecc.) è giocoforza collegare fra loro i vari moduli in modo tale da raggiungere i requisiti elettrici di progetto. Per far ciò, si collegano i moduli fra di loro, tramite gli appositi terminali, utilizzando connettori e altri componenti elettrici.



Figura 2.39: Particolare sul connettore principale del modulo *Tesla*[37].

Solitamente per realizzare le connessioni fra i connettori dei moduli, vengono adoperati o dei cavi elettrici o delle bus bar rigide, a seconda del layout del pacco e della sua geometria. L'utilizzo dei cavi risulta essere una soluzione più flessibile anche se ingombrante e voluminosa, mentre l'uso delle bus bar rigide, ovvero di lamiere in Al o Cu fra i moduli è meno ingombrante in termini di volume, ma più rigida in termine di geometria del modulo. Gli elementi meccanici utilizzati nelle giunzioni cavo-connettore o bus bar-connettore, solitamente sono dei collegamenti filettati o degli specifici connettori, come si vede in figura 2.40.

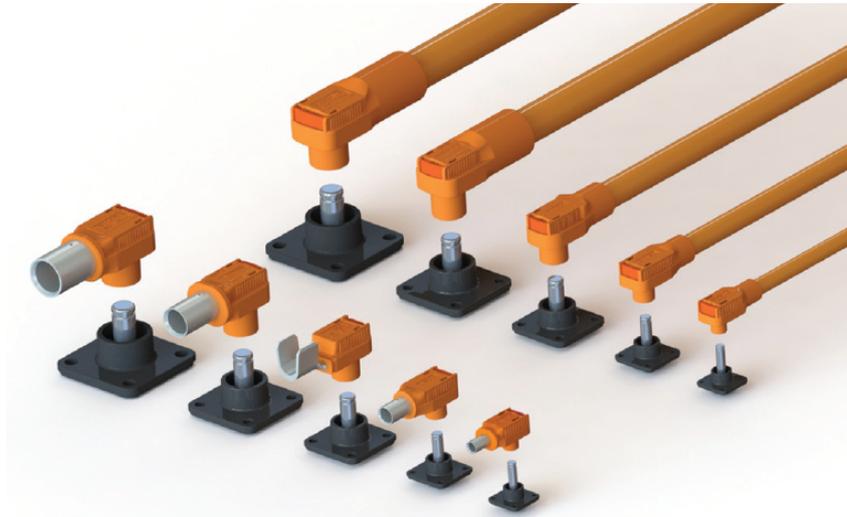


Figura 2.40: Diverse tipologie di connettori dell'azienda *Amphenol*[8].

2.6 Sistemi di raffreddamento

Uno degli aspetti più importanti da considerare durante la progettazione di un pacco batteria è la temperatura di esercizio delle celle. Come viene descritto nel paragrafo 2.2, le celle agli ioni di litio, per la loro chimica, alle alte temperature possono danneggiarsi e addirittura esplodere con il sopraggiungere dell'instabilità termica. Pertanto, è giocoforza raffreddare costantemente il pacco durante l'esercizio. Inoltre, risulta di notevole importanza conoscere l'andamento e la distribuzione della temperatura lungo la geometria della cella, per garantire una dissipazione del calore mirata e uniforme. Come si vede in figura 2.41, la pouch cell presenta una distribuzione di temperatura pressoché uniforme[3]. Invece, per quanto riguarda la cella cilindrica, l'andamento di temperatura risulta essere meno uniforme rispetto al caso della pouch cell. Infatti, i terminali della cella presentano un certo gradiente termico, come si vede in figura 2.42[70].

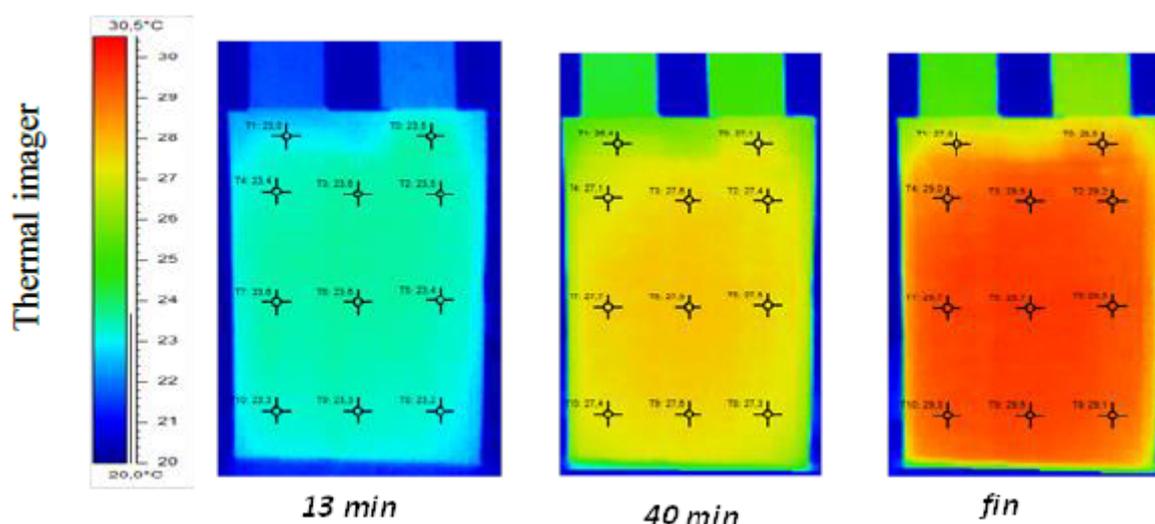


Figura 2.41: Distribuzione sperimentale della temperatura in una pouch cell, con un determinato c-rate di scarica.[3]

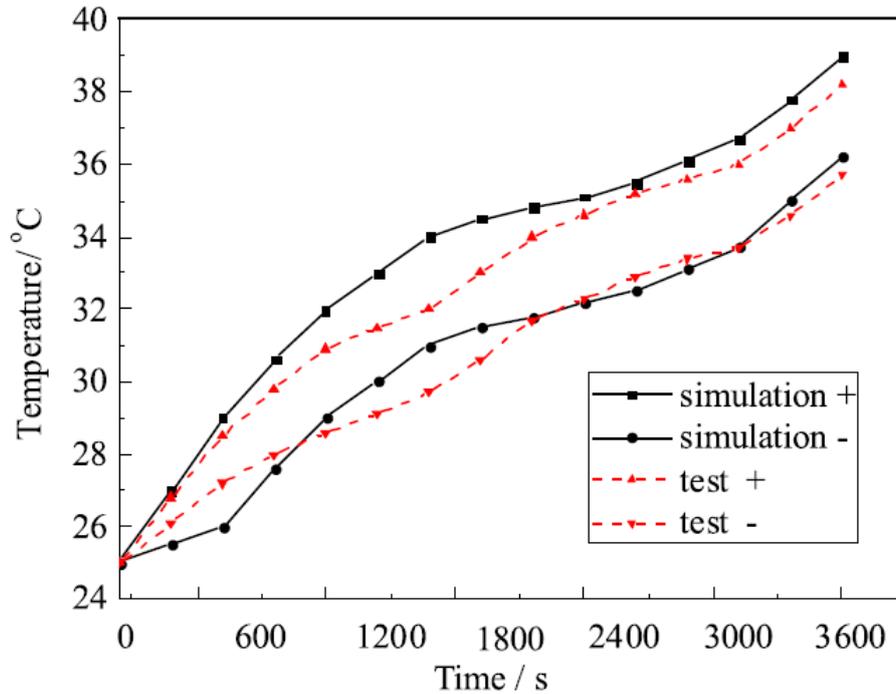


Figura 2.42: Andamento sperimentale e simulato della temperatura dei terminali positivo (+) e negativo (-) di una cella cilindrica, 1 C di scarica.[70]

Dai risultati sperimentali e dalle simulazioni termiche è possibile individuare le zone termicamente più critiche delle celle, al fine di adottare le giuste misure per raffreddarle. Attualmente, si possono distinguere due principali soluzioni tecnologiche per quanto concerne il raffreddamento delle celle:

- Raffreddamento mediante fluido.
- Raffreddamento mediante PCM.

2.6.1 Raffreddamento a fluido

Questo sistema di raffreddamento può sfruttare principalmente due tipologie di fluidi: aria o liquidi refrigeranti (acqua e glicole, R134a ecc.). Il raffreddamento ad aria può essere naturale, se il flusso proviene dall'esterno durante il moto del veicolo, oppure forzato. La struttura di questo sistema resta complessivamente simile sia nel caso di liquidi refrigeranti sia nel caso dell'aria. Infatti, solitamente si presentano con una serpentina o delle fessure-canali dove scorre il fluido refrigerante.

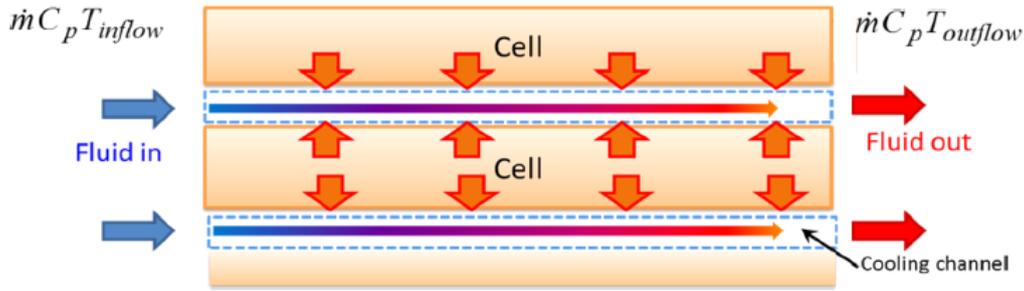


Figura 2.43: Esempio di sistema di raffreddamento mediante fluido, equicorrente[57].

Osservazioni termodinamiche: per quanto concerne l'efficienza di scambio termico, è naturale aspettarsi un trasferimento maggiore ed omogeneo di calore lungo tutto il canale, se si è in configurazione controcorrente (il fluido scorre in direzione opposta, all'interno dei due canali). Questo perché, come si osserva in figura 2.43, nella configurazione equicorrente la temperatura del fluido refrigerante aumenta lungo il canale a causa dello scambio termico, pertanto la differenza di temperatura fra le celle e il fluido diminuisce. Di conseguenza si riduce anche la quantità di calore estrapolato, che secondo la legge di *Fourier*, è proporzionale a tale gradiente termico. Invece, nel caso di scambio controcorrente, il gradiente termico fra il fluido e le celle resta pressoché costante e di conseguenza risulta uno scambio termico più omogeneo lungo la direzione del canale.

Altro aspetto di notevole importanza, risulta essere la superficie di scambio termico, che sempre secondo le leggi della *Termodinamica*, al crescere dell'area di contatto si registra un aumento del flusso di calore estratto e tutto ciò dipende dalla geometria e dal collocamento del sistema di raffreddamento. Con il raffreddamento ad aria è naturale aspettarsi delle superfici di scambio più grandi rispetto a quelle presenti nel caso di raffreddamento liquido.

Studiata la geometria e il tipo di configurazione del sistema di raffreddamento, ulteriore variabile che influenza l'efficienza di scambio è il tipo di fluido utilizzato.

Caratteristica fisica	aria	acqua e glicole
Densità [kg/m^3]	1,16	1069
Calore specifico C_p [J/kg K]	1006	3306
Conducibilità termica [W/m K]	0,028	0,38

Tabella 2.8: Proprietà fisiche dei fluidi tipicamente utilizzati nei sistemi di raffreddamento[57].

Come si evince dalla tabella 2.8, le proprietà termodinamiche dei liquidi refrigeranti risultano migliori rispetto a quelle dell'aria. Infatti, la conducibilità termica, che misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore, nel caso del liquido risulta essere tredici volte più grande rispetto a quella dell'aria. Stessa analogia, la si trova analizzando il calore specifico, che nel caso del liquido risulta essere il triplo rispetto a quello dell'aria. Bensì il flusso di calore estratto, secondo le leggi della *Termodinamica*⁹, sia proporzionale a queste due grandezze, la portata volumetrica incide termicamente. Infatti, i sistemi ad aria presentano una portata volumetrica notevolmente elevata rispetto a quella dei liquidi refrigeranti, che unita a superfici di scambio grandi, può garantire un idoneo e sufficiente scambio termico. Inoltre, il raffreddamento ad aria può essere potenziato, sfruttando il moto turbolento, grazie ad una determinata velocità imposta al flusso e/o alla presenza di superfici alettate sulle celle, come si vede in figura 2.44.

⁹Secondo il *Primo Principio della Termodinamica* applicata ai sistemi aperti e secondo la legge di *Fourier*.

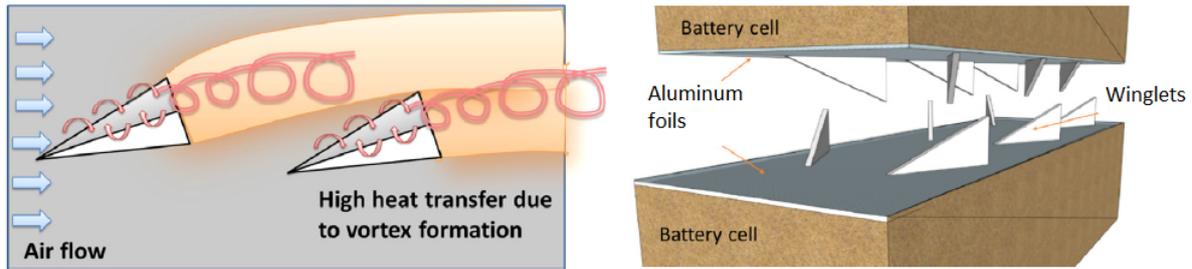


Figura 2.44: Esempio di sistema di raffreddamento ad aria, alettato[57].

Micro-channel: una soluzione tecnologica adottata da alcuni Case Automobilistiche è quella di sfruttare un raffreddamento mirato sulla superficie della cella. In queste piastre di raffreddamento, i canali sono posizionati sulla superficie della cella (vedi figura 2.45) e pertanto hanno dimensioni ridotte (diametri inferiori a $1 \div 2$ mm) e raffreddano in modo omogeneo la cella.

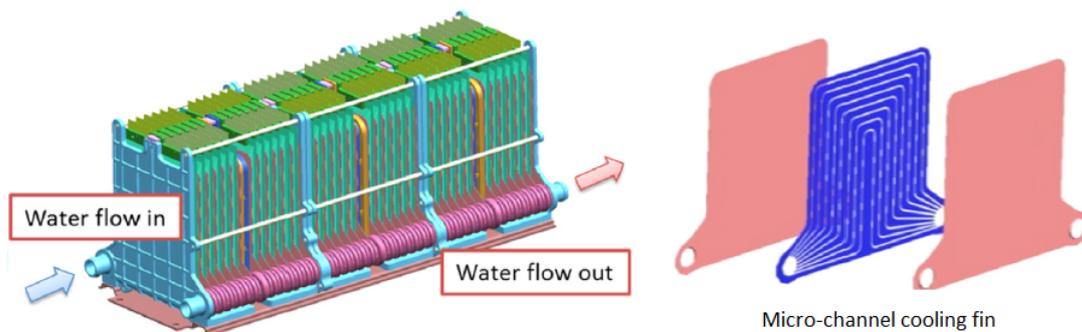


Figura 2.45: Esempio di sistema di raffreddamento liquido con micro-channel[57].

Nonostante lo scambio termico risulti più omogeneo, la realizzazione di tale soluzione tecnologica risulta essere complessa, per via delle dimensioni ridotte e del materiale da usare ed è quindi molto costosa. Inoltre, le portate sono limitate dalla dimensione dei micro-channel e dalla loro geometria interna. Stesso discorso vale per il raffreddamento ad aria, come si vede in figura 2.46, dove la struttura è simile a quella vista in precedenza.

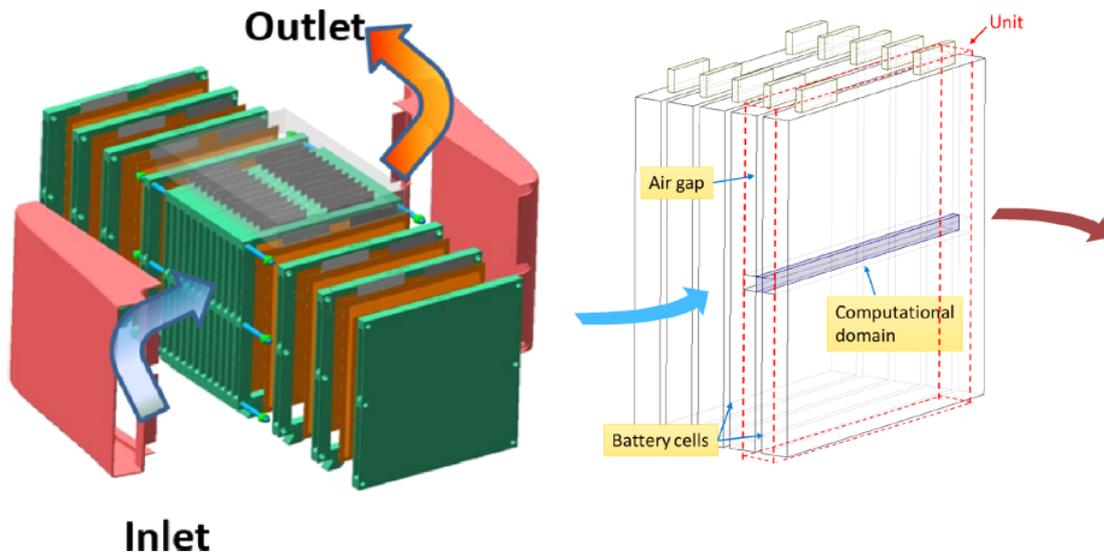


Figura 2.46: Esempio di sistema di raffreddamento ad aria con micro-channel[57].

Alcuni modelli ibridi di automobili, come la *Chevy Volt della Chevrolet*, utilizzano tale soluzione tecnologica per raffreddare il pacco batteria.

Cooling Plate: Un'altra soluzione adottata in commercio, è quella di utilizzare delle piastre di raffreddamento, a fluido, costituiti da serpentine o canali di dimensioni standardizzate (nell'ordine della decina di mm).

A livello commerciale, sono disponibili queste piastre (cooling plate), come si vede nella figura 2.47, che possono essere direttamente posizionate lungo la faccia della cella (nel caso di pouch cell e di celle prismatiche) o possono raffreddare dei componenti meccanici (alette, lamine in alluminio ecc.) che a loro volta sono a contatto con le celle. Queste piastre solitamente sono realizzate in alluminio o rame, a seconda delle esigenze conduttive e dei limiti di peso, per stampaggio o per estrusione.



Figura 2.47: Esempio commerciale di una piastra di raffreddamento, dell'azienda *Thermacool*[61].

Sistemi alettati: per quanto riguarda il raffreddamento delle celle cilindriche, per via della loro geometria, esistono delle soluzioni che sfruttano gli orifici fra le celle. Infatti, a seconda della disposizione delle celle, solitamente sostenute da appositi dispositivi (piastre polimeriche forate, holders ecc.), lo spazio fra le celle può variare. Dalla figura 2.48 si osservano due differenti

tipologie di impacchettamento per le celle cilindriche, la disposizione a) risulta essere quella che occupa il minor spazio possibile e allo stesso tempo dispone di orifizi più piccoli.

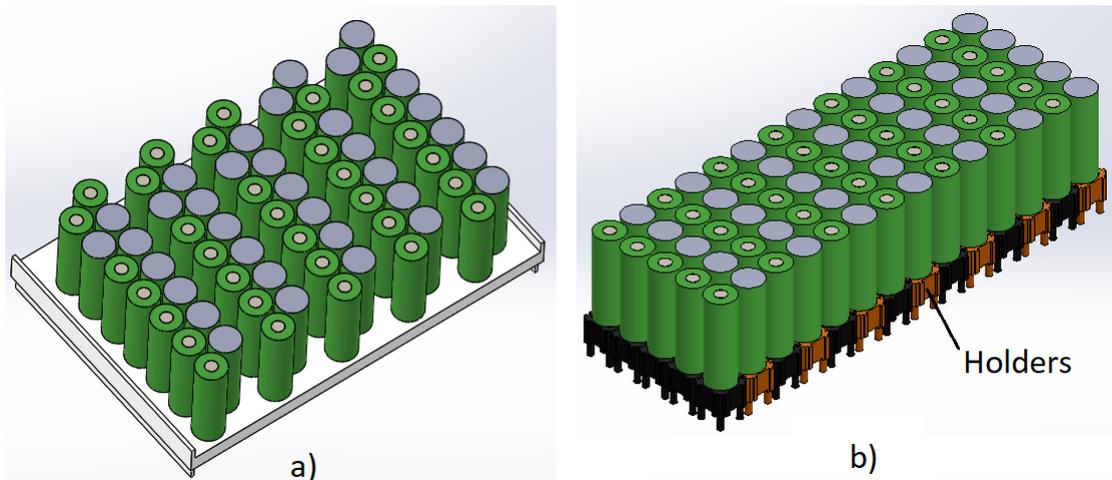


Figura 2.48: Esempi di due tipologie d'impacchettamento delle celle cilindriche.

A livello commerciale, la soluzione alettata è stata adottata da *Mercedes Benz* nel pacco batteria del modello *S400 Hybrid*.

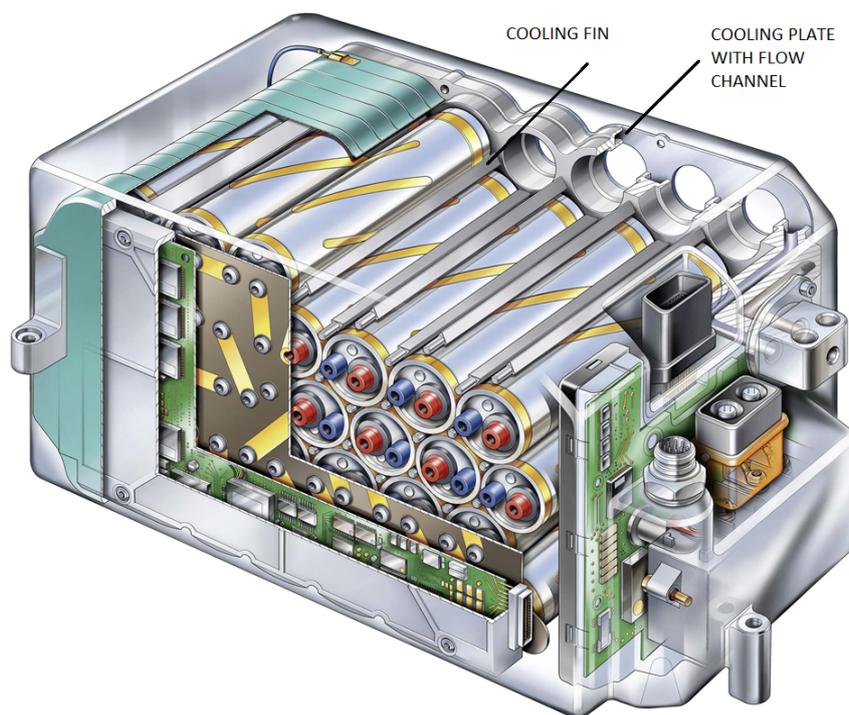


Figura 2.49: Pacco batteria presente nella *Mercedes benz S400 hybrid*[43].

Alcune applicazioni in commercio: qui di seguito, vengono riportati diverse tipologie di sistemi di raffreddamento dei pacchi batteria, attualmente utilizzati da alcune importanti aziende del settore Automotive. In figura 2.50, si osserva il layout di raffreddamento adottato da *Tesla Motors*. Tale soluzione presenta una serpentina di materiale metallico che raffredda

l'intero modulo, (solitamente composto da 80-84 celle cilindriche), all'interno della quale scorre, come fluido refrigerante, una miscela di acqua e glicole.

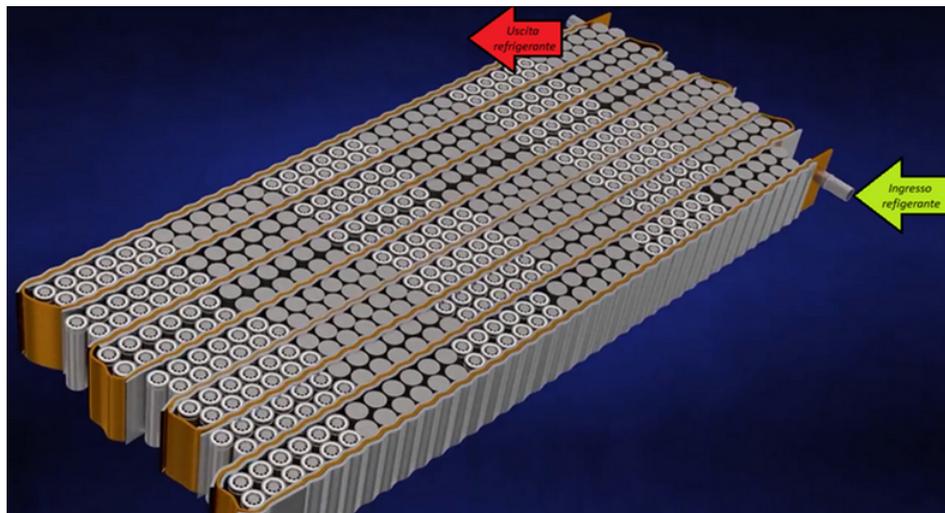


Figura 2.50: Sistema di raffreddamento del modulo *Tesla*, per celle cilindriche[12].

Tesla Motors ha brevettato[48] la forma e la geometria di tale serpentina; al suo interno possono esserci uno o più condotti per il liquido refrigerante. Inoltre, al fine di massimizzare il contatto e quindi la superficie di scambio termico fra le celle e la serpentina, quest'ultima viene anche rivestita da un'interfaccia deformabile con apposita geometria, visibile in figura 2.51.

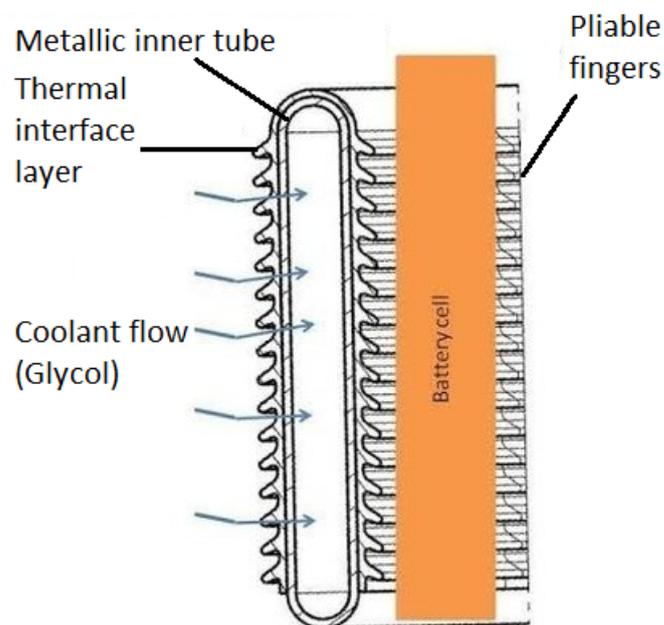


Figura 2.51: Sezione della serpentina *Tesla*. [48]

Analogamente, anche *BMW* sfrutta un sistema di raffreddamento del pacco batteria, a fluido (acqua e glicole). Infatti, nel modello *BMW i3* è presente un sistema di raffreddamento posizionato al di sotto di ogni modulo del pacco batteria. Come si vede in figura 2.52, il layout

è costituito da un cooling rail in sommità, cioè da un condotto principali al quale si connettono una serie di diramazioni rigide e parallele, all'interno delle quali fluisce il liquido refrigerante.



Figura 2.52: Cooling system presente nel pacco batteria della *BMW i3*[31].

Anche *LG Chem* ha brevettato[53] e ha realizzato un prototipo di piastra di raffreddamento (cold plate) da utilizzare per il raffreddamento dei pacchi batteria nei futuri modelli di *Chevy Bolt*. In figura 2.53 è possibile osservare la serpentina di raffreddamento (110) locata all'interno del basamento del pacco batteria.

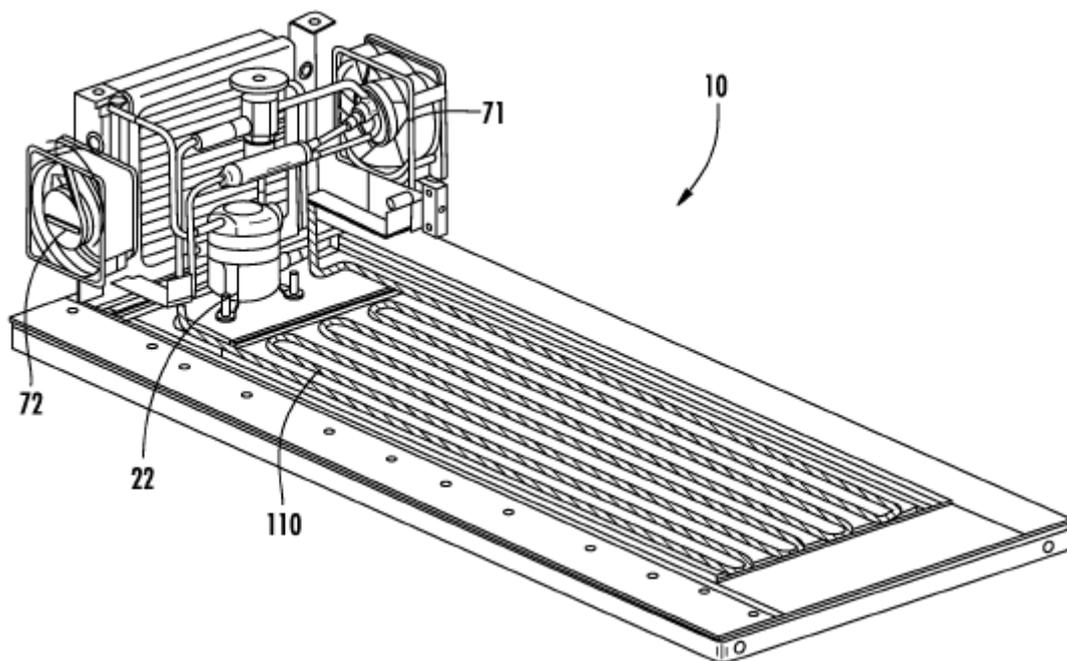


Figura 2.53: Piastra di raffreddamento (a fluido) brevettata da *LG Chem*[53].

2.6.2 Raffreddamento tramite PCM

Altre tipologie di sistemi di raffreddamento sfruttano i materiali a cambiamento di fase o PCM (*Phase Change Material*). Sono materiali in grado di accumulare calore latente, durante la transizione di fase, mantenendo costante la temperatura propria. Infatti, i PCM a temperatura ambiente si presentano allo stato solido, per poi liquefare al crescere della temperatura, assorbendo una determinata quantità di calore dall'ambiente esterno, per effettuare il cambiamento di fase. Allo stesso modo, quando la temperatura diminuisce, il materiale si solidifica e cede calore all'ambiente. Tale soluzione tecnologica rientra nella categoria dei sistemi di raffreddamento passivi, pertanto la matrice PCM o PCC deve essere abbinata ad un impianto di raffreddamento (generalmente a fluido), per poter dissipare il calore assorbito dalle celle.



Figura 2.54: Esempio di modulo con celle cilindriche, raffreddate tramite matrice PCM[56].

Per quanto riguarda le prestazioni termiche del PCM/PCC, queste risultano essere fortemente dipendenti dal tipo di materiale presente nella matrice. Come si osserva dalla specifiche tecniche dei prodotti PCC, in figura 2.55, la densità di tali matrici è notevolmente inferiore rispetto a quella delle lastre in alluminio ($2700kg/m^3$), o delle miscele di acqua e glicole ($1037 \div 1115kg/m^3$) utilizzate in alcuni sistemi di raffreddamento nei pacchi batteria. Ciò significa che, in termini di peso, si hanno dei benefici a livello di pacco, essendo la matrice di PCC molto leggera. Inoltre, grazie all'estrema facilità di lavorazione di tali materiali, si garantisce un ottimo contatto fra le celle e la matrice stessa, generando ampie superfici di scambio termico. Inoltre, presentano anche un ottimo comportamento alla fiamma (UL94-V0). Ulteriori vantaggi si hanno per quanto concerne il costo e la facilità nel montaggio.

Specifications	Unit	Detail	PCC37-1000	PCC48-1000
Melting Point	°C		37	48
Melting Range	°C		32 – 38	45 – 50
Density	(kg/m ³)	Room Temperature	895	890
Thermal Expansion - Solid Phase	(%/°C)	Measured from room temperature to melting onset	0.100	0.074
Thermal Expansion during Melting	(%/°C)	Measured during melting	0.841	0.839
Thermal Expansion - Liquid Phase	(%/°C)	Measured after melting to 75°C	0.075	0.051
Thermal Conductivity	(W/m*K)	XY-plane	10 – 25	10 – 25
		Z-plane	6 – 12	6 – 12
Latent Heat	(J/g)		155	180
Specific Heat	(J/g°C)	Specific Heat-Solid	1.91	1.82
		Specific Heat-Liquid	2.25	1.96
Electrical Resistance	(10 ⁻³ Ωm)	XY-plane	0.41	0.33
		Z-plane	0.19	0.14
Thermal Cycle Life		# of melting cycles	>10,000	>10,000

Figura 2.55: Specifiche tecniche di due tipologie di PCC dell'azienda, *AllCell-Technologies*[5].

Qui di seguito viene riportato un prototipo di modulo batteria, realizzato e simulato termicamente dall'azienda *AllCell-Technologies*. Come detto in precedenza, il PCM non può sostituire completamente un sistema di raffreddamento a fluido, ma bensì può integrarlo, riducendo il peso, gli ingombri e i costi a livello di pacco e può apportare miglioramenti in termini di scambio termico. In figura 2.56, si osserva il modulo costituito da diversi settori di PCM, contenenti quattro celle cilindriche, ognuno dei quali scambia il calore accumulato con una membrana in rame, raffreddata da un flusso di aria. Allo stesso modo, sarebbe possibile realizzare una configurazione simile, anche con liquidi refrigeranti, tramite l'utilizzo di canali fra i vari settori di PCM.

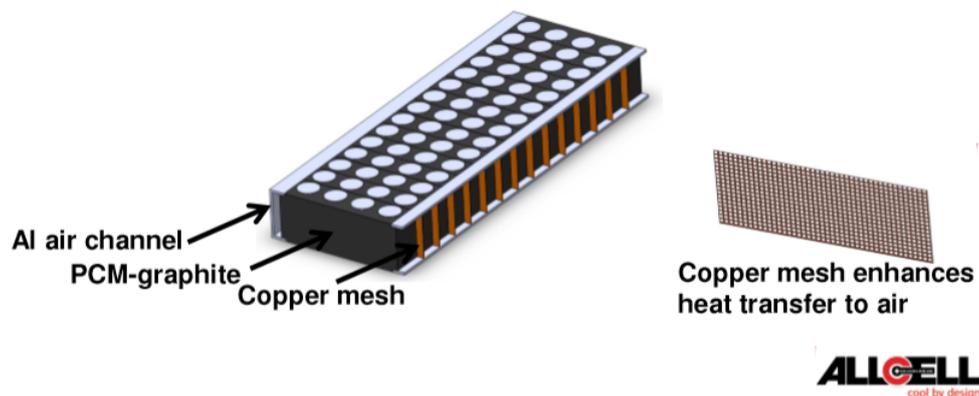


Figura 2.56: Prototipo di modulo realizzato e testato dell'azienda, *AllCell-Technologies*[29].

Dalle simulazioni termiche effettuate in tale studio[29], visibili in figura 2.57, prestando attenzione alla scala dei colori è possibile osservare che lo stesso pacco, raffreddato semplicemente ad aria presenta picchi di temperatura più elevati e una distribuzione della temperatura poco uniforme rispetto al caso con la matrice PCM integrata.

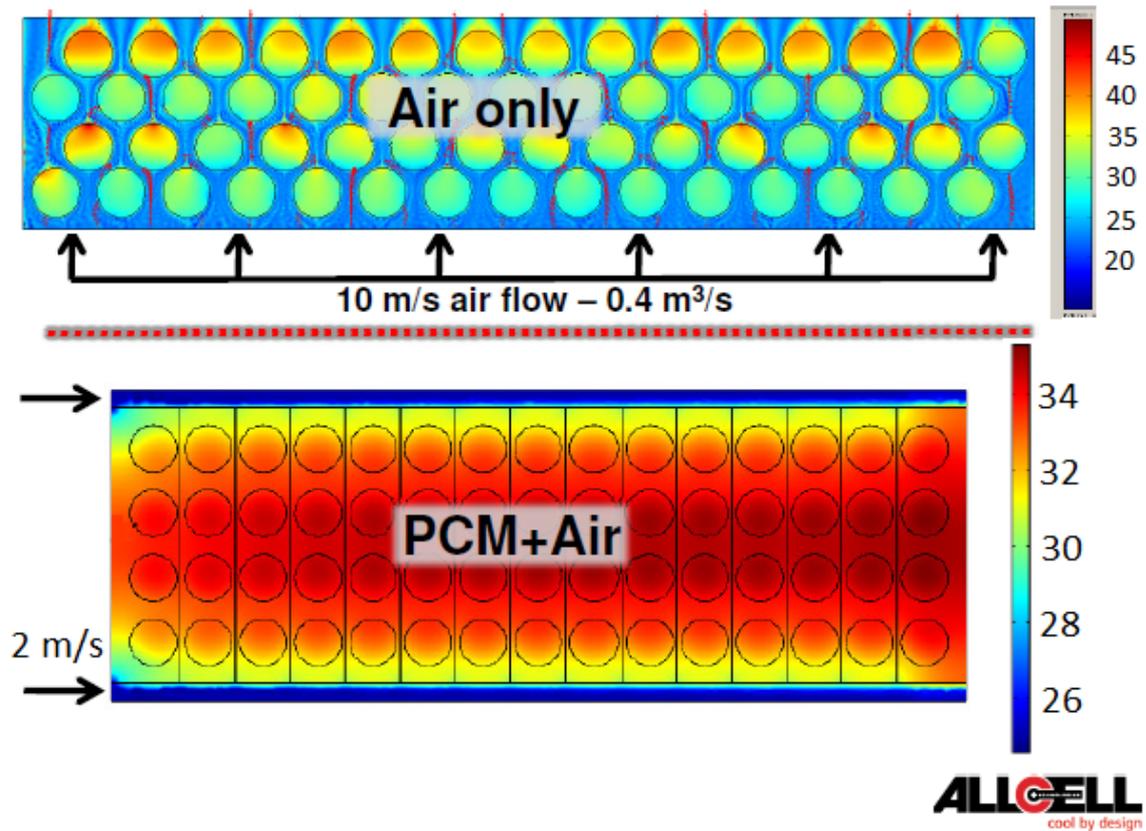


Figura 2.57: Prototipo di modulo realizzato e testato dell'azienda, AllCell-Technologies[29].

Capitolo 3

Requisiti di progetto del pacco batteria

L'attività prevede, come primo step di progettazione, la definizione dei requisiti progettuali del pacco batteria. La descrizione e i motivi che hanno portato alla loro definizione vengono affrontati nel primo paragrafo di questo capitolo. Per quanto concerne l'analisi della forma e della posizione del pacco batteria, le relative configurazioni vengono valutate nel secondo paragrafo del capitolo. Infine, si espongono le due soluzioni preliminari di pacco batteria, scelte.

3.1 Definizione dei requisiti di progetto

Dallo studio effettuato nel capitolo 2 dello *Stato dell'Arte*, è emerso che non esistono pacchi batteria a catalogo per questo tipo di applicazione e a fini progettuali, vengono adottate delle soluzioni "ad Hoc". Nello specifico, l'ibridazione delle motociclette si focalizza su veicoli di media-bassa cilindrata, come gli scooter; per quanto concerne le moto appartenenti a categorie di potenza superiore, sul mercato vi sono pochi modelli disponibili, molti dei quali sono in fase di sviluppo. Pertanto, l'obiettivo di questo studio è quello di dimensionare un pacco batteria utilizzabile per una motocicletta, avente una cilindrata del motore termico, pari a 900 cc. Stabilita la tipologia di applicazione, un ulteriore passo fondamentale riguarda la scelta dei parametri progettuali. Le moto a propulsione termica, di pari cilindrata, presentano delle potenze nominali, comprese fra $40 \div 95$ kW. In questo progetto, per il fatto che la propulsione elettrica, si integra con quella termica, si sceglie come potenza nominale del pacco batteria, un valore centrale di tale range. Per quanto riguarda l'aspetto energetico, il valore dell'energia nominale scelto è in linea alle caratteristiche elettriche delle moto ibride analizzate nello *Stato dell'Arte* ($1, 2 \div 4$ kWh). Infine, per poter soddisfare i primi due parametri scelti, è giocoforza stabilire il valore della tensione e della corrente nominale del pacco batteria. In quest'attività, si vuole progettare una soluzione il più possibile leggera e poco ingombrante, pertanto si decide di dimensionare un pacco ad alta tensione, con corrente nominale più contenuta. In tal modo si va a ridurre la dimensione dei cavi di potenza, ottenendo un risparmio in termini di peso e di volume. Di contro, sarà necessario prevedere delle misure di sicurezza ed isolamento elettrico più stringenti. In base a queste considerazioni, vengono riportati i requisiti scelti:

- Potenza nominale ≥ 50 kW
- Energia nominale ≥ 3 kWh
- Tensione nominale ≥ 350 Volt (Corrente nominale ~ 150 A)

- Volume di riferimento del pacco = $18 \div 50$ litri

3.2 Analisi della forma e della posizione del pacco batteria

La motocicletta scelta in questo studio è una *Ducati 900 SS* avente motore termico quattro tempi, bi-cilindro, 900 cc di cilindrata. Per quanto concerne il telaio, atto ad ospitare la batteria e tutti i componenti necessari per la trazione ibrida, si decide di utilizzare un telaio diverso rispetto a quello della motocicletta adottata, per esigenze di volumi. Infatti, in figura 3.1 è possibile osservare l'ipotetico telaio da utilizzare, il quale è provvisto di una sede per il motore elettrico, locato sopra alla forcella posteriore. Inoltre, tale telaio dispone di una forma idonea per ospitare il motore termico scelto e i componenti per la trasmissione ibrida. Negli obiettivi di questo studio, non rientra la progettazione del telaio e degli altri componenti necessari per la trazione ibrida, pertanto lo chassis visibile in figura 3.1 viene semplicemente utilizzato come linea guida per la definizione della forma e della posizione del pacco batteria.

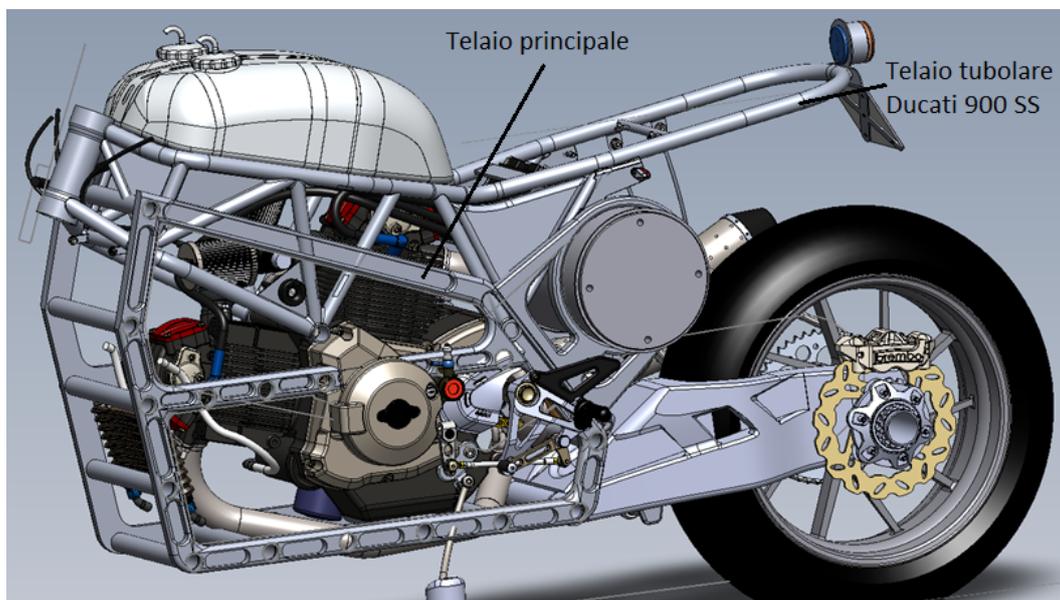


Figura 3.1: Telaio utilizzato in questo progetto.

Per quanto concerne il posizionamento del pacco batteria all'interno dello chassis, il seguente studio prende ispirazione da alcune soluzioni commerciali, mettendo in evidenza i rispettivi vantaggi e svantaggi per ogni singolo layout. Nel seguito vengono riportati alcuni esempi.



Figura 3.2: Posizione del pacco batteria, *Energica Ego*[38].



a)



b)

Figura 3.3: (a) Posizione del pacco batteria, negli scooter *Honda PCX Hybrid*[58] e (b) *Super Soco*[26].

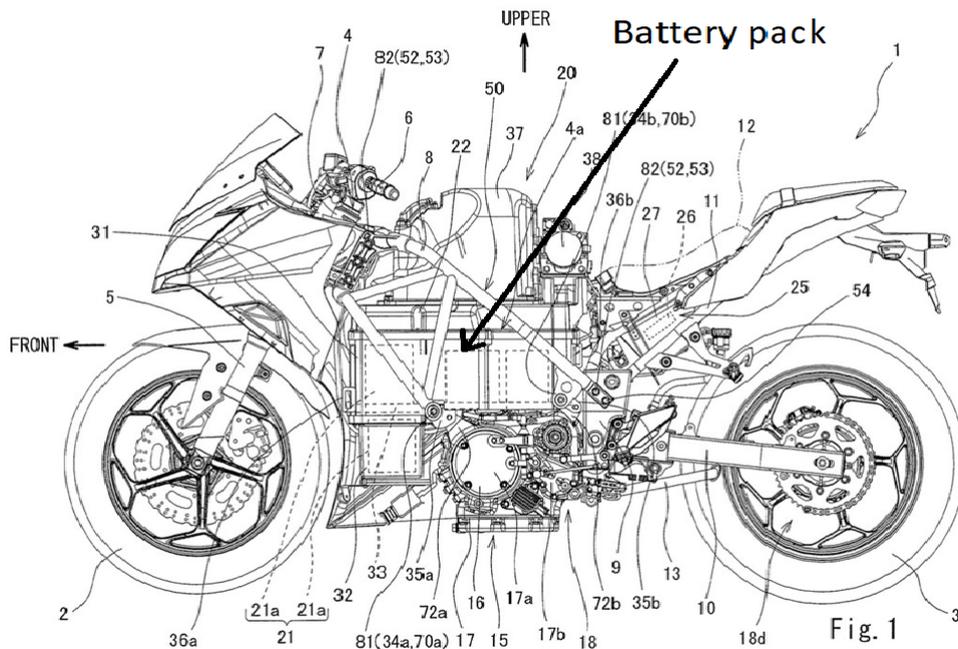


Figura 3.4: Posizione del pacco batteria, nella *Kawasaki Ninja elettrica*, patent *Kawasaki* [60].

La definizione della forma e del posizionamento del pacco batteria, sono due aspetti fondamentali e devono rispettare le seguenti misure progettuali:

- Praticità nel montaggio del pacco.
- Protezione meccanica da urti esterni.
- Isolamento elettrico.
- Isolamento termico.
- Limitato impatto sull'assetto dinamico del veicolo.
- Rispetto dell'ergonomia del veicolo.
- Accessibilità del pacco batteria nella fase di ricarica e durante eventuali attività di manutenzione.
- Minore ingombro e peso.

Definito il volume di partenza, dal dimensionamento elettrico e basandosi sulle scelte commerciali viste in precedenza, qui sotto vengono riportate tre ipotetiche configurazioni per il pacco batteria. Quest'ultimo, oltre a possedere un volume superiore a quello preliminare, ottimizza lo spazio presente nella porzione di telaio in cui viene inserito. Le figure 3.5, 3.6, 3.7 mostrano tre diversi layout di posizionamento e forma del pacco batteria. In tutte le figure, il serbatoio viene parzialmente occupato dal pacco batteria, per il fatto che in un veicolo ibrido, l'autonomia di quest'ultimo è sempre garantita in parte dal serbatoio e in parte dal pacco elettrico. Il serbatoio della *Ducati 900 SS* ha un volume di 21 litri e pertanto si prevede una riduzione massima del suo volume di 11 litri.

Nella prima figura (3.5), il pacco è scomposto in due sotto pacchi di forma diversa, locati in due posizioni differenti (parte finale del serbatoio e sotto sella). Nonostante tale soluzione

garantisca una distribuzione del peso abbastanza omogenea lungo il telaio, risulta essere poco pratica. Infatti, per ciascun sotto pacco, è necessario progettare un sistema di raffreddamento e d'isolamento elettrico individuale. Inoltre, è altrettanto complesso realizzare il collegamento elettrico fra i due sotto pacchi, a causa dell'ingombro occupato dai cavi di potenza e dalla loro messa in sicurezza. Ulteriore problema riguarda il sotto pacco posteriore, il quale risulta locato troppo vicino alla forcella posteriore e quindi soggetto, con più facilità, ad urti con la ruota. Infine, questa soluzione, con molta probabilità, genera un effetto negativo sulla dinamica del veicolo e della sospensione.

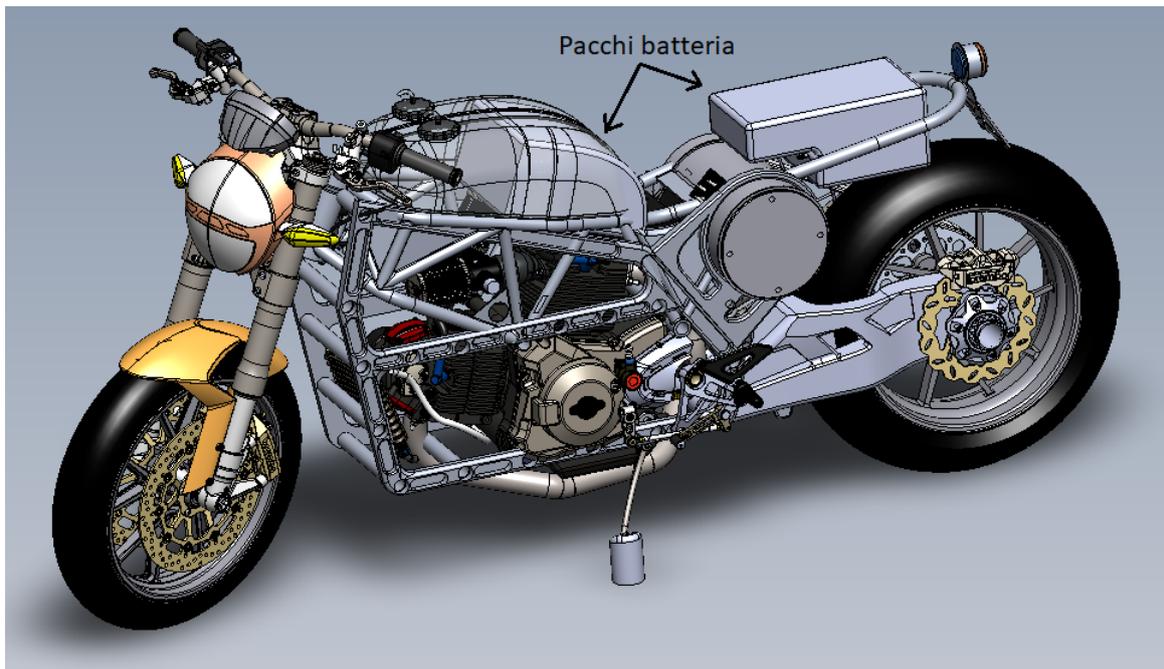


Figura 3.5: Prima configurazione analizzata: forma e posizione dei due sotto pacchi.

In figura 3.6, si riporta una configurazione costituita da un solo pacco, il quale oltre a svilupparsi verticalmente, presenta due sporgenze laterali. Il vantaggio di questa soluzione è che, essendoci un unico pacco compatto, vengono risolte le problematiche presenti nel primo layout, precedentemente descritto. Nonostante ciò, non è comunque accettabile per diversi motivi: in primo luogo, il montaggio del pacco all'interno dello chassis, risulta essere molto complesso. Un altro svantaggio è legato alla sicurezza del veicolo e del passeggero infatti, non essendo il pacco completamente inserito all'interno del telaio, lateralmente può subire pericolosi danneggiamenti dovuti ad eventuali cadute. Infine, anche in questo caso si peggiora la dinamica del veicolo. Infine, la soluzione è poco ergonomica per il passeggero.

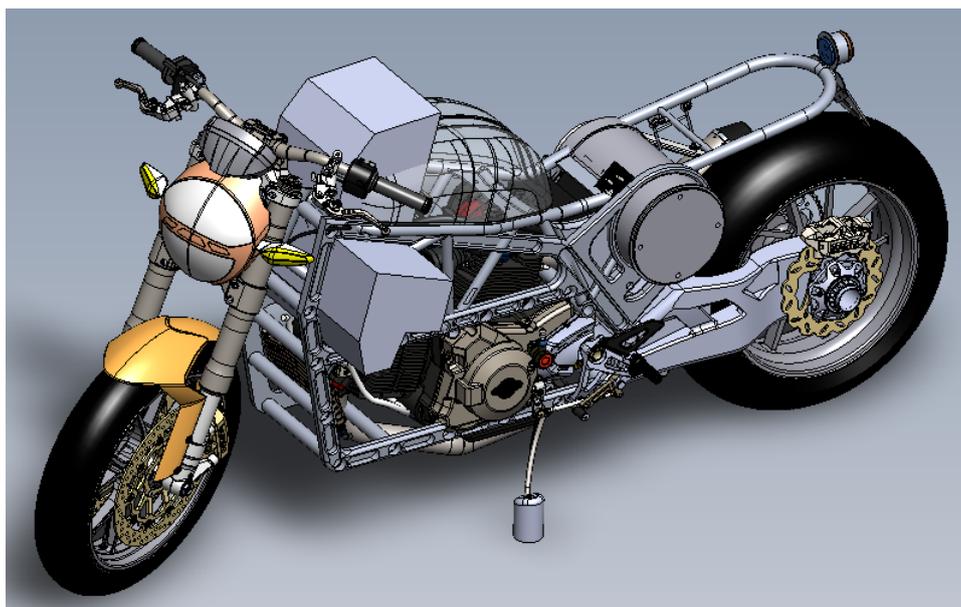


Figura 3.6: Seconda configurazione analizzata: forma del pacco e posizionamento nel telaio.

In figura 3.7, è visibile una terza soluzione preliminare di forma e di posizionamento del pacco batteria. Quest'ultimo si presenta come un unico pacco, compatto e facile da montare, andando ad inserirlo, nello chassis, verticalmente. Nella parte alta, occupa poco più della metà del serbatoio (11 litri circa) e garantisce una buona ergonomia per il passeggero. Inoltre, la parte inferiore, avente sezione trapezoidale è destinata ad ospitare i componenti elettrici di potenza e di segnale, mentre le celle sono collocate nella parte superiore del pacco. Rispetto alle precedenti configurazioni, in questo caso si garantisce un livello di sicurezza maggiore e l'impatto nella dinamica del veicolo è ridotto. Inoltre, nel caso in cui si volesse progettare un pacco con requisiti elettrici più contenuti, per quanto riguarda la nuova forma del pacco, basterà scalare quella ottenuta in quest'analisi. Tale forma e posizionamento del pacco traggono ispirazione da alcune soluzioni commerciali, come nel caso della *Super Soco*, visibile in figura 3.1 (b).

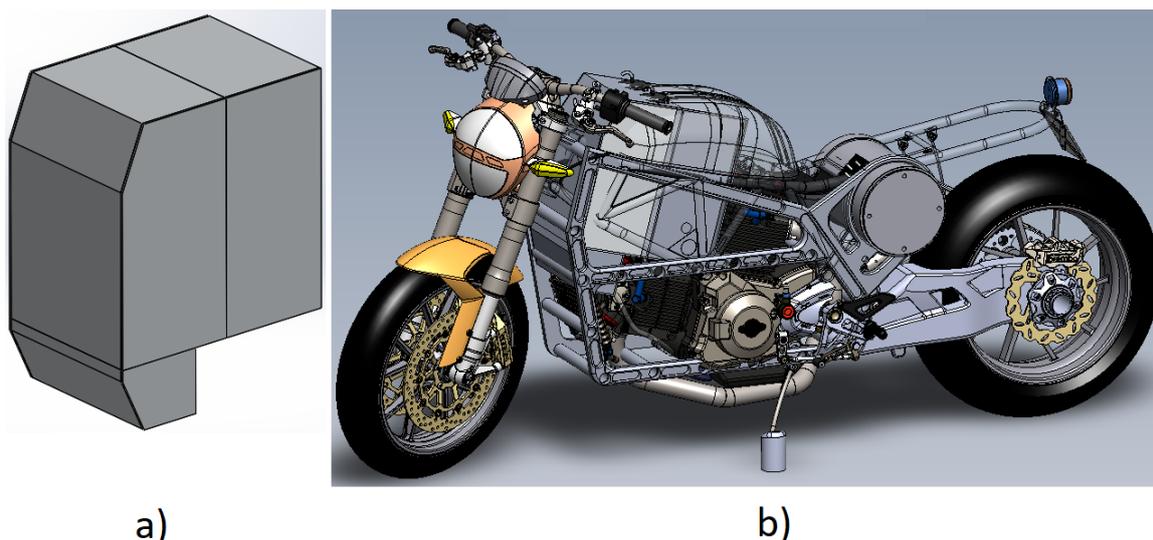


Figura 3.7: Configurazione finale: forma del pacco scelta (a) e suo posizionamento nel telaio (b).

3.3 Forma del pacco adottata

Nelle figure 3.8 e 3.9, vengono riportate le forme preliminari scelte per le due soluzioni progettuali. Dalla tabella 3.1, si osserva che, il pacco utilizzato nel secondo caso di studio possiede un peso ed un volume leggermente inferiori rispetto a quello della prima soluzione.

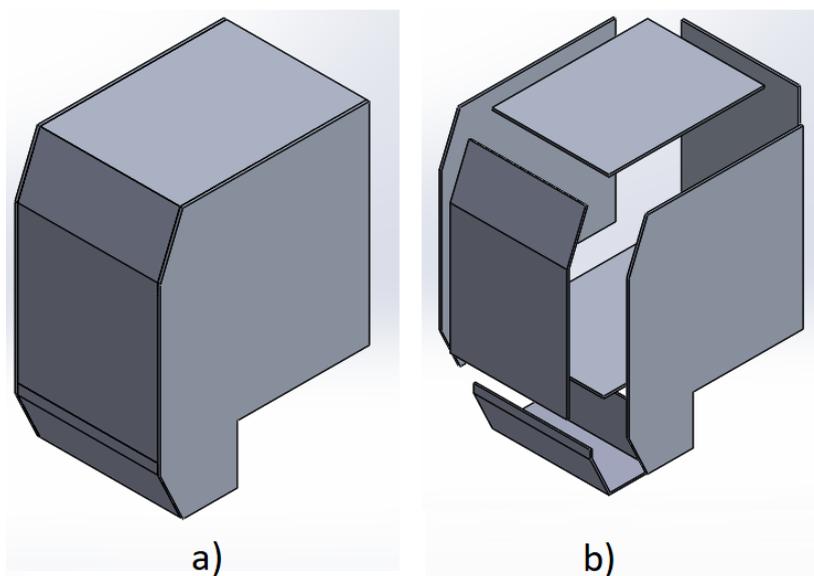


Figura 3.8: Forma preliminare adottata nella prima soluzione progettuale.

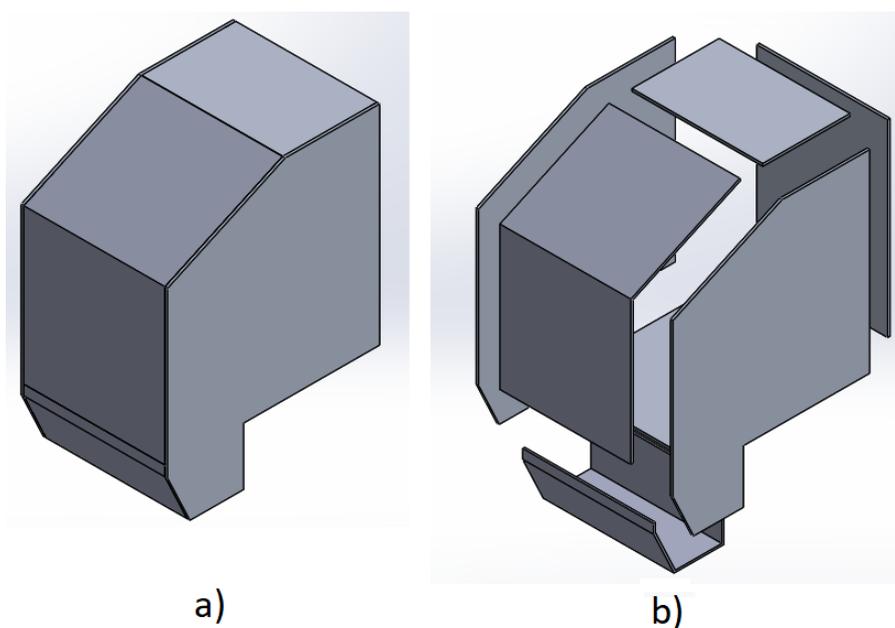


Figura 3.9: Forma preliminare adottata nella seconda soluzione progettuale.

Caratteristiche tecniche	Prima soluzione	Seconda soluzione
Peso del pacco [kg]	9,78	9,57
Volume del pacco [l]	39,6	38,3

Tabella 3.1: Caratteristiche dei pacchi adottati nei due casi di studio.

A livello preliminare, per entrambe le due soluzioni progettuali, si prevede la realizzazione della struttura esterna con delle piastre di alluminio, aventi spessore di 5 mm, saldate insieme. Nello specifico, le piastre impiegate sono ottenute mediante il processo di estrusione, essendo una soluzione commercialmente diffusa. In particolare, come materiale delle piastre, si utilizza dalla libreria di *SolidWorks*, la lega di alluminio 6061-T6 (SS), ottima per essere lavorata mediante estrusione e dalle buone caratteristiche meccaniche. Queste ultime sono riportate nella tabella 3.2. In figura 3.10 si mette in evidenza un'ipotetica lega utilizzabile commercialmente e molto simile a quella impiegata nella libreria di *SolidWorks*.

Caratteristiche meccaniche	valore	unità
Modulo Elastico	69000	$[N/mm^2]$
Coefficiente di Poisson	0,33	$[N/A]$
Modulo di taglio	26000	$[N/mm^2]$
Densità di massa	2700	$[kg/m^3]$
Tensione di snervamento	275	$[N/mm^2]$
Coefficiente di dilatazione termica lineare	$2,4 * 10^{-5}$	$[1/K]$
Conducibilità termica	166,9	$[W/(m K)]$
Calore specifico	896	$[J/(kg K)]$

Tabella 3.2: Caratteristiche meccaniche della lega di alluminio 6061-T6 SS.

		LEGA DI ALLUMINIO DA ESTRUSIONE Extrusion Aluminium Alloy				EN AW- 6061			
<p>Tra le leghe utilizzate per applicazioni strutturali, la lega EN AW 6061 trova enorme impiego grazie alle resistenze medio-alte raggiunte in seguito al trattamento termico di bonifica (tempra ed invecchiamento artificiale).</p> <p>Le applicazioni più frequenti riguardano realizzazione di bulloni e rivetti, profili standard per lavorazioni meccaniche, strutture civili (ponti, tori, piloni), parti strutturali di mezzi di trasporto (telai di camion, strutture navali, carrozze ferroviarie, applicazioni aeronautiche).</p>									
Caratteristiche fisiche									
massa volumica :	2,70	g / cm ³	conduttività termica a 20°C	- nello stato O: -nello stato T6:	1,72 1,55	W / cm °K W / cm °K			
punto di fusione inferiore :	582	°C	coefficiente di dilatazione termica lineare	-tra 20° e 100°C:	23,4 · 10 ⁻⁶	1 / °K			
calore specifico tra 0° e 100°C:	962	J / Kg °K		-tra 20° e 200°C:	24,3 · 10 ⁻⁶	1 / °K			
modulo di elasticità lineare E:	69000	N / mm ²		-tra 20° e 300°C:	25,4 · 10 ⁻⁶	1 / °K			
modulo elasticità tangenziale G:	26000	N / mm ²	resistività elettrica a 20°C	-nello stato O: -nello stato T6	3,83 4,31	μΩ · cm μΩ · cm			
Proprietà meccaniche minime, secondo Norma Europea EN 755.2									
Tipi di profilo	(1) stato fisico di fornitura	diametro D [mm] per tondi, o spess. S [mm] per barre, o spess. di parete e per profili		Carico di rottura a trazione Rm [MPa]		Carico limite di elasticità R _{p0.2} [MPa]		Allungamento	
				min	max	min	max	A % min	A _{50mm} % min
Barre piene	O , H111	D ≤ 200	S ≤ 200	-	150	-	110	16	14
	T4 (*)	D ≤ 200	S ≤ 200	180	-	110	-	15	13
	T6 (*)	D ≤ 200	S ≤ 200	260	-	240	-	8	6
Tubo estruso	O , H111	e ≤ 25		-	150	-	110	16	14
	T4 (*)	e ≤ 25		180	-	110	-	15	13
	T6 (*)	e ≤ 5 5 < e ≤ 25		260	-	240	-	8 10	6 8
Profiliati	T4 (*)	e ≤ 25		180	-	110	-	15	13
	T6 (*)	e ≤ 5 5 < e ≤ 25		260	-	240	-	9 10	7 8
<p>NOTA (*): proprietà meccaniche dello stato fisico ottenibili anche con tempra alla pressa (1) : vedasi Tavola relativa a: "Descrizione dei trattamenti e degli stati metallurgici adottati nella produzione standard"</p>									

Figura 3.10: Esempio commerciale di lega di alluminio, da estrusione, della ditta *Metra*[39].

Capitolo 4

Prima soluzione progettuale

In questa prima attività progettuale, si propone l'utilizzo delle celle a sacchetto, questo perché, attualmente sono molto utilizzate in molti pacchi batteria delle automobili ibride ed elettriche. Infatti, sul mercato sono disponibili molte tipologie di pouch cell e sono presenti differenti soluzioni tecnologiche per l'aspetto termico ed elettrico. Nei paragrafi successivi vengono riportati i vari aspetti progettuali affrontati in questa soluzione.

4.1 Dimensionamento elettrico

Definiti i requisiti progettuali nel capitolo 3, è possibile estrapolare, in modo preliminare, un volume e un peso del pacco batteria, sfruttando il dimensionamento elettrico di quest'ultimo. Questo dimensionamento preliminare, qui sotto riportato, viene applicato a diverse tipologie di pouch cells (vedi paragrafo 4.2). Nel seguito vengono riportate l'equazioni utilizzate:

$$N_{\text{celle in serie}} = \frac{\textit{Tensione nominale pacco}}{\textit{Tensione nominale cella}} \quad (4.1)$$

$$N_{\text{celle in parallelo}} = \frac{\textit{Corrente nominale pacco}}{\textit{Corrente max continuativa di scarica cella}} \quad (4.2)$$

$$N_{\text{celle dovute all'energia}} = \frac{\textit{Energia nominale pacco}}{\textit{Energia nominale cella}} \quad (4.3)$$

$$N_{\text{celle totali, di potenza}} = N_{\text{celle in serie}} * N_{\text{celle in parallelo}} \quad (4.4)$$

$$N_{\text{celle totali}} = \max(N_{\text{celle dovute all'energia}}, N_{\text{celle totali, di potenza}}) \quad (4.5)$$

$$\textit{Volume preliminare pacco} = N_{\text{celle totali}} * \textit{Volume cella} \quad (4.6)$$

$$\textit{Peso preliminare pacco} = N_{\text{celle totali}} * \textit{Peso cella} \quad (4.7)$$

Da tale dimensionamento iniziale, emerge che al fine di rispettare i parametri elettrici di progetto (energia e potenza nominale), come numero totale di celle costituenti il pacco si deve prendere il massimo fra i risultati ottenuti dalle equazioni 4.3 e 4.4. Pertanto, è giocoforza scegliere una tipologia di cella che garantisca il raggiungimento di tali parametri, senza sovradimensionarli eccessivamente.

4.2 Tipo di cella adottata

Per quanto concerne il dimensionamento elettrico di massima, si fa riferimento al procedimento descritto nel paragrafo precedente. In questo studio, vengono prese in esame diverse celle dell'azienda *Kokam* ed emerge che, il modello SLPB11543140H5 garantisce il raggiungimento dei requisiti progettuali, del pacco batteria, evitando eccessivi sovradimensionamenti.

type	N celle serie	N celle parallelo	N celle tot, potenza	N celle energia	Energia pacco raggiunta [kWh]	Variazione energetica rispetto progetto [kWh]	Volume tot celle [l]	Peso tot celle [kg]
SLPB065070180	98	6	588	70	25,7	22,7	53,6	100,0
SLPB080085270	95	3	285	31	28,2	25,2	56,0	108,3
SLPB8043128H	95	3	285	254	3,4	0,4	12,2	27,9
SLPB526495	95	22	2090	246	25,5	22,5	69,5	140,0
SLPB8643128H5	95	2	190	226	2,5	-0,5	11,0	22,8
SLPB11543140H5	95	2	190	163	3,5	0,5	13,6	25,1
SLPB050106100	95	15	1425	163	26,3	23,3	91,8	171,0
SLPB50106100	84	6	504	143	10,7	7,7	32,5	70,6
SLPB776495	95	14	1330	153	26,0	23,0	63,9	135,7
SLPB75106100	93	4	372	106	10,6	7,6	32,1	61,4
SLPB68106100	95	9	855	102	25,3	22,3	67,7	136,8
SLPB7570180	95	8	760	85	27,0	24,0	86,7	163,4
SLPB98106100	95	8	760	82	28,1	25,1	82,9	159,6
SLPB55205130H	95	2	190	74	7,7	4,7	30,2	53,2

Figura 4.1: Risultati del dimensionamento elettrico di alcuni modelli di pouch cell dell'azienda *Kokam*.

Nella prima parte della tabella visibile in figura 4.1, si riportano alcuni risultati ottenuti dal dimensionamento elettrico, mostrato nel capitolo precedente. Per quanto concerne la verifica del raggiungimento dei requisiti progettuali, si deve fare riferimento alle ultime tre colonne della medesima tabella. La logica adottata è la seguente: si determina il numero di celle imposte dalla potenza nominale del pacco (vedi equazione 4.4), si calcola il valore di energia raggiunta con tale numero (sesta colonna della tabella) e si verifica che sia soddisfatto tale parametro. Nel caso negativo, il numero di celle da considerare sarà quello imposto dal parametro energetico (quinta colonna, della tabella, vedi equazione 4.3). Stabilito il numero di celle costituenti il pacco, si determina il volume e il peso preliminare generato. Si osserva che il modello SLPB11543140H5 (i cui risultati sono messi in evidenza nella tabella 4.1), presenta la più piccola variazione energetica positiva rispetto al progetto, oltre ad un volume molto contenuto. Secondo le caratteristiche di tale cella, sarebbe sufficiente utilizzare una sola cella per consentire il passaggio della corrente nominale del pacco (143 A). Risulta però necessario adottare due celle in parallelo, perché solo in tal modo è possibile consentire il passaggio della corrente nominale e al tempo stesso, soddisfare il parametro energetico. Il modello di cella SLPB8043128H può sembrare migliore, in termini energetici e di volume, ma prestando attenzione si osserva che, il numero di celle totali è assai più grande rispetto al caso scelto. Ciò comporta ad un peso complessivo del pacco maggiore. Tale analisi si considera preliminare per il fatto che trascura la disposizione finale delle celle, la quale determina la tipologia e la dimensione dell'impianto di raffreddamento e di collegamento elettrico. Pertanto, la penultima colonna insieme all'ultima, rappresentano un parziale ma utile confronto fra più modelli di pouch cell.

Un'ulteriore e fondamentale considerazione assunta in questo studio, riguarda il concetto di "macro cella-unità". Infatti, per ogni "linea di parallelo"¹, occorre posizionare un fusibile atto a

¹Dalla tabella 4.1, la terza colonna indica quante celle occorrono in parallelo per garantire il passaggio della

salvaguardare l'integrità della linea stessa (nel caso della SLPB11543140H5 vi sono due linee di celle in parallelo e quindi due fusibili in totale). Per evitare l'utilizzo di N fusibili per le "N linee di parallelo", si preferisce realizzare una "macro cella", chiamata unità, costituita da N celle in parallelo. In questo modo non si hanno più "N linee di parallelo" di celle, ma si utilizza un'unica linea in cui vi sono in serie tutte le unità; ciò comporta all'utilizzo di un solo fusibile e quindi al risparmio di spazio e di peso.

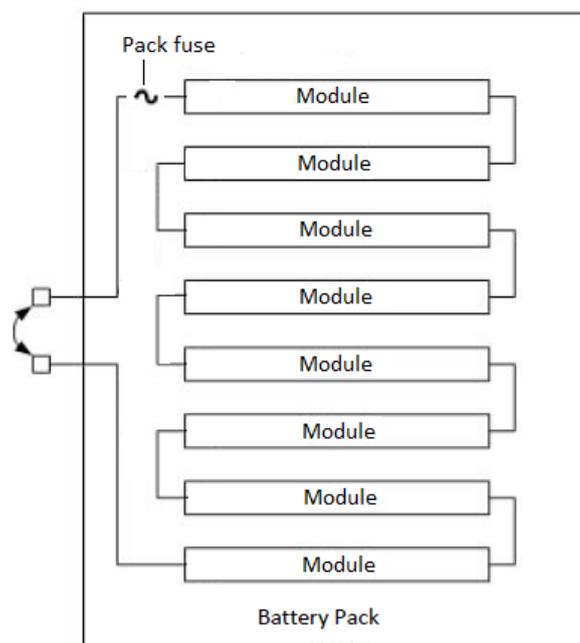


Figura 4.2: Schema logico del pacco batteria con il fusibile di protezione.

corrente nominale; pertanto, tale colonna indica il numero delle linee di celle in parallelo fra di loro.

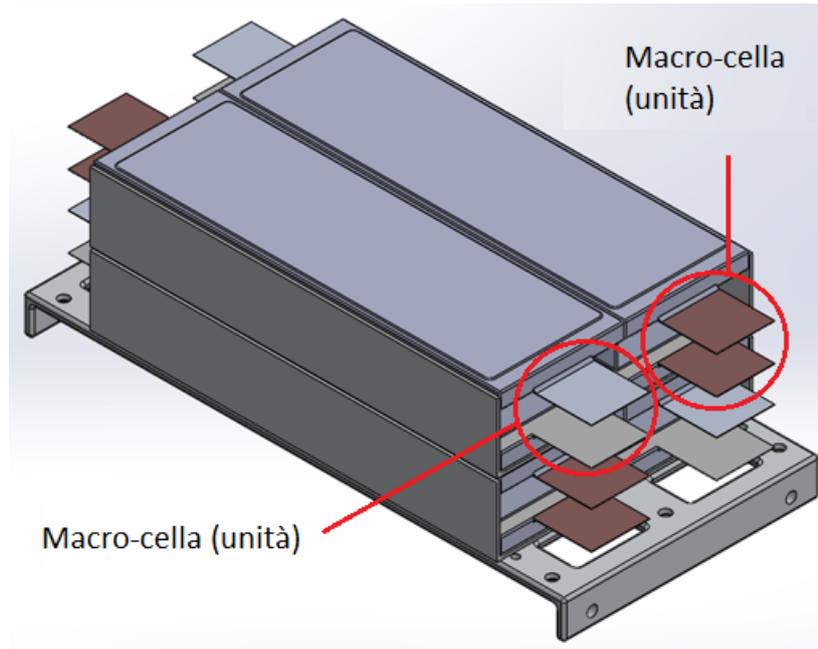


Figura 4.3: Esempio di macro-celle (costituite da due celle in parallelo) predisposte per essere collegate in serie.

Vengono nel seguito riportati i dati tecnici della cella adottata in tale soluzione progettuale. La cella, visibile in figura 4.5, presenta i due tab posizionati sui lati opposti.

Electrical Characteristics				
Items	Specification			Remarks
Rated Capacity	5.0 Ah			Charge@0.2C, 23±3 °C Discharge@0.2C, 23±3 °C
Energy Density	Gravity	138 Wh/kg		Excluded tab and seal
	Volume	306 Wh/L		
Internal Resistance	Max. 2.3 mΩ			@ 1kHz, AC
Weight	Max. 134 g			
Cell Dimension [Maximum]	Thickness ^(A)	11.6 mm		@ 3.7±0.1V
	Width ^(B)	43 mm		Folded
	Length ^(C)	140 mm		Excluded tab length
Voltage	Average	3.7 V		
	Lower limited	2.7 V		
	Upper Limited	4.2 V		
Current [Maximum]	Charge	Cont.	10.0A (2C)	@ 23±3 °C
		Discharge	Cont.	150.0A (30C)
		Peak.	250.0A (50C)	<10sec , > SOC 50%
Cycle life to 80% of remaining capacity	1C/1C	≥1,000		100% DOD or 3.0~4.2V (@23±3 °C)

Figura 4.4: Specifiche tecniche della Kokam pouch cell, modello SLPB11543140H5[35].

A : Max. 11.6 mm
B : Max. 43 mm
C : Max. 140 mm

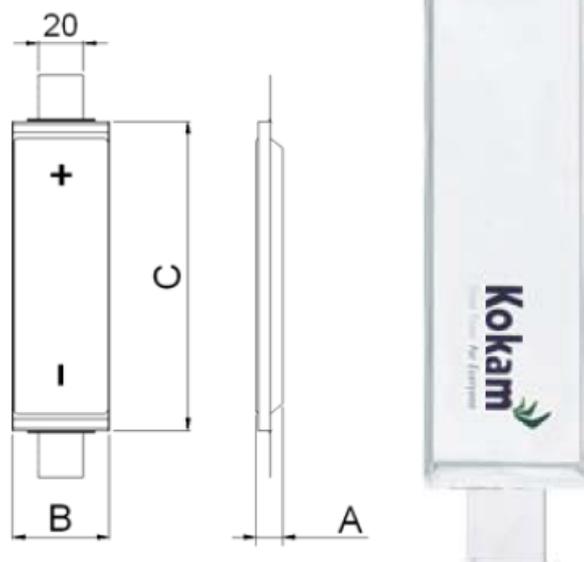


Figura 4.5: Forma e dimensione della *Kokam* pouch cell, modello SLPB11543140H5[35].

4.3 Struttura interna della macro cella

In questa progetto, per rendere più rapido l'assemblaggio del modulo, la macro cella (unità) anziché essere costituita da due celle in parallelo (come spiegato nel paragrafo precedente) presenta due coppie di celle in parallelo. A livello elettrico, le due coppie di celle in parallelo presenti in ogni unità, non vengono collegate in serie fra loro ma bensì con le coppie delle unità precedenti e successive. Pertanto, nell'unità, ogni coppia di celle in parallelo presenta una tensione nominale di 3,7 Volt e una capacità nominale raddoppiata, pari a 10 Ah.

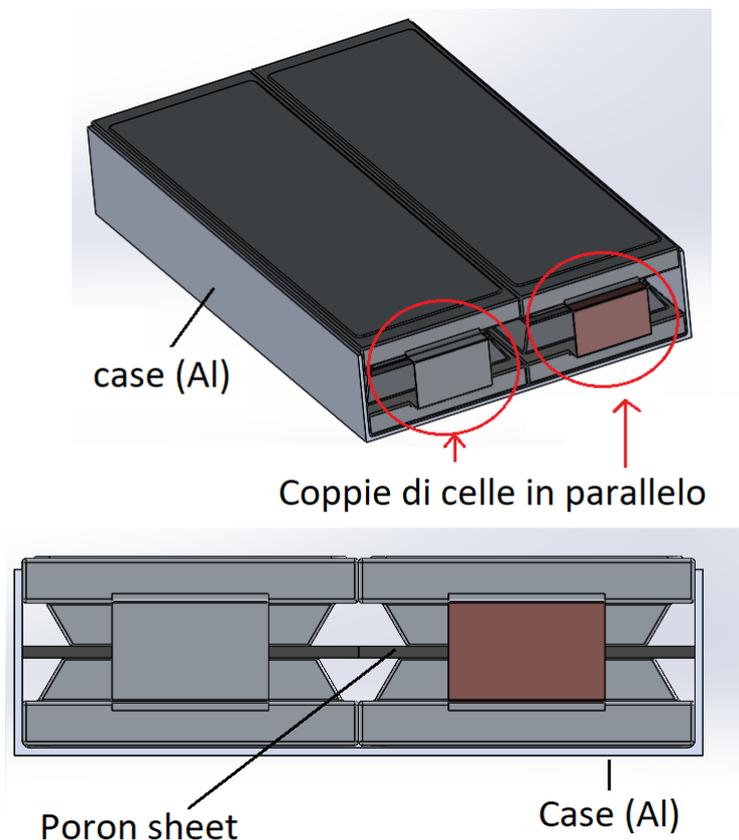


Figura 4.6: Struttura interna dell'unità utilizzata.

Dalla figura 4.6, è possibile osservare che l'involucro esterno (case), presenta una sezione trasversale a forma di "C", per diversi motivi. Innanzitutto, l'aspetto termico è quello determinante infatti, con tale layout, il trasferimento di calore avviene lungo la superficie più ampia della cella. Inoltre, i due lati dell'involucro esterno vanno direttamente in battuta con la piastra di raffreddamento, creando così una connessione termica molto vicina alle celle. In secondo luogo, con questa forma, viene assicurato un buon serraggio delle celle, in direzione verticale e laterale. Un altro aspetto di notevole interesse riguardante sempre il case, è che quest'ultimo, nella direzione verticale, non copre completamente la pouch cell, ma vi è un piccolo gap (nell'ordine $1 \div 2 \text{ mm}$). Questo gap voluto è destinato ad annullarsi, in fase di montaggio, quando il modulo viene serrato tramite gli appositi accoppiamenti filettati. Sempre nella medesima figura, fra le due celle collegate in parallelo, è possibile osservare la presenza di uno strato elastico di *Poron 4701-30 very soft*. Tale materiale ha il compito di assorbire l'espansione delle celle durante il loro funzionamento. In tabella 4.1 vengono riportate le caratteristiche principali di tale materiale.

Caratteristiche tecniche	valore	unità
Spessore	1,5	[mm]
Densità	320	[kg/m ³]
Rigidità dielettrica	1969	[kV/m]
Conducibilità termica	0,076	[W/m C]

Tabella 4.1: Caratteristiche tecniche *Poron Rogers Corporation*[16].

Per quanto concerne il discorso della sicurezza, il case della macro cella deve essere rivestito da materiali elettricamente isolanti, descritti più avanti nel paragrafo 4.4.4.

Infine, per ottenere una migliore distribuzione della temperatura sulla superficie della cella, su quest'ultima si applica il seguente foil commerciale della *Panasonic* (spessore nell'ordine dei μm), modello EYG, riportato in figura 4.7. Tale pellicola, presenta un'elevata conducibilità termica, un buon isolamento elettrico e per le sue proprietà chimiche, permette una migliore distribuzione della temperatura.

Features

- Excellent thermal conductivity : 700 to 1950 W/(m·K)
(2 to 5 times as high as copper, 3 to 8 time as high as aluminum)
- Lightweight: Specific gravity : 0.85 to 2.13 g/cm³
(1/4 to 1/10 of copper, 1/1.3 to 1/3 of aluminum in density)
- Flexible and easy to be cut or trimmed. (withstands repeated bending)
- Low thermal resistance
- Low heat resistance with flexible Graphite sheet (SSM)
- Low repulsion and easy to keep the product's shape after attaching (SSM)
- Siloxane Free(SSM)
- High dielectric voltage : 17 kVac/mm (SSM)
- RoHS compliant



Figura 4.7: Caratteristiche principali della pellicola *PGS Panasonic*[46].

4.4 Struttura del modulo

Dal dimensionamento preliminare è emerso che sono necessarie 190 celle a sacchetto per raggiungere i requisiti di progetto (vedere tabella 4.1). Per ottenere dei moduli standard e quindi ripetibili, in termini di numero di celle e di dimensioni, si prevede l'utilizzo di 192 celle totali. In tal modo, il pacco batteria risulta costituito da sei moduli in serie. Ogni modulo a sua volta è composto da otto unità collegate anch'esse in serie. La configurazione elettrica del modulo risulta essere 16S-2P ed è visibile in figura 4.8. Il dimensionamento del modulo è strettamente legato all'aspetto termico ed elettrico. In particolare, le piastre di raffreddamento oltre a trasferire calore, fungono da pareti esterne per il montaggio e il serraggio del modulo stesso. Inoltre, il modulo si integra perfettamente con il campo di funzionamento dell'elettronica di controllo. Questo perché, solitamente i BMS slave in commercio non riescono a gestire tensioni nominali maggiori di 60 V, di conseguenza il modulo analizzato può essere costituito al massimo da otto unità. Nella tabella 4.2 vengono riportate le caratteristiche del modulo.

Caratteristiche tecniche	valore	unità
Numero unità nel modulo	8	[-]
Numero celle nel modulo	32	[-]
Configurazione elettrica	16S 2P	[-]
Tensione del modulo	59,2	[Volt]
Capacità del modulo	10	[Ah]

Tabella 4.2: Caratteristiche tecniche del modulo progettato.

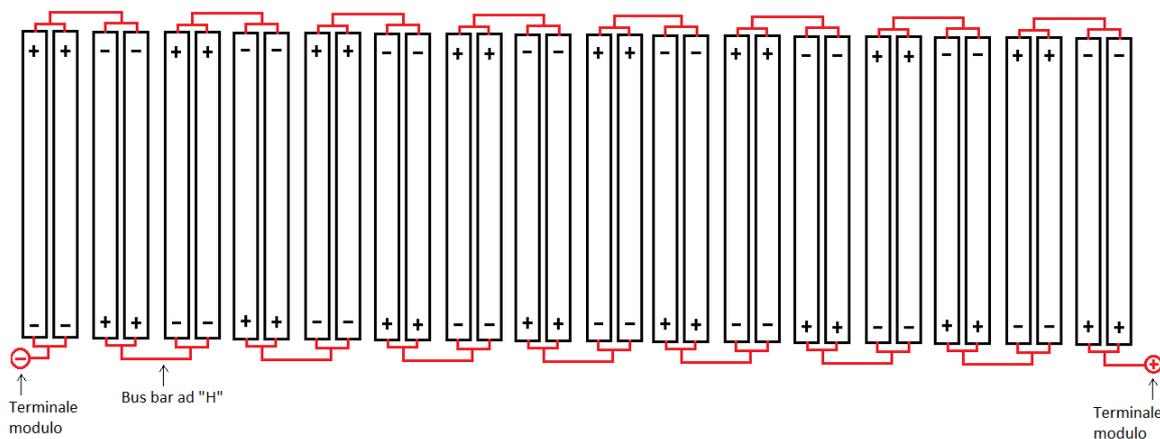


Figura 4.8: Configurazione elettrica delle celle nel modulo

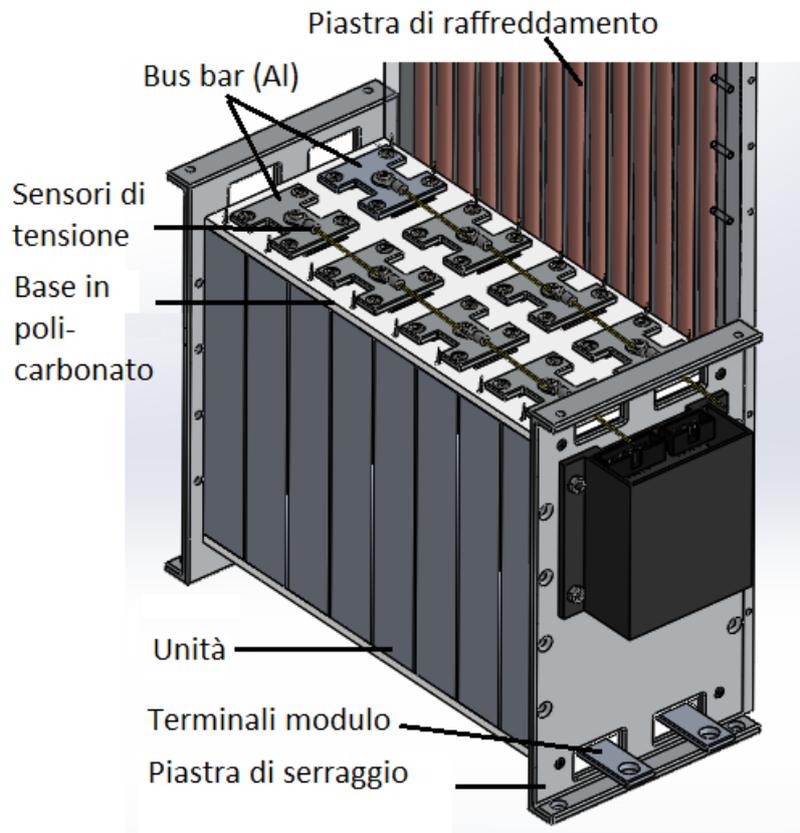


Figura 4.9: Struttura del modulo

In figura 4.9 è possibile osservare il modulo, privo dal lato sinistro, della piastra di raffreddamento, solo per una questione di chiarezza grafica.

4.4.1 Componenti di potenza nel modulo

Nel seguito vengono riportate le caratteristiche e le funzionalità dei componenti di potenza utilizzati nel pacco batteria.

- Collegamento elettrico delle celle.

Nella sezione 2.5, vengono prese in studio diverse soluzioni tecnologiche per la realizzazione delle connessioni elettriche fra le celle stesse e fra i moduli del pacco batteria. In quest'attività, trattandosi della progettazione di un eventuale prototipo di pacco batteria, si preferisce utilizzare dei collegamenti meccanici per realizzare le connessioni elettriche fra le celle. Infatti, le bus bar sono realizzate tramite delle piastrine in alluminio con appositi fori. Questo tipo di connessione è accettabile a livello prototipale, per i bassi costi di realizzazione. Pertanto, si evita l'utilizzo di soluzioni tecnologiche basate sulla saldatura dei terminali. Questo perché, in primo luogo la saldatura richiede la conoscenza di numerosi parametri tecnologici (temperatura di lavoro, tempo utile per realizzare una buona connessione, ecc.) i quali dipendono fortemente dal tipo di materiale dei tab e dell'elettrodo. Inoltre, tutte le tipologie di saldature sono facilmente automatizzabili e quindi più adatte alla produzione di pacchi batteria e non alla realizzazione di singoli prototipi. Lo svantaggio principale di questa scelta, è che non si garantisce una buona omogeneità nel contatto fra la bus bar e il tab della cella. Infatti, a livello sperimentale, si osserva che il contatto, fra le superfici in questione, è di buona qualità in prossimità del serraggio

filettato mentre, allontanandosi da quest'ultimo, il contatto è più debole. Pertanto, si consiglia di utilizzare degli elementi elastici da interporre al di sotto del tab della cella, nella zona centrale (lontana dal collegamento filettato), per incrementare il contatto.

La sezione della bus bar è dimensionata in modo tale da consentire il passaggio della corrente nominale (si considera, a livello preliminare una capacità del conduttore in alluminio, pari a $2 \div 3 \text{ A/mm}^2$).

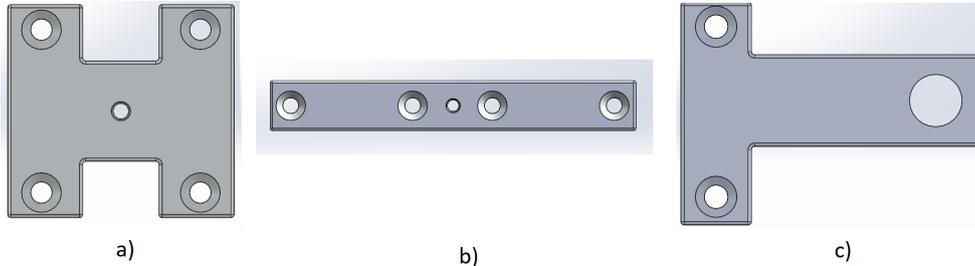


Figura 4.10: Tipologie di bus bar presenti all'interno del modulo.

In figura 4.10, la bus bar (c) viene utilizzata per realizzare il collegamento fra i terminali dei diversi moduli, mentre le altre due tipologie realizzano il collegamento elettrico fra le celle del modulo. Come materiale viene utilizzato l'alluminio per ragioni di buona conducibilità elettrica e per questioni di peso. Queste lamine, dallo spessore di $2 \div 3 \text{ mm}$, vengono posizionate al di sopra della piastra in policarbonato e poi serrate tramite accoppiamento filettato. In figura 4.11, è possibile osservare tale base, la quale presenta delle fessure per far passare i terminali delle celle e i fori per realizzare l'accoppiamento filettato con la rispettiva bus bar.

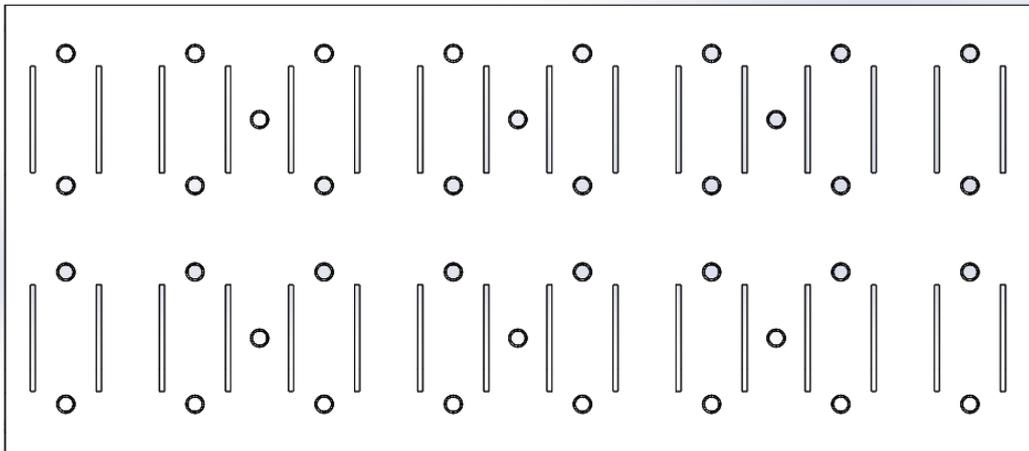


Figura 4.11: Piastra in policarbonato.

Come esempio applicativo si considera la piastra in policarbonato, a ritardo di fiamma, dell'azienda *TUFFAK*, le cui specifiche tecniche vengono riportate nella tabella 4.3. In particolare, si sceglie tale materiale per il fatto che dimostra un buon isolante elettrico, utile ad evitare eventuali cortocircuiti fra i terminali delle celle. Inoltre, risulta essere molto leggero e garantisce una buona protezione alla fiamma. In alternativa alla piastra in policarbonato, è possibile utilizzare specifiche lastre in fibra di vetro, aventi caratteristiche simili.

Caratteristiche tecniche	valore	unità
Densità	1,25	[g/cm^3]
Rigidità dielettrica, in aria @3,1 mm	380	[V/mil]
Resistenza alla fiamma @1,5 mm	UL94V0	[-]
Resistenza alla fiamma @3 mm	UL945VA	[-]

Tabella 4.3: Caratteristiche tecniche della base in policarbonato, *TUFFAK FI*[25].

La piastra in policarbonato, essendo un materiale polimerico, presenta lo svantaggio di non garantire un perfetto serraggio con le bus bar, tramite accoppiamento filettato. Infatti, se tale accoppiamento si basasse esclusivamente sulla resistenza meccanica del filetto ricavato all'interno della base stessa, si andrebbe incontro a degli svitamenti e/o perdite di serraggio. Per evitare questo problema, si prevede l'utilizzo di appositi helicoil, che rinforzano meccanicamente le filettature in cui vengono inserite. In figura 4.12 si osserva l'accoppiamento filettato bus bar-piastra in policarbonato. In questa soluzione si prevede l'utilizzo di Helicoil dell'azienda *Bollhoff*.

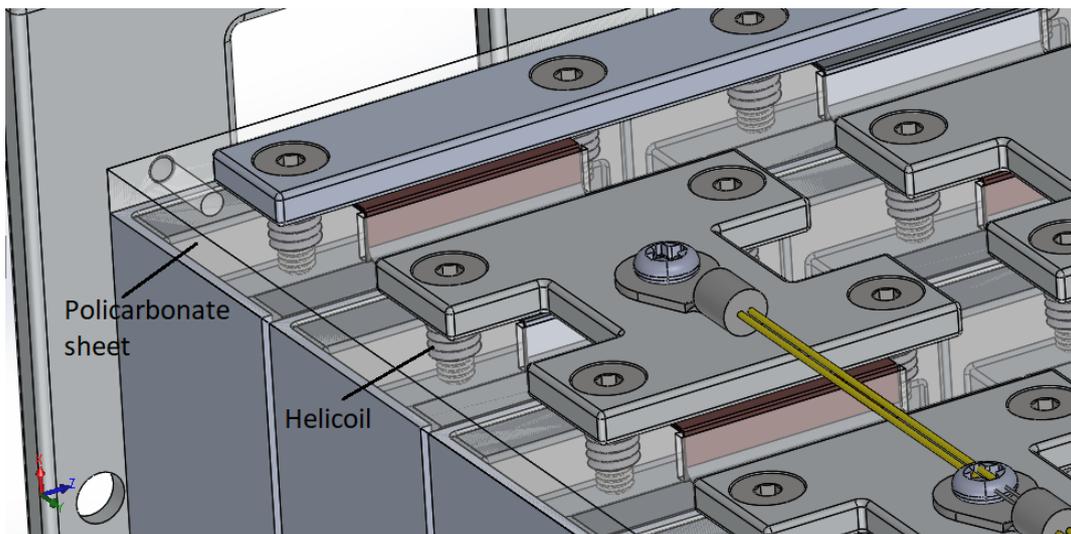


Figura 4.12: Accoppiamento filettato fra la piastra in policarbonato e le bus bar.

- Collegamento elettrico fra i moduli.
Per quanto concerne il collegamento elettrico fra i moduli, in questo progetto si prevede l'utilizzo di appositi connettori *Amphenol* e di capicorda. In figura 4.13, si mette in evidenza l'accoppiamento delle bus bar, che fungono da terminali del modulo, con il loro rispettivo connettore *Amphenol*, modello Radlok.

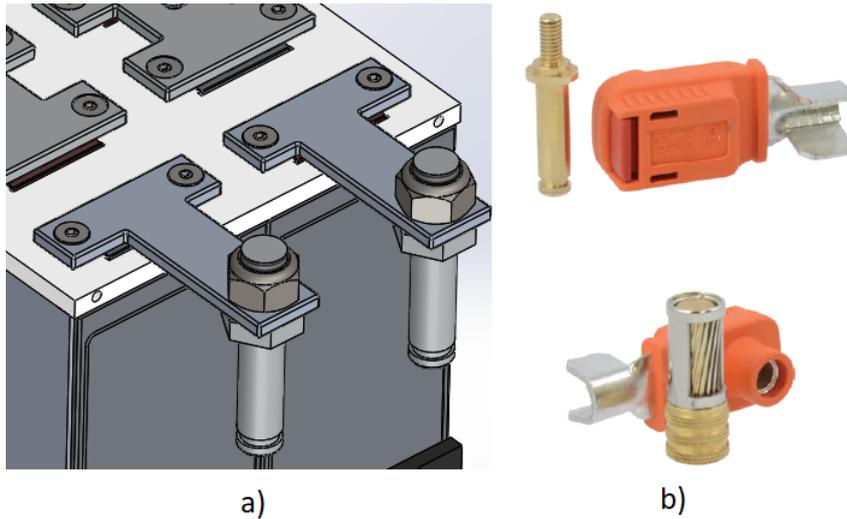


Figura 4.13: (a) Collegamento elettrico dei terminali del pacco ed esempio (b) di due tipologie di connettori Radlok *Amphenol*[8].

Il dimensionamento del connettore è vincolato dal valore di corrente nominale che attraversa il modulo. Dal capitolo 3, si conosce la potenza e la tensione nominale del pacco (50 kW e 350 Volt) pertanto, la corrente nominale ottenuta dal rapporto di queste due grandezze fisiche, risulta essere pari a 143 A. Di conseguenza si sceglie il connettore Radlook avente diametro (pin) pari a 8 mm.

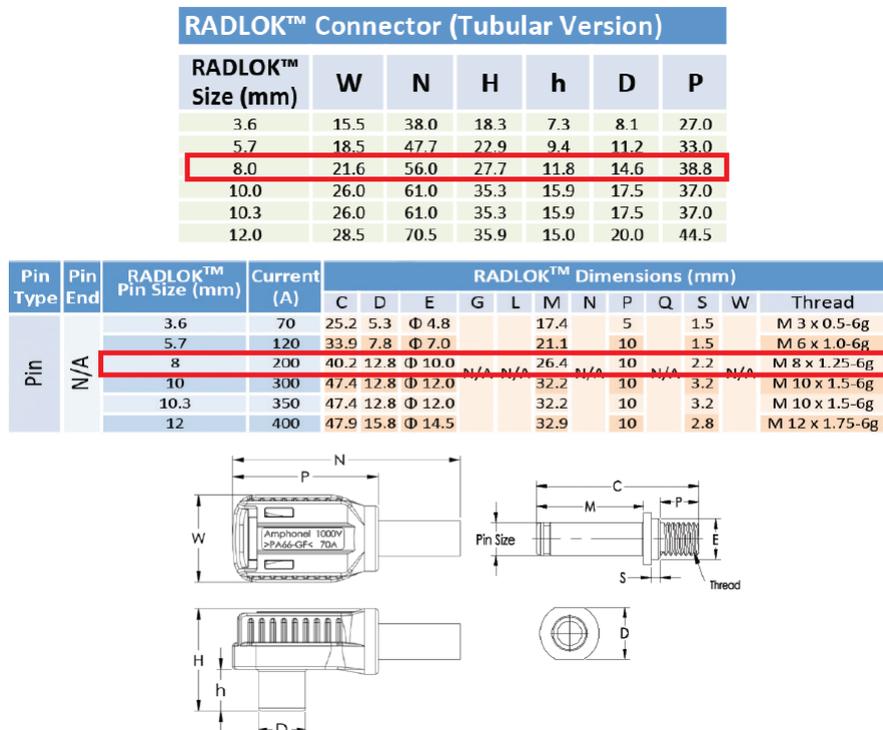
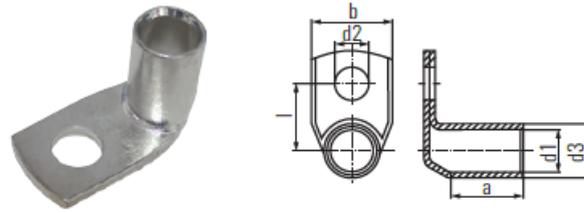


Figura 4.14: Dimensioni del connettore Radlok utilizzato nel pacco batteria[8].

**Tubular cable lugs with 90° angle,
50 - 300 mm², euro-series**



Ordering data

Cross-section mm ²	flat hole M	dimensions in mm						weight 100 pcs./kg	Qty. (pcs.)	Order No.	Tool recommendation			
		d1	d3	d2	b	l	a				PZ PK 6/	PZ PK 10	EPG 45	APG 55 +
50	6	10	14	6.4	20	17.5	18	3.00	100	1495950000				
	8			8.4	20	19.5		3.22	100	1495970000	PZ PK 6/	PZ PK 10	EPG 45	APG 55 +
	10			10.5	20	21.5		3.32	100	1495980000				

Figura 4.15: Dimensioni del capocorda utilizzato, azienda *Weidmuller*[66].

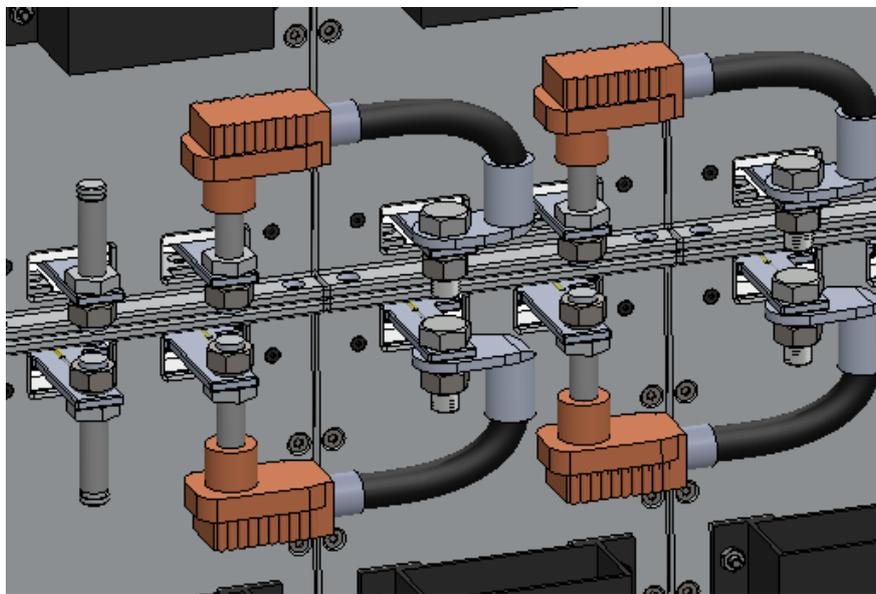


Figura 4.16: Connessione in serie dei sei moduli del pacco batteria.

- Contattore

Il contattore è un dispositivo di manovra, di tipo monostabile. Solitamente, quest'ultima configurazione corrisponde alla posizione di apertura dei contatti principali. Il contattore permette di chiedere ed aprire il circuito elettrico del pacco batteria, durante il funzionamento in condizioni normali. Inoltre, tramite apposite logiche di controllo attuate dal BMS, tale interruttore è capace d'interrompere correnti in condizioni di sovraccarico, proteggendo il circuito. Nella soluzione progettuale presa in analisi si propone l'utilizzo di un contattore dell'azienda *TE connectivity*, per le sue specifiche di funzionamento. Questo contattore proposto è in grado di operare in un range di corrente fra i $201 \div 500$ A, con tensione nominale di 450 Volt (DC).

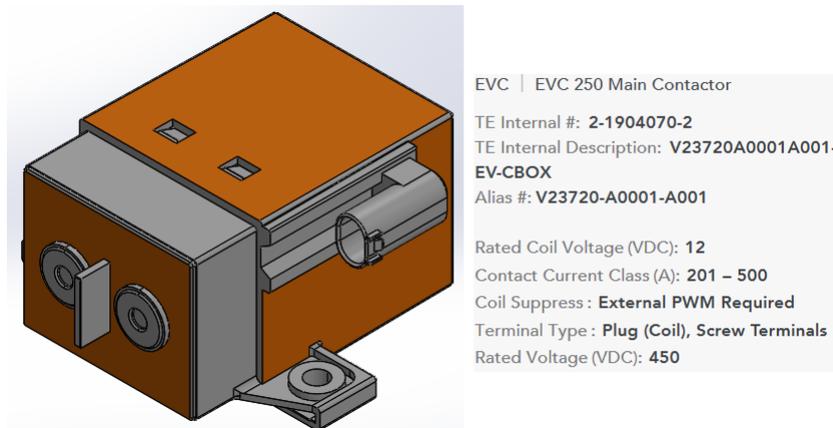


Figura 4.17: Contattore utilizzato nel circuito di potenza, dell'azienda *TE connectivity*[15].

- Fusibile elettrico

Come per qualsiasi impianto elettrico, la conoscenza della corrente di cortocircuito è fondamentale per poter determinare il potere d'interruzione e di chiusura dei dispositivi da installare; inoltre, è utile per verificare la tenuta termica dei cavi e determinare la regolazione dei relè di protezione (in tale studio chiamati anche contattori). In prima approssimazione, viene riportato il seguente ragionamento, legato alla sicurezza dei cavi di potenza. La cella scelta in questa soluzione progettuale, può supportare al massimo 250 A per meno di 10 secondi (vedi figura 4.4) pertanto, il pacco batteria presenta una potenza di picco di 87,5 kW, imposto da tale valore di corrente. La progettazione dei cavi dovrà quindi prevedere il passaggio della corrente nominale (150 A) a regime e l'interruzione delle sovracorrenti, dovuti ad eventuali cortocircuiti, per valori superiori ai 250 A. Quindi, si sceglie di utilizzare un fusibile elettrico, essendoci solo un'unica linea di potenza (i moduli sono tutti in serie fra di loro), che non intervenga durante il passaggio della corrente nominale del pacco. In figura 4.18 viene riportata la caratteristica d'intervento di un ipotetico fusibile, modello L50S150, della ditta *LittelFuse*, utilizzabile in questo circuito.

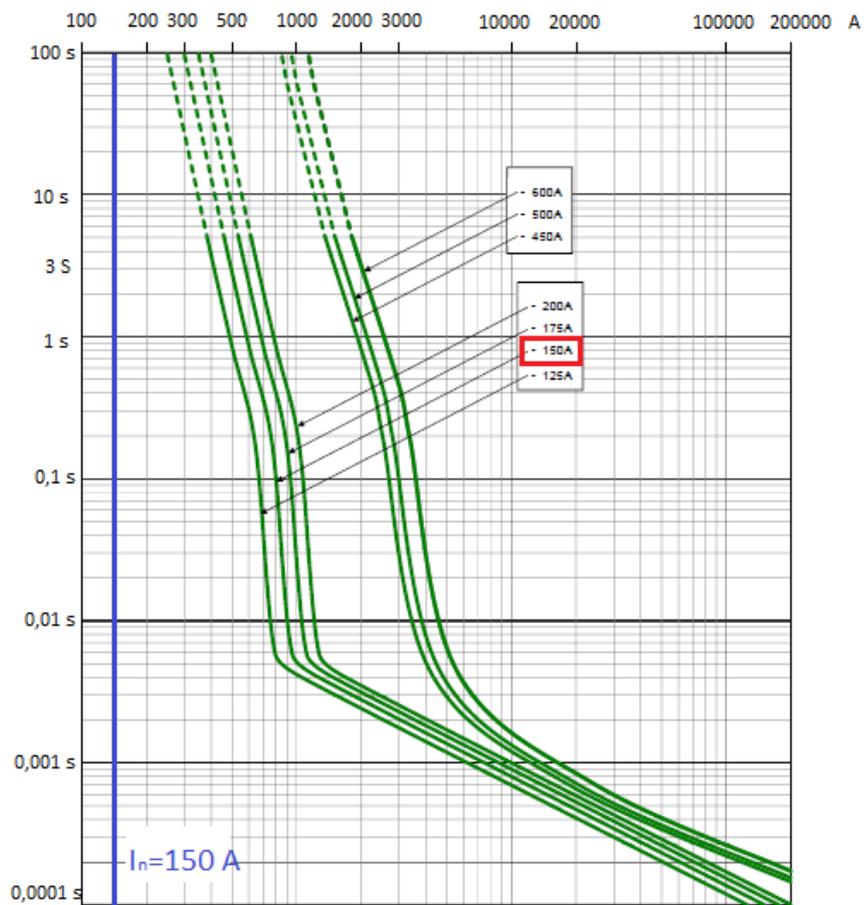
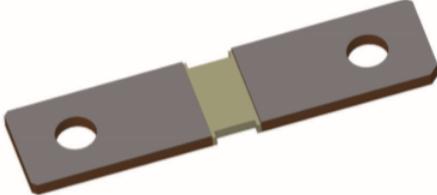


Figura 4.18: Caratteristica tecnica del fusibile scelto[36].

- Misuratore di corrente

Per conoscere il valore di corrente presente sui cavi di potenza è giocoforza utilizzare un sensore di corrente, al fine di salvaguardare l'integrità della linea. Infatti, il misuratore di corrente invia il segnale all'elettronica di controllo, che in caso di sovracorrenti o cortocircuiti mobilita i dispositivi d'immediato intervento. In questa analisi si propone l'utilizzo di un misuratore (shunt), dell'azienda *Isabellenhutte*, visibile in figura 4.19.



Features

- Up to 30 W permanent power
- Continuous current load up to 350 A (0.1 mOhm)
- High pulse power rating
- Max. fastening torque 10 Nm
- Shunt available with tinned or untinned terminals
- Further versions with various dimensions upon request
- AEC-Q200 qualified (automotive version "A")

Applications

- Current sensor for EBM (Electronic Battery Management) in motorcars, trucks, forklifts, hybrid and electric vehicles
- Current sensing in bus bars
- Current sensing in welding equipments



Figura 4.19: Misuratore di corrente, a lamina[33].

In alternativa, possono essere utilizzati anche dei sensori di corrente ad *Effetto Hall*, che grazie a tale principio fisico presentano potenze dissipate minori, durante la misurazione della corrente.

- Connettore di potenza

Il collegamento elettrico di potenza fra il pacco batteria e il veicolo, viene realizzato mediante il connettore di potenza *Amphenol e-power lite*, progettato per le applicazioni ibride ed elettriche. Il connettore utilizzato, oltre ad integrarsi perfettamente con la caratteristica elettrica del pacco, ha una buona resistenza alla fiamma (ULV94V-0) e all'acqua (IP67)[7]. Le dimensioni e la forma del connettore sono visibili in figura 4.20.

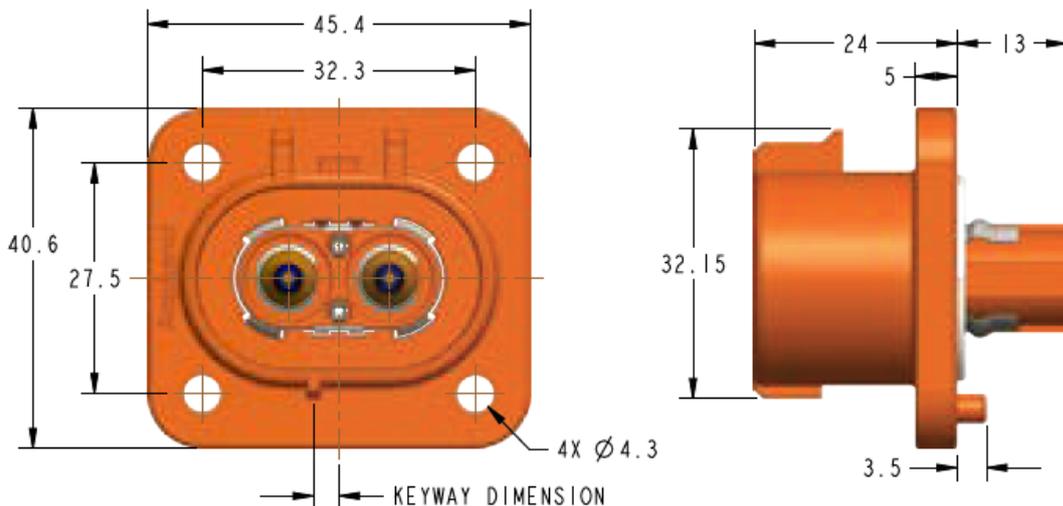


Figura 4.20: Dimensioni e forma del connettore di potenza *Amphenol e-power lite*[7].

4.4.2 Componenti di segnale nel modulo

Il funzionamento e la sicurezza di un pacco batteria sono due aspetti fondamentali per evitare l'insorgere di problematiche legate all'instabilità termica e/o a guasti di natura elettrica. Per far ciò, è giocoforza monitorare costantemente le seguenti grandezze: la temperatura e la tensione di ogni cella. In questa prima soluzione, essendo le macro celle costituite da coppie di celle in parallelo, è sufficiente rilevare la temperatura e la tensione su una sola cella, dato che è fisicamente collegata all'altra. Pertanto, nel modulo ci sono 16 punti di misura della temperatura e di tensione, su 32 celle totali. Queste informazioni provenienti dalle celle, vengono raccolte dal BMS slave presente su ogni modulo, i quali a loro volta comunica con il BMS master. Quest'ultimo dispositivo è pronto ad intervenire con le logiche di controllo impostate, andando a comandare i componenti di potenza e di sicurezza del pacco batteria. In questa soluzione, il case del BMS slave è avvitato a quattro rivetti della piastra di serraggio del modulo. Invece, il BMS master è fissato alla struttura esterna del pacco batteria (vedere la figura 4.32, nel paragrafo 4.5).

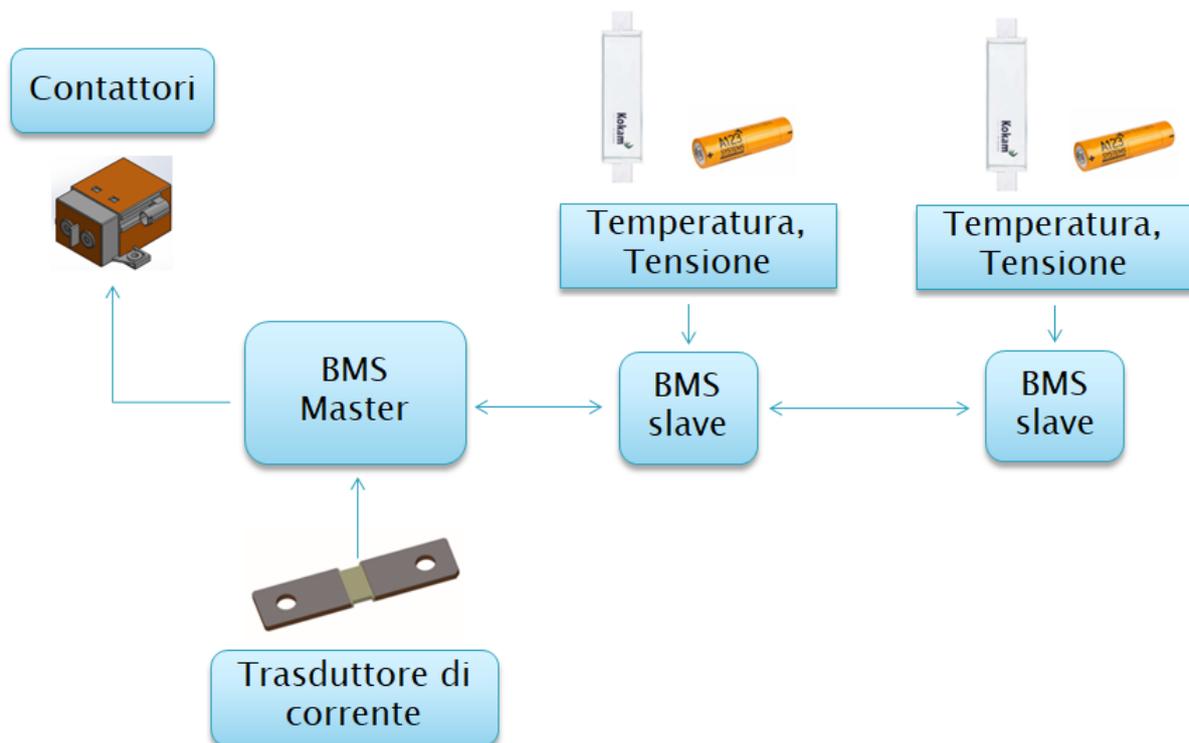


Figura 4.21: Schema logico di massima, della linea di segnale presente in un pacco batteria.

In questo studio, per quanto riguarda il monitoraggio della tensione di cella, si utilizza un sensore ad occhiello, visibile in figura 4.22, connesso alla bus bar e alla piastra polimerica sottostante tramite accoppiamento filettato.

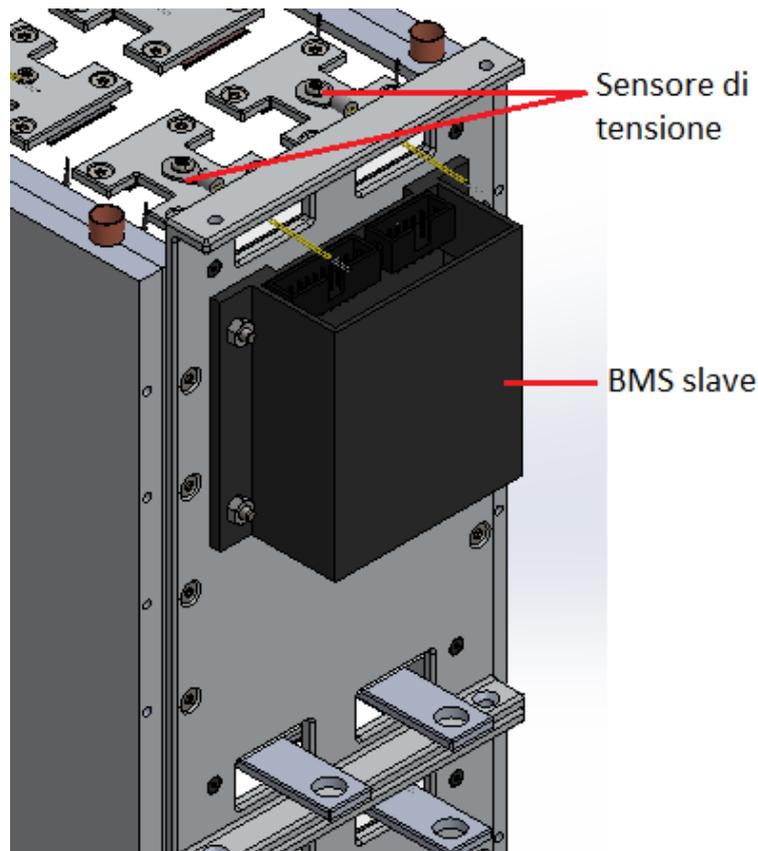


Figura 4.22: Collegamento del sensore di tensione alla bus bar.

Per quanto concerne la misurazione della temperatura delle singole celle, si utilizza un sensore NTC. Questi sensori vengono tipicamente incollati sulla superficie delle celle. Adottando tale metodo, insorge la problematica che la colla applicata sulla testa del sensore possa alterare leggermente la misurazione della temperatura, non essendo il sensore a contatto diretto con la cella. Pertanto, in questa soluzione progettuale si prevede l'utilizzo di un apposito contenitore (case) che contiene il sensore NTC. Questo case viene incollato alla pouch cell, mentre la testa del sensore al suo interno viene mantenuta in contatto con la superficie della cella, tramite un pad elastico di *Poron* (descritto in tabella 4.1). In questo modo la testa del sensore è direttamente a contatto con la cella. In figura 4.23 è visibile il blocco sensore utilizzato in questo studio e il suo fissaggio alla cella. I pin del sensore di temperatura si collegano al BMS slave del modulo, passando da appositi fori presenti sulla piastra in policarbonato.

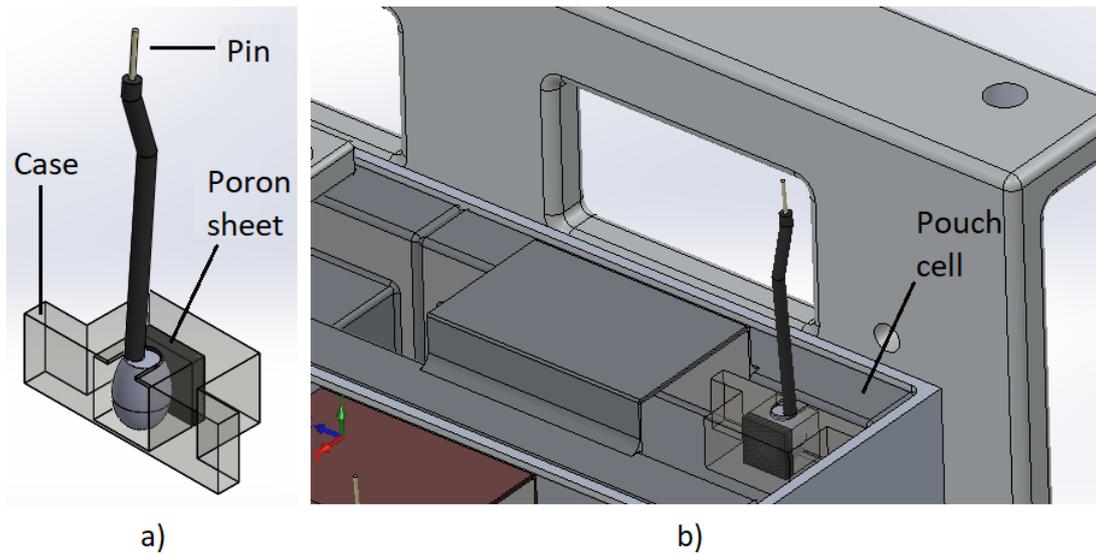


Figura 4.23: Blocco sensore di temperatura NTC (a) e applicazione del sensore sulla pouch cell (b).

Il collegamento elettrico di segnale fra il pacco batteria e il veicolo, viene realizzato mediante il connettore di potenza *Amphenol AHDM06-24-31ST*, progettato per le applicazioni ibride ed elettriche. Il connettore utilizzato, funziona per correnti di segnale pari a 13 A, ha una buona resistenza all'acqua (IP67) e può lavorare in un range di temperature adotto al tipo di applicazione ($-55^{\circ}\text{C} \div 125^{\circ}\text{C}$)[6]. Le dimensioni e la forma del connettore sono visibili in figura 4.24.

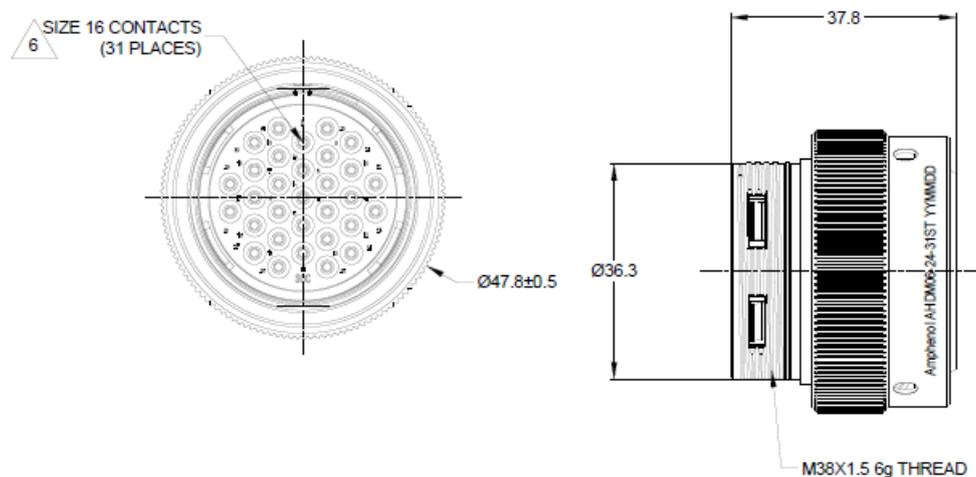


Figura 4.24: Forma e dimensioni del connettore di segnale *Amphenol AHDM06-24-31ST*[6].

4.4.3 Sistema di raffreddamento del modulo

L'aspetto termico è uno dei punti focali, in termini di funzionamento e di sicurezza, dei pacchi batteria. Nel capitolo 2.6, vengono esposte differenti soluzioni tecnologiche legate ai sistemi di raffreddamento delle celle e dei moduli. In questo progetto si propone l'utilizzo di piastre di raffreddamento (cooling plate) a liquido (acqua e glicole) interposte fra i moduli. Tale scelta viene giustificata dal fatto che, il raffreddamento a liquido garantisce nel tempo un buon raffreddamento del pacco ed inoltre, risulta essere una soluzione commercialmente più facile da realizzare. Nel mercato odierno, esistono anche delle soluzioni "ad hoc" che sfruttano un raffreddamento ad aria (ottenuto durante il movimento della moto). In questo caso però, è giocoforza progettare un case del pacco batteria in grado di far passare l'aria al suo interno, evitando l'ingresso di liquidi-impurità e sostanze inquinanti che potrebbero mettere in corto circuito il pacco e ostruire i canali di passaggio. Inoltre, con il raffreddamento ad aria è necessario garantire un buon isolamento elettrico del pacco, in particolare nelle sue zone aperte, in cui entra l'aria. Per tutte queste problematiche progettuali si è preferito adottare un impianto di raffreddamento a liquido.

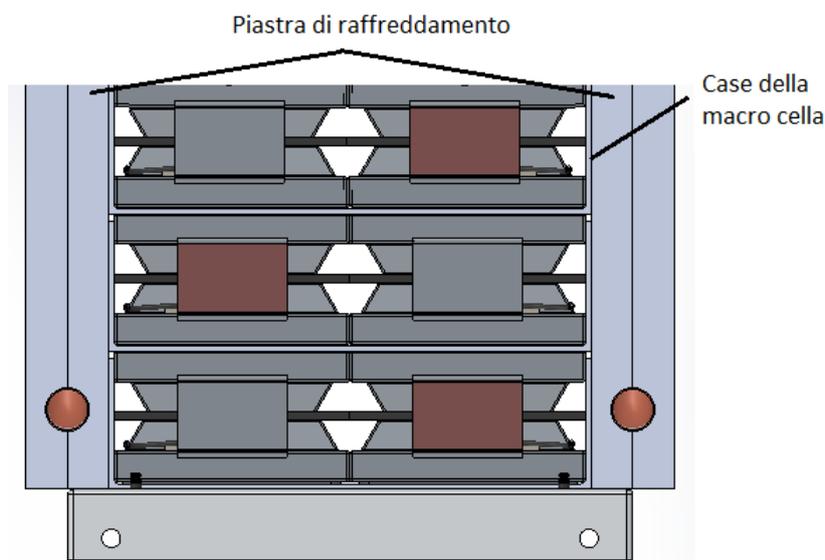


Figura 4.25: Parte iniziale del modulo in cui sono visibili le piastre di raffreddamento.

A livello di macro cella, come si osserva in figura 4.25, il case di ogni unità è a contatto con le pareti delle piastre di raffreddamento. In questo modo, grazie alla forma a "C", si riesce a trasferire il calore dalle celle al cooling plate. Inoltre, a livello di moduli, le piastre di raffreddamento agevolano il posizionamento delle unità durante il processo di montaggio e assicurano un perfetto serraggio dei moduli, grazie ad appositi accoppiamenti filettati visibili in figura 4.26. Infatti, come accennato nel paragrafo 4.3, risulta fondamentale lasciare un gap fra un'unità e quella successiva (visibile in figura 4.25). Questi spazi sono destinati ad annullarsi, per garantire un perfetto serraggio del modulo, al fine di evitare movimenti delle unità, causati da vibrazioni ed eventuali urti. Infine, la singola piastra di raffreddamento viene condivisa da quattro moduli, due per ogni lato.

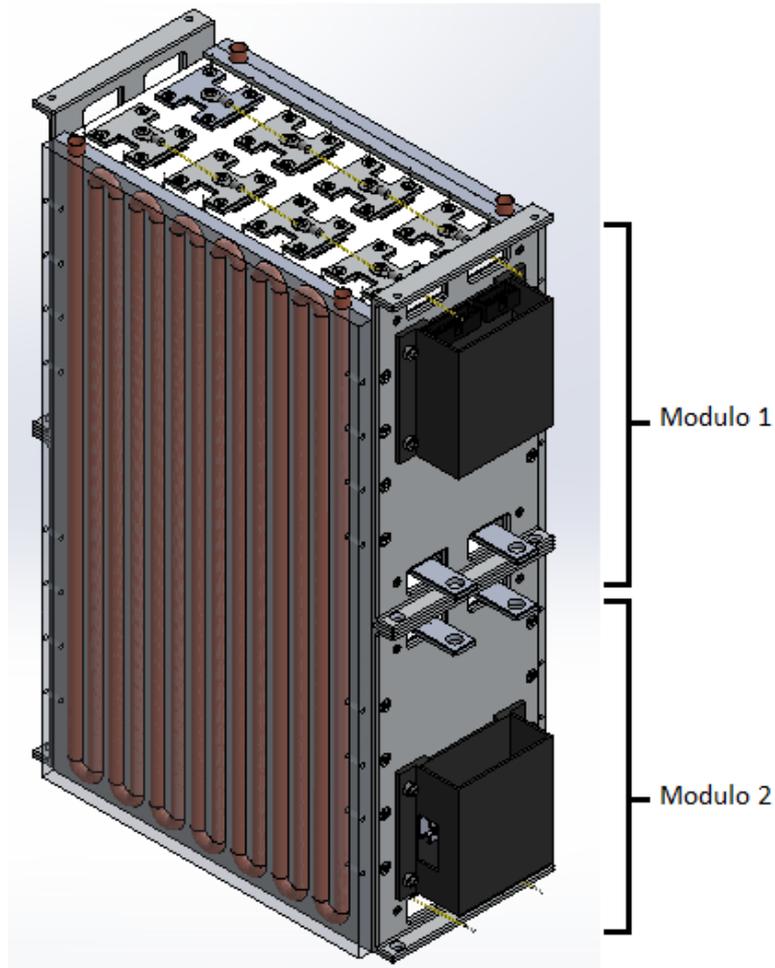


Figura 4.26: Blocco finale costituito da due moduli, raffreddati ai lati dalle piastre di raffreddamento.

Dimensionamento preliminare della piastra di raffreddamento

Viene nel seguito riportato il dimensionamento preliminare delle piastre di raffreddamento. Innanzitutto, il sistema di raffreddamento deve essere in grado di integrarsi perfettamente con gli attuali impianti presenti nei veicoli. Le portate che solitamente si trovano in quest'impianti, si aggirano fra i $6 \div 10$ l/min. Pertanto, in quest'analisi, si assume come portata principale 8 l/min. Quest'ultima si distribuisce nelle quattro piastre di raffreddamento. Il parametro di controllo, in tale dimensionamento di massima, è il numero di *Reynolds* del liquido refrigerante all'interno della piastra. Infatti, si vuole avere un regime turbolento all'interno della serpentina, per favorire lo scambio termico. Si riportano le considerazioni termodinamiche e progettuali assunte in questo iter:

- il liquido refrigerante considerato è una miscela di acqua e glicole etilenico al 30%;
- le proprietà termodinamiche come la densità e il calore specifico (ρ, C_p) del liquido refrigerante sono considerate medie e costanti e quindi indipendenti dalla temperatura del medesimo liquido;
- si considera solo il calore dissipato dalle celle per *Effetto Joule*;
- il valore della resistenza elettrica delle celle è un valore medio e costante;

- il gradiente termico iniziale fra le celle e il liquido è considerato pari a 10 K ed è considerato pressoché costante nel tempo;
- si utilizza il *Primo Principio della termodinamica per i sistemi aperti*, in regime stazionario. Si trascurano le variazioni dell'energia cinetica e gravitazionale;
- nel sistema, non essendoci appositi organi, la potenza dovuta al lavoro meccanico è nulla e si trascurano gli attriti.

La logica utilizzata in questo dimensionamento preliminare è la seguente: nota la portata del liquido refrigerante all'interno della singola piastra, si calcola la velocità del liquido all'interno della serpentina, andando a variare il diametro di quest'ultima. In base ai risultati ottenuti, si sceglie la dimensione della serpentina, che garantisca il moto turbolento all'interno della serpentina. Infine, tramite il *Primo Principio della termodinamica per i sistemi aperti* (eq. 4.8), si ricava la potenza termica estratta dalla singola piastra di raffreddamento. Qui sotto vengono riportate le equazioni utilizzate e i risultati ottenuti:

$$Potenza\ termica\ estratta = Portata\ massica * C_p * \Delta T \quad (4.8)$$

$$Area\ tubo = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (4.9)$$

$$Velocità\ liquido\ refrigerante = \frac{Portata\ massica}{Area\ tubo} \quad (4.10)$$

$$Re\ liquido\ refrigerante = \frac{d * V_{media}}{D_v} \quad (4.11)$$

Grandezze fisiche	valore	unità
Portata volumetrica	2	[l/min]
Area tubo	50,3	[mm ²]
Velocità liquido refrigerante	0,66	[m/s]
Diffusività cinematica del liquido refrigerante (D_v)	$9 * 10^{-8}$	[m ² /s]
Reynolds	44200	[-]
Potenza estratta dalla singola piastra di raffreddamento	1,28	[kW]
Potenza estratta dalle quattro piastre di raffreddamento	5,14	[kW]

Tabella 4.4: Tabella riassuntiva del dimensionamento termico.

I risultati presenti nella tabella 4.4, fanno riferimento ad una serpentina di raffreddamento, interna alla piastra, avente diametro pari a 8 mm. Con tale valore di diametro, si ottiene un buon compromesso, sia in termini d'ingombri sia in termini di velocità del fluido refrigerante. Infatti, viene verificato il raggiungimento del moto turbolento nella serpentina di raffreddamento ($Re > 4300$).

Calcolo di verifica

Dal punto di vista termico, è giocoforza verificare che la quantità di potenza termica estratta dal sistema di raffreddamento, risulti maggiore rispetto a quella dissipata globalmente dalle celle. Si ricorda, dalle considerazioni prese in questo studio, che la resistenza elettrica delle celle è un valore medio e indipendente dalle altre variabili. Pertanto, si ricava il calore dissipato dalle celle, durante il loro funzionamento, dall'equazione dell' *Effetto Joule*, qui di seguito riportata:

$$\text{Calore dissipato} = R I_n^2 \quad (4.12)$$

La corrente massima continuativa che attraversa la cella in questione, è pari alla metà di quella totale del pacco batteria (143 A); questo perché, essendo l'unità costituita da due celle in parallelo, si ipotizza fra queste ultime, una distribuzione simmetrica del flusso di corrente. Da questo calcolo di verifica, si ricava la potenza termica dissipata dalle celle a contatto con il singolo cooling plate. Si considera la condizione peggiore, ovvero si analizzano le piastre di raffreddamento locate al centro del pacco, circondata su entrambi i lati dai moduli. Dalla figura 4.27, si osserva che ognuna delle due piastre centrali raffredda contemporaneamente quattro moduli (due per ogni lato). Per il fatto che vi sono anche due cooling plate sui lati esterni del pacco allora, si ipotizza che le piastre centrali raffreddino solo la prima metà di ogni modulo circostante. Ciò significa che ogni piastra centrale scambia "virtualmente" calore solo con due moduli "interi".

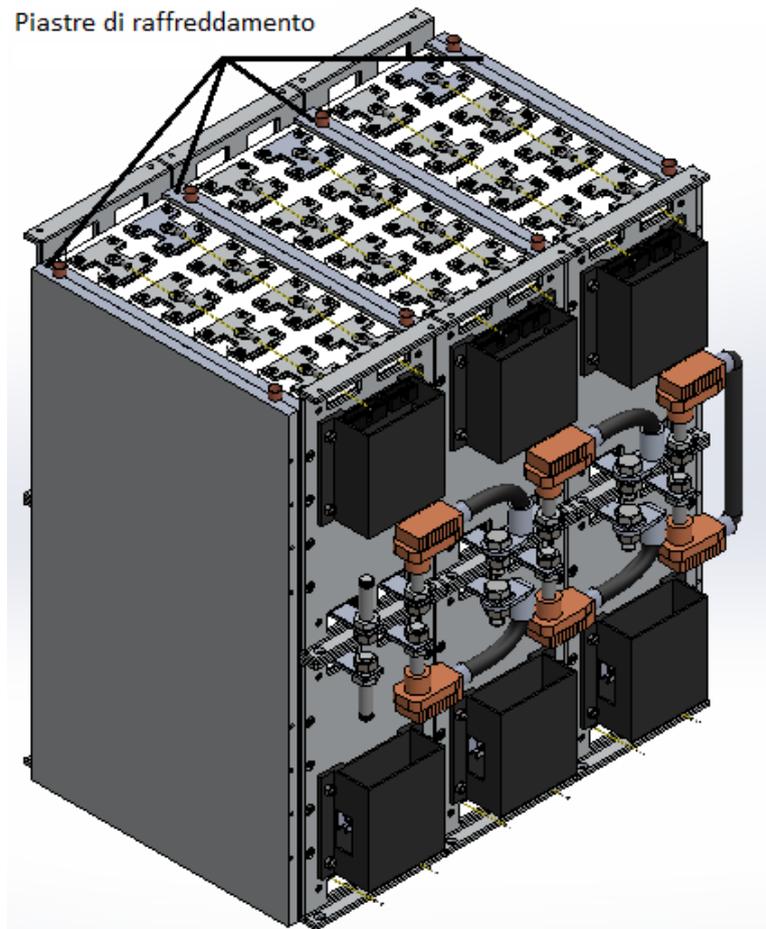


Figura 4.27: Layout del pacco batteria.

Grandezze fisiche	valore	unità
Numero celle in un modulo	32	[-]
Resistenza elettrica della cella	3	[mΩ]
Corrente massima continuativa alla cella	75	[A]
Potenza dissipata dalla cella	16,9	[W]
Potenza dissipata da un modulo	540	[W]
Potenza dissipata dai moduli a contatto con il cooling plate	1,080	[kW]

Tabella 4.5: Risultati ottenuti dal calcolo di verifica.

Dalle tabelle 4.4 e 4.5 si osserva che la piastra di raffreddamento, secondo il dimensionamento adottato, può scambiare termicamente una potenza pari a 1,28 kW. Tale valore risulta essere superiore al calore dissipato dai moduli virtualmente a contatto con la piastra stessa (1,08 kW). Pertanto, questo dimensionamento preliminare è verificato, ma necessita di opportune e future analisi termiche per confermare e/o migliorare tale sistema di raffreddamento.

4.4.4 Isolamento elettrico

Il pacco batteria, per questioni di sicurezza, deve garantire un alto livello d'isolamento elettrico verso l'esterno. Pertanto, è giocoforza individuare e isolare i componenti interni ad alta tensione. Nel caso delle pouch cell, le aziende costruttrici consigliano di isolare elettricamente le parti di tab libere e i bordi della cella. Pertanto, in questa soluzione si propone l'utilizzo del *Kapton*, un nastro elettricamente isolante, da applicare lungo i bordi di ogni singola pouch cell. Inoltre, essendoci contatto fra la superficie della cella e il case in alluminio (dell'unità), quest'ultimo deve essere rivestito internamente con una pellicola aderente, isolante elettricamente, in modo tale da mettere in sicurezza i dispositivi di raffreddamento del modulo da eventuali contatti elettrici con le celle. A livello commerciale, si consiglia l'utilizzo della pellicola *Nomex 410*, le cui specifiche tecniche sono descritte con precisione nel paragrafo 5.2.5. In figura 4.28 (b) viene riportato un esempio di isolamento elettrico mediante il nastro *Kapton*. In tabella 4.6 vengono riportate alcune specifiche tecniche di tale nastro.

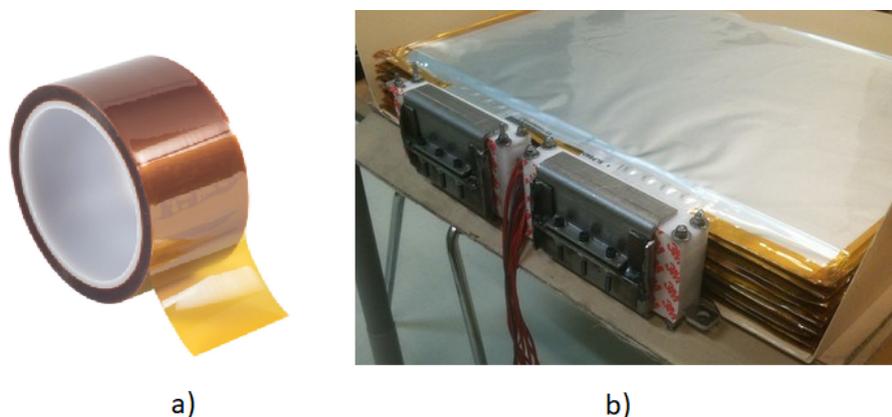


Figura 4.28: Applicazione del nastro (a) *Kapton*[32] su pouch cell (b)[52].

Proprietà fisiche	valore	unità
Spessore	25 ÷ 125	[μm]
Densità	1,42	[g/cm^3]
Rigidità dielettrica	3900 ÷ 7700	[V/mil]
Temperatura massima limite	260	[$^{\circ} C$]

Tabella 4.6: Specifiche tecniche del nastro *Kapton*[34].

Per quanto concerne la protezione da cortocircuiti interni, la progettazione del modulo prende in considerazione anche tale aspetto. In quest'analisi, dalle analisi effettuate nello *Stato dell'Arte*, per via della tensione in gioco, si considera una distanza minima di pericolo, fra due componenti di potenza (bus bar), pari a 5 mm. La zona di maggiore interesse è quella in cui si hanno le bus bar, di due diversi moduli, confinanti. In figura 4.29, si osserva che grazie ad una corretta progettazione delle piastre in policarbonato, vi è una notevole distanza verticale (12 mm) fra le bus bar del modulo sottostante e quello sovrastante, idonea per evitare cortocircuiti interni. Oltretutto, sempre legato a tale discorso, la piastra di serraggio del modulo, presenta una zona forata, in grado di far passare in sicurezza i terminali del modulo. In questo modo si evitano eventuali cortocircuiti fra i terminali e il case. Si consiglia però di rivestire i terminali con il nastro *Kapton*, per garantire un perfetto isolamento elettrico nel tempo. Questo perché, i terminali nel tempo, potrebbero inflettersi a causa del calore e pertanto avvicinarsi pericolosamente al case del modulo.

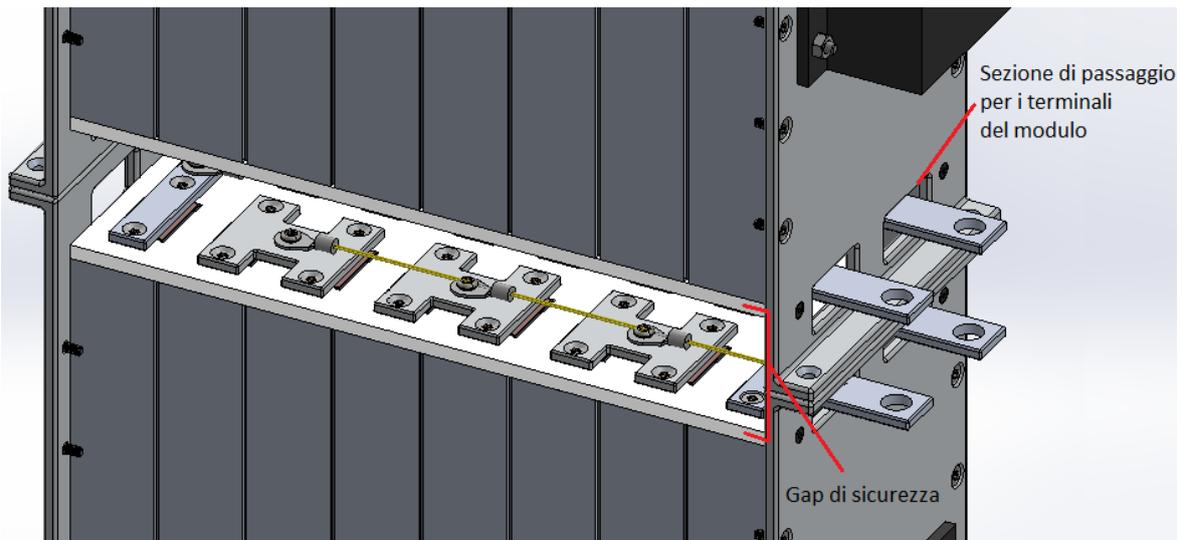


Figura 4.29: Distanza di sicurezza presente fra due moduli sovrastanti.

4.4.5 Serraggio del modulo

I moduli del pacco batteria, essendo montati a bordo di veicoli, sono soggetti a forti vibrazioni, che nel tempo potrebbero generare la presenza di giochi ed eventuali danni. Un corretto serraggio delle celle all'interno dei moduli, riduce tale problematica. Pertanto, nella progettazione del modulo è necessario prevedere, fra un'unità e l'altra, la presenza di un piccolo gap, andando a dimensionare in modo idoneo il case dell'unità stessa (vedi paragrafo 4.3). Questi spazi, vengono poi annullati in fase di montaggio, tramite il fissaggio della piastra di serraggio al cooling plate. In figura 4.30, viene riportata la piastra di serraggio utilizzata in questo progetto, la quale presenta dei rivetti filettati, atti ad sostenere il case del BMS slave.

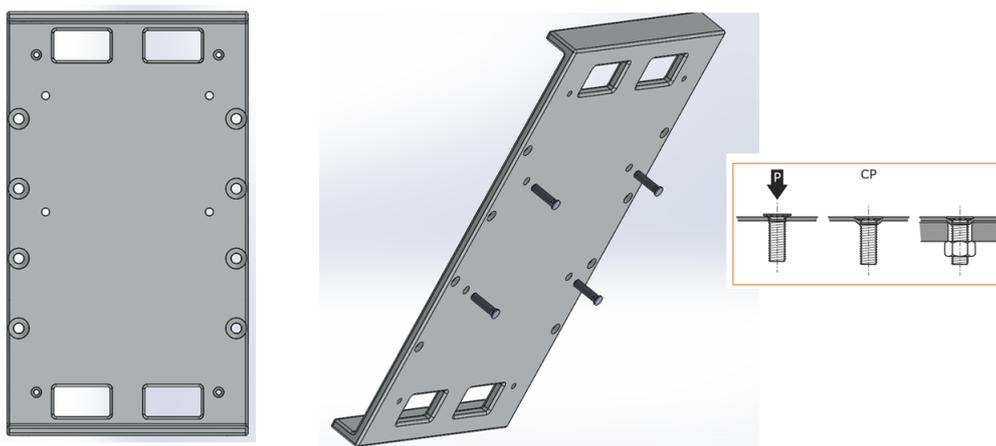


Figura 4.30: Particolare della piastra di serraggio del modulo, con inserti filettati utilizzati per fissare il BMS slave, al modulo.

In figura 4.31, viene messo in evidenza il serraggio del modulo: di notevole importanza è il dimensionamento della lunghezza longitudinale della piastra di raffreddamento e della base polimerica (in figura non visibile per questioni di chiarezza grafica). Infatti, queste ultime devono avere una lunghezza che permetta, in fase di montaggio, di serrare fra di loro le unità, azzerando i gap presenti.

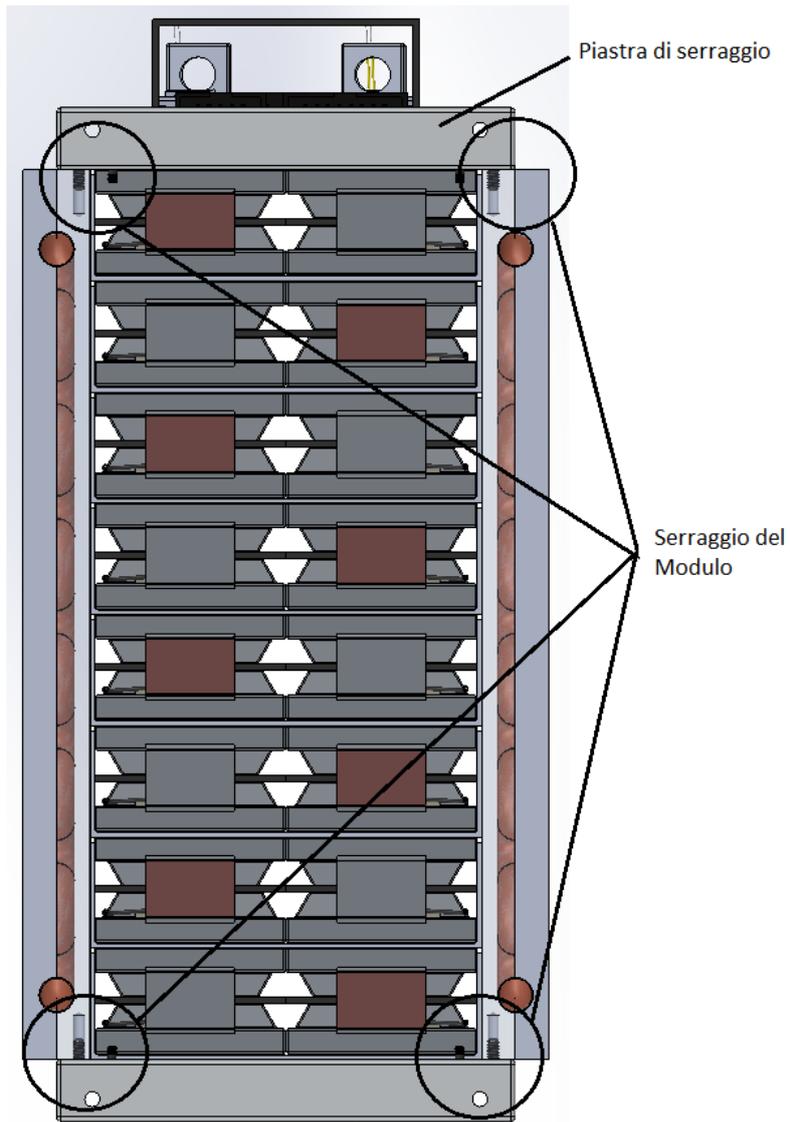


Figura 4.31: Serraggio del modulo.

4.5 Pacco batteria

Nel seguito viene riportato il pacco batteria nel suo insieme, si precisa che la struttura esterna di quest'ultimo, rappresenta solo una configurazione preliminare e necessita pertanto, di una futura analisi progettuale.

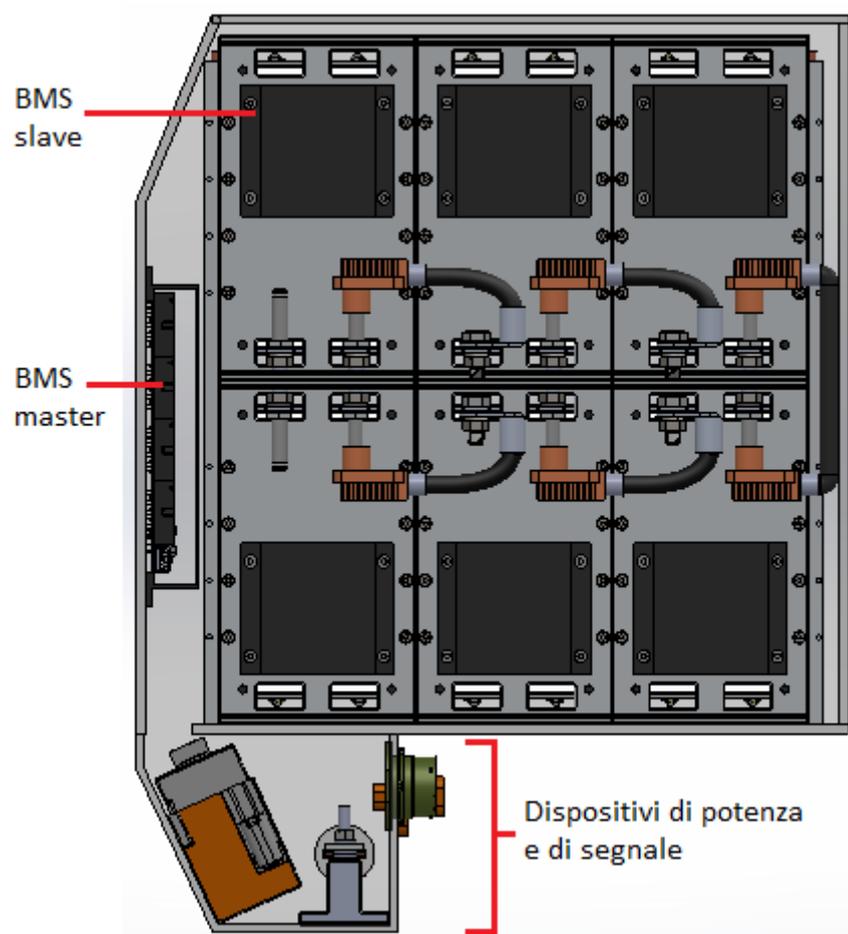


Figura 4.32: Vista frontale del pacco batteria.

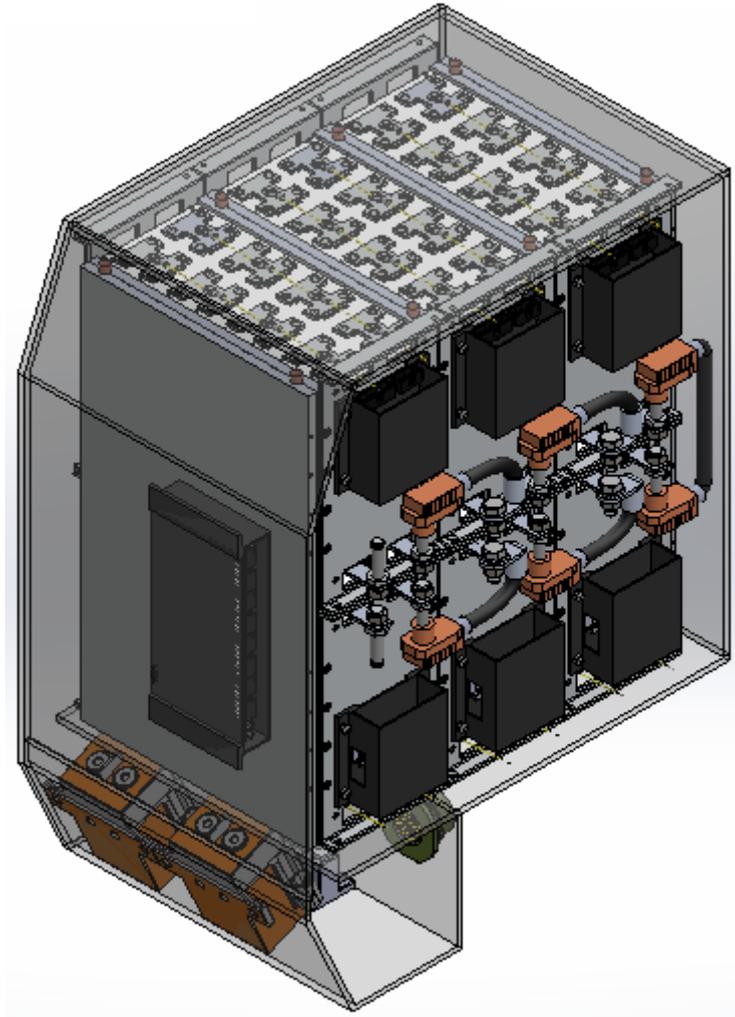


Figura 4.33: Vista in assonometria del pacco batteria.

Capitolo 5

Seconda soluzione progettuale

In questa seconda attività di progettazione, si propone l'utilizzo, all'interno del pacco batteria, di celle cilindriche, anch'esse molto diffuse per questo tipo di applicazione. Come affrontato nel capitolo 2, generalmente la cella cilindrica è caratterizzata da densità di energia elevate, con lo svantaggio di possedere capacità inferiori rispetto alle altre tipologie. Viene seguito il medesimo iter progettuale adottato nella prima soluzione.

5.1 Tipo di cella adottata

Il dimensionamento elettrico di massima (descritto nel paragrafo 4.1) viene applicato a celle cilindriche appartenenti a diverse aziende presenti in questo settore. La cella *Sony*, modello US18650-VTC5A, soddisfa i parametri progettuali del pacco, evitando eccessivi sovradimensionamenti. In figura 5.1 si riportata la tabella contenente i risultati del dimensionamento. Come per la prima soluzione progettuale, la logica adottata è la seguente: si determina il numero di celle imposte dalla potenza nominale del pacco (vedi equazione 4.4), si calcola il valore di energia raggiunto con tale numero (settima colonna della tabella) e si verifica che sia soddisfatto tale parametro. Nel caso delle celle dell'azienda *A123*, si hanno scostamenti energetici negativi quindi, il numero totale delle celle da considerare sarà quello imposto dal parametro energetico (sesta colonna, vedi equazione 4.3).

Model	type	N celle serie	N celle parallelo	N celle tot, potenza	N celle energia	Energia pacco raggiunta [kWh]	Variazione energetica rispetto progetto [kWh]	Volume tot celle [l]	Peso tot celle [kg]
A123	ANR26650-m1B	107	3	321	364	2,6	-0,4	12	28
	APR18650-m1A	107	5	535	827	1,9	-1,1	14	32
	AHR32113M1-Ultra-B	107	1	107	206	1,6	-1,4	19	42
Panasonic	NCR 18650 PF	98	25	2450	302	24,3	21,3	43	118
	NCR 18650 PD	95	15	1425	280	15,3	12,3	25	63
	UR 18650 AA	98	32	3136	387	24,3	21,3	55	135
	UR 18650 RX	98	35	3430	408	25,3	22,3	60	163
	UR 18650 ZTA	95	24	2280	279	24,6	21,6	40	112
	NCR 18650 B	98	22	2156	260	24,9	21,9	37	102
	UR 18650 A	98	32	3136	388	24,3	21,3	55	138
	NCR 20700 A	98	5	490	261	5,6	2,6	11	29
LG Chem	NCR 20700 B	98	8	784	197	12,0	9,0	18	49
	INR 18650 HG2	98	8	784	278	8,5	5,5	13	37
	INR 18650 M36T	97	28	2716	240	34,0	31,0	48	131
	INR 18650 F1L	97	29	2813	247	34,2	31,2	48	138
	INR 18650 MG1	97	15	1455	291	15,0	12,0	25	67
	INR 21700 M50	97	20	1940	165	35,3	32,3	48	132
	20650 M42	97	10	970	197	14,8	11,8	20	56
	18650HG2	98	8	784	261	9,0	6,0	13	38
Samsung	INR 20650 HG6	98	5	490	278	5,3	2,3	11	28
	21700 M50	97	20	1940	166	35,2	32,2	48	132
	INR 18659 33G	98	22	2156	265	24,4	21,4	37	103
	INR 18659 33Q	98	10	980	275	10,7	7,7	17	45
	INR 18650 13L	98	8	784	642	3,7	0,7	13	34
	INR18650-15L	77	8	616	435	4,3	1,3	10	26
	INR 18650 - 30Q	98	10	980	278	10,6	7,6	17	47
	INR18650-25R	98	8	784	334	7,1	4,1	13	35
Sony	INR21700-40T	98	4	392	209	5,6	2,6	10	27
	INR 21700 30T	98	6	588	278	6,4	3,4	15	41
	US 18650 VTC5A	98	5	490	321	4,6	1,6	8	23
Molicel	US 18650 VTC6	98	8	784	267	8,8	5,8	14	36
	US 26650 VT	95	6	570	312	5,5	2,5	20	48
Molicel	INR 21700 P42A	98	4	392	187	6,3	3,3	10	27
	IHR18650C	98	8	784	417	5,6	2,6	14	35

Figura 5.1: Risultati del dimensionamento elettrico di diverse celle cilindriche.

Come visto nella prima soluzione progettuale (paragrafo 4.2), il discorso legato ai fusibili elettrici, influenza notevolmente la disposizione delle celle e quindi i volumi e gli spazi occupati all'interno del pacco batteria. Il ragionamento è sempre lo stesso, cioè si vuole evitare l'utilizzo di N fusibili per le N linee di parallelo, preferendo l'utilizzo di un solo fusibile per l'unica linea di potenza. Fisicamente, in questo caso non si realizza una macro-cella (unità) a parte, costituita dalle N celle in parallelo. Questo perché, a causa della bassa capacità nominale delle singole celle, servirebbero molte più celle cilindriche in parallelo rispetto alla soluzione precedente; ciò comporterebbe a tempi di assemblaggio maggiori. In questa soluzione, si preferisce applicare il concetto di unità durante la fase di montaggio. Infatti, si prevede di disporre le celle cilindriche nelle loro sedi, con la logica di realizzare un'unica linea di potenza, nella quale vi sono in serie più gruppi di celle in parallelo. In riferimento alla cella scelta, ogni gruppo è costituito da 5 celle in parallelo. In figura 5.2, viene riportato un esempio di configurazione delle celle, dove si realizza un'unica linea di potenza. Infatti, le celle vengono disposte negli appositi holders colorati, in modo tale da creare delle righe di celle in parallelo fra loro. La linea si realizza collegando in serie tutti questi gruppi di celle, mediante bus bar.

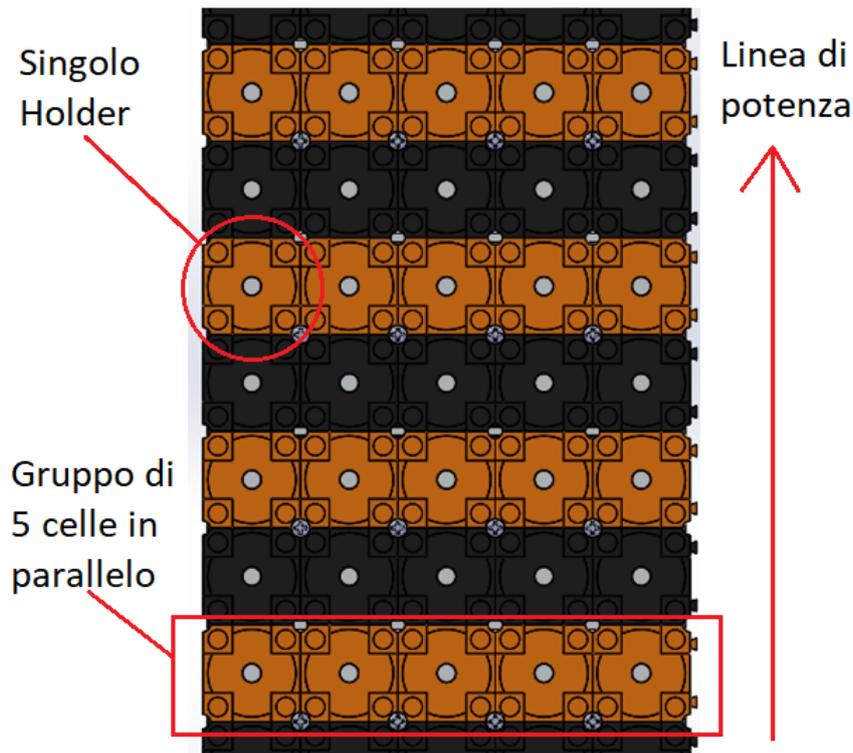


Figura 5.2: Esempio di disposizione delle celle cilindriche, atte a realizzare un'unica linea di potenza.

1. General

1.1 Name and Code

1.1.1 Model Number	: US18650VTC5A
1.1.2 Cell Name	: US18650VTC5A
1.1.3 Sony Code	: 49934720

1.2 Cell Shape and Weight

1.2.1 Cell Shape	: Cylindrical
1.2.2 Size (with plastic tube)	: Diameter 18.50mm max Length 65.20mm max
1.2.3 Weight	: 47.1g Average

1.3 Safety Regulation

- : Sony acquired UL1642.
- : Sony acquired IEC62133 2nd edition.
- : Sony acquired Korean regulation.
- : Sony acquired Taiwan Commodity Inspection Act(CNS 15364)

2. Performance

Nominal Capacity at 0.2ItA	2600mAh 9.36Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Rated Capacity at 0.2ItA	2500mAh 9.0Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Capacity at 1ItA (typ.)	2524mAh 9.05Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Capacity at 10A (typ.)	2516mAh 8.66Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Nominal Voltage	3.6V	
Internal Impedance	10mΩ Typ.	measured by AC1kHz
Cycle Performance	70% Min. of Initial capacity at 500 cycles	10A discharge

* Standard Charge Condition

Charge Method	: constant current constant voltage
Charge Up Voltage	: 4.2± 0.05V
Charge Current	: 2.5A
Charge Time	: 2.5h
Ambient Temperature	: 23°C

Figura 5.3: Caratteristiche tecniche della cella *Sony*, modello US18650-VTC5A[17].

5.2 Struttura interna del modulo

In questa soluzione progettuale, per rispettare il raggiungimento dei requisiti di progetto, è giocoforza utilizzare 490 celle, come viene evidenziato dal dimensionamento preliminare. Per ottenere dei moduli standard e ripetibili, si decide di realizzare un pacco batteria costituito da sette moduli in serie. Ogni modulo a sua volta è composto da settanta celle, suddivise in gruppi da cinque. In questi gruppi, le celle sono in parallelo fra di loro e a loro volta i gruppi sono collegati in serie, realizzando un'unica linea di potenza. La configurazione elettrica del modulo risulta essere 14S-5P, ed è visibile in figura 5.5.

Si ricorda che il dimensionamento del modulo è strettamente legato all'aspetto termico ed elettrico. Nello specifico, le piastre di raffreddamento oltre a trasferire calore, hanno una funzione strutturale lungo la verticalità del modulo. Inoltre, il modulo si integra perfettamente con il campo di funzionamento dell'elettronica di controllo. Solitamente i BMS slave in commercio non riescono a gestire tensioni nominali maggiori di 60 V, di conseguenza il modulo non deve presentare tensioni maggiori a tale valore limite. Nella tabella 5.1 vengono riportate le caratteristiche principali del modulo.

Caratteristiche tecniche	valore	unità
Numero celle nel modulo	70	[-]
Configurazione elettrica	14S 5P	[-]
Tensione del modulo	50,4	[Volt]
Capacità del modulo	13	[Ah]

Tabella 5.1: Caratteristiche tecniche del modulo progettato.

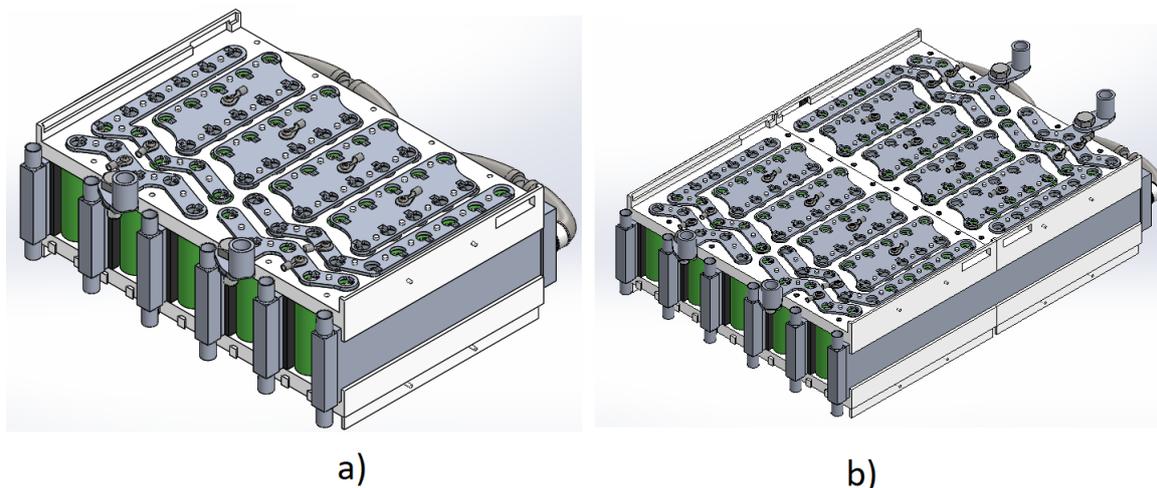


Figura 5.4: Struttura del singolo modulo (a) e di due moduli assemblati assieme (b).

Il modulo per come è studiato risulta essere facilmente ripetibile infatti, grazie alle piastre polimeriche, è possibile accoppiare più moduli fra loro. In questo caso è giocoforza utilizzare delle piastre interne di raffreddamento più lunghe, rispetto a quelle utilizzate nel singolo modulo.

5.2.1 Disposizione delle celle

La disposizione delle celle influenza notevolmente la progettazione del modulo. In quest'analisi si vuole realizzare un'unica linea di potenza costituita dalla serie di più gruppi di celle, collegate in parallelo fra loro. Nella figura 5.5, le bus bar e le connessioni del Wire Bonding vengono rappresentate nello schema logico con delle linee; partendo dai terminali presenti nella figura (a) viene realizzato un'unica linea, nella quale si collegano in serie i vari gruppi di celle. In definitiva, per realizzare un'unica linea di potenza, non è necessario realizzare delle unità come fatto nella prima soluzione, ma è sufficiente disporre le celle seguendo un determinato schema logico.

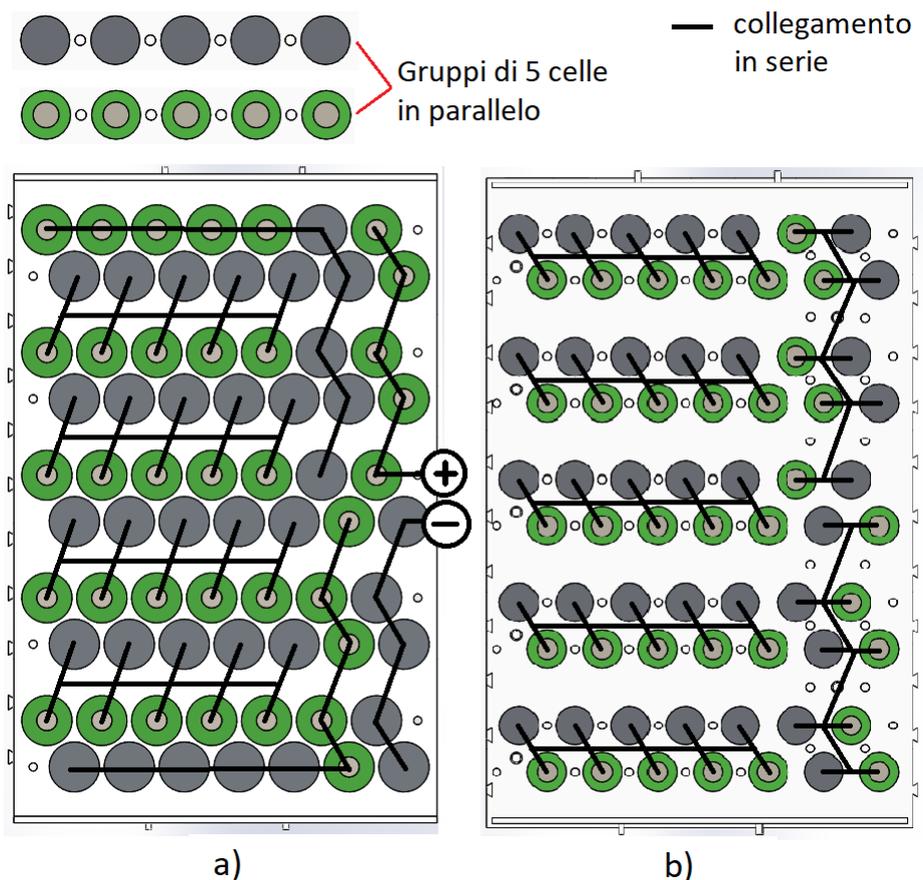


Figura 5.5: Schema logico dei collegamenti elettrici all'interno del singolo modulo; vista dall'alto (a) e vista dal basso (b).

In analogia alla prima soluzione, si opta per l'utilizzo di due piastre polimeriche per il fissaggio delle celle cilindriche. Come esempio applicativo si considera la piastra in policarbonato, a ritardo di fiamma, dell'azienda *TUFFAK*, le cui specifiche tecniche vengono riportate nella tabella 4.3. I motivi che portano a tale decisione sono riportati nel paragrafo 4.4.1.

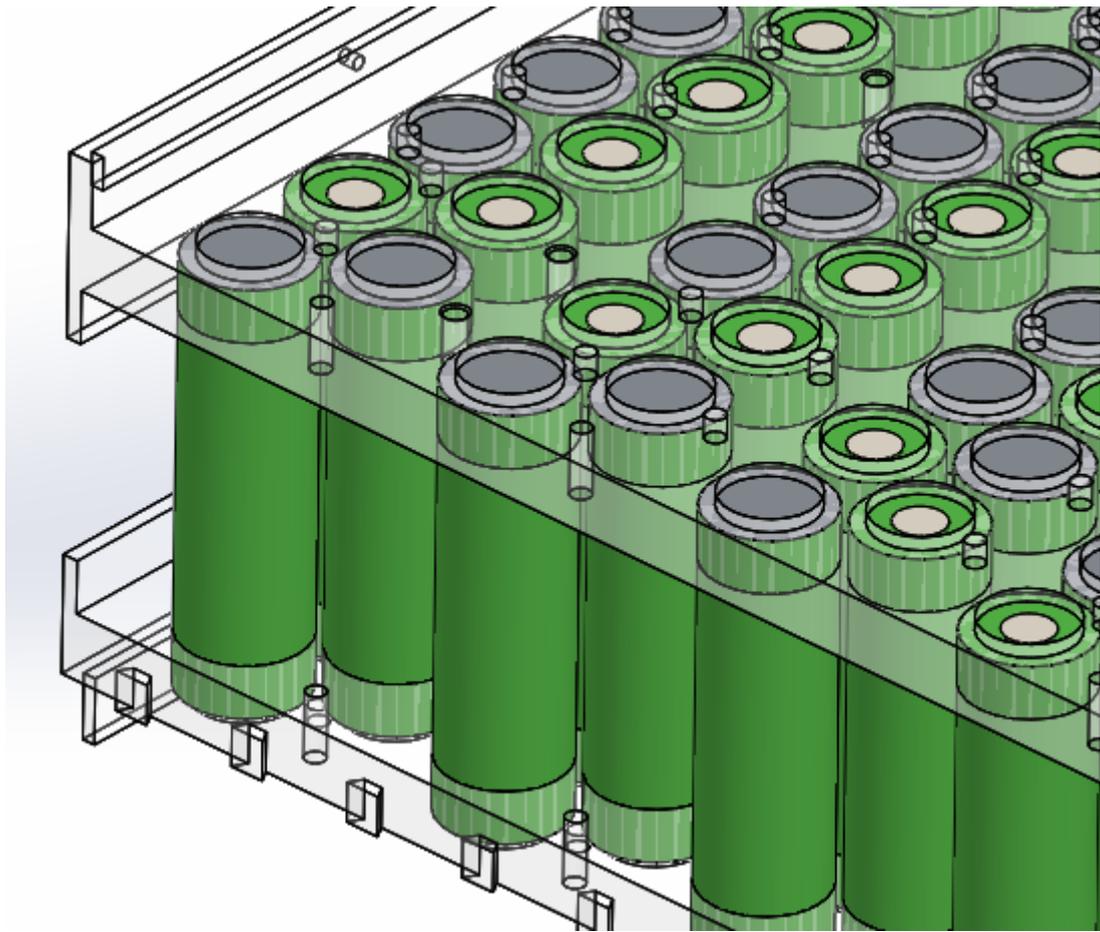


Figura 5.6: Particolare sul metodo di fissaggio delle celle cilindriche all'interno della base in policarbonato.

5.2.2 Componenti di potenza del modulo

Nel seguito vengono riportate le caratteristiche e le funzionalità dei componenti di potenza utilizzati nel pacco batteria.

- Collegamento elettrico delle celle.

Nel capitolo 2.5 vengono prese in analisi diverse soluzioni tecnologiche per la realizzazione delle connessioni elettriche fra le celle stesse e fra i moduli del pacco batteria. In questa soluzione progettuale, i collegamenti elettrici fra celle e bus bar vengono realizzati mediante il processo di saldatura Wire Bonding (WB). Si preferisce adottare tale tecnica per diversi motivi. In primo luogo, il WB comporta ad un risparmio di peso e di volume a livello di pacco ed è facilmente realizzabile da ditte esterne. Inoltre, a differenza della prima soluzione progettuale, in questo caso risulta sconveniente o poco sicuro realizzare i collegamenti elettrici tramite accoppiamenti meccanici. Questo perché le celle cilindriche non presentano superfici idonee ad ospitare tali accoppiamenti o comunque per farlo, le celle devono essere progettate e costruite "ad hoc", comportando ad un incremento di costi. Nell'ambito *E-bike*, come visto nella sezione 2.5.2, esistono delle soluzioni che consentono di realizzare le connessioni elettriche in modo meccanico, utilizzando delle comuni celle cilindriche. Lo svantaggio principale nel tempo, è che non è facile garantire una buona affidabilità del contatto fra le celle e le bus bar metalliche; questo perché potrebbero insorgere delle piccole e momentanee assenze di contatto per via delle continue vibrazioni, senza considerare eventuali rotture degli stessi holders. In sintesi, si preferisce adottare la tecnica di saldatura Wire Bonding, per la flessibilità e l'elevata qualità del contatto elettrico, per il risparmio di peso e di volume e per la facilità di realizzazione, essendo una tecnica diffusa da decenni nel settore elettronico. Di contro, il montaggio deve essere affidato a specifiche aziende e si deve prevedere l'utilizzo di bus bar appositamente progettate, aventi sedi rettificate e pulite per ospitare il filetto di saldatura.

Qui sotto vengono riportati gli elementi utilizzati per la realizzazione dei collegamenti elettrici all'interno del modulo. In figura 5.7 è possibile osservare il layout delle bus bar utilizzate in questa soluzione progettuale. Il materiale utilizzato per realizzare le bus bar è l'alluminio, per ragioni di buona conducibilità elettrica e per questioni di peso. Queste lamine, dallo spessore di 2 ÷ 3 mm, vengono posizionate al di sopra della base in policarbonato e poi serrate ad essa, tramite acciaccatura a caldo (heat staking).

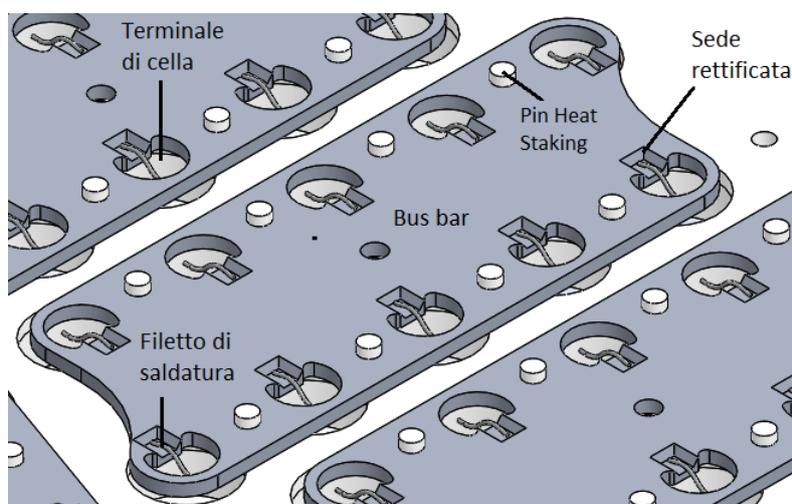


Figura 5.7: Particolare sui collegamenti elettrici presenti nel modulo.

Come detto in precedenza, per il fissaggio delle bus bar alla piastra polimerica, si prevede l'utilizzo dell'acciaccatura a caldo; si opta per tale soluzione perché è in grado di garantire una solida giunzione fra diverse tipologie di materiali. Inoltre, i pin polimerici visibili in figura 5.7, possono assumere diverse forme a seconda della dimensione delle piastre da collegare. Il processo di giunzione viene schematizzato in figura 5.8.

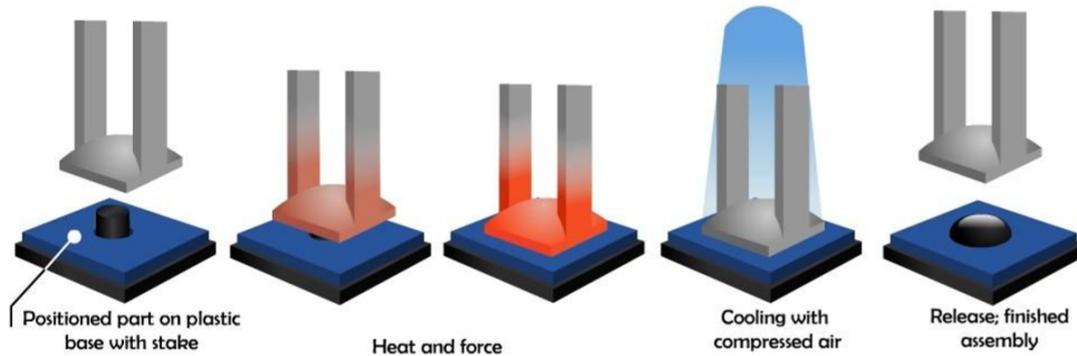


Figura 5.8: Schema di processo dell'acciaccatura a caldo (heat staking)[23].

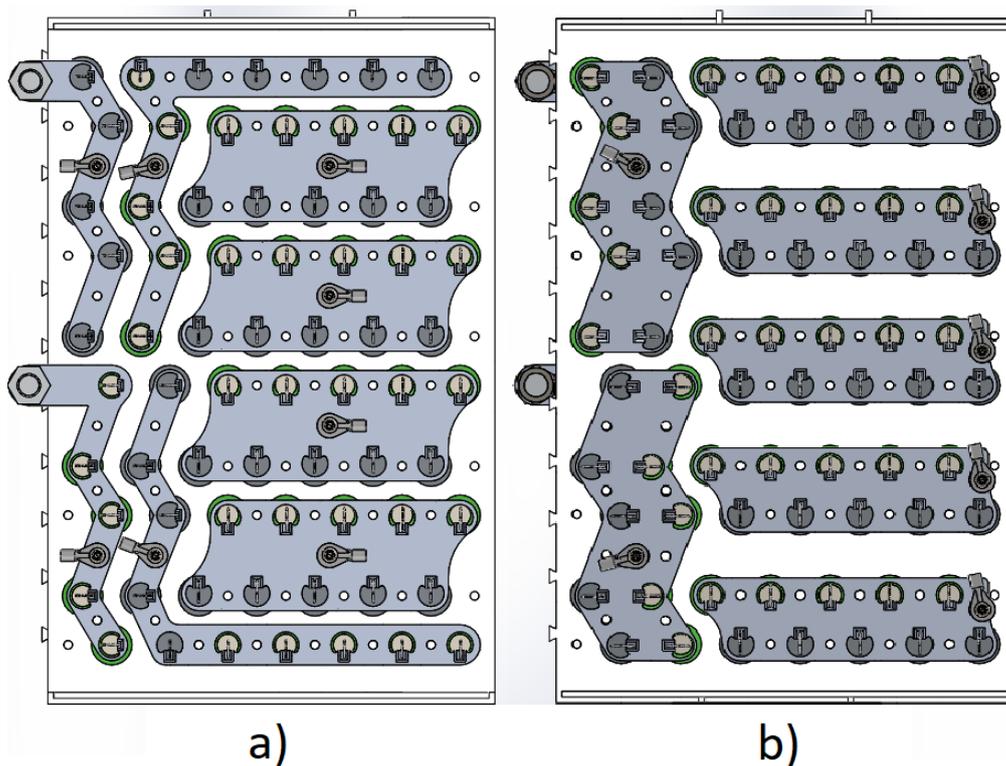


Figura 5.9: Vista dall'alto (a) e dal basso (b) dei collegamenti elettrici del modulo.

- Collegamento elettrico fra i moduli.
Per quanto concerne il collegamento elettrico fra i moduli, vengono utilizzati degli appositi capicorda, in modo del tutto analogo alla prima soluzione proposta. Infatti, i parametri elettrici progettuali del pacco batteria rimangono invariati e l'unico elemento che cambia è

la tipologia di cella utilizzata. Quindi, anche in questa soluzione si adottano dei capicorda *Weidmuller* M8, si veda la scheda tecnica in figura 4.14.

- Altri componenti di potenza.
Come affrontato nel paragrafo 4.4.1, presente nella prima soluzione progettuale, anche qui valgono gli stessi ragionamenti e le stesse scelte progettuali riguardanti i restanti dispositivi di potenza presenti nel pacco batteria (contattore, fusibile elettrico, misuratore di corrente e connettore di potenza).

5.2.3 Componenti di segnale nel modulo

Come per la prima soluzione di pacco batteria, vengono adottate gli stessi componenti di segnale (vedi paragrafo 4.4.2), per il monitoraggio della temperatura e della tensione delle celle. In questo modulo, su ogni bus bar è avvitato un sensore di tensione, mentre i sensori NTC, con il loro case, vengono compressi al di sotto di ogni bus bar, con la rispettiva cella da monitorare. Per quanto concerne il collegamento dei BMS slave al singolo modulo, anche qui il fissaggio è realizzato mediante l'acciaccatura a caldo. Invece, il BMS master viene direttamente connesso alla struttura esterna del pacco batteria (vedere la figura 5.19, nel paragrafo 5.3).

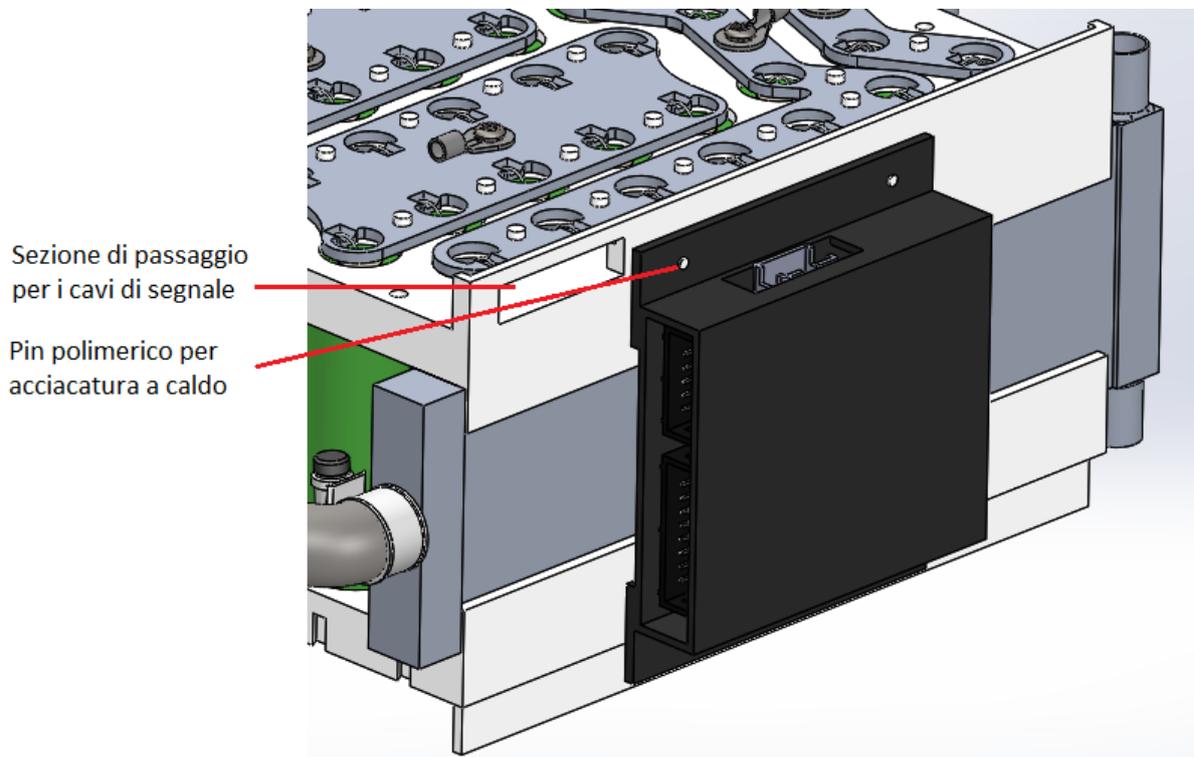


Figura 5.10: Fissaggio del BMS slave al modulo.

5.2.4 Sistema di raffreddamento del modulo

L'aspetto termico è uno dei punti focali, in termini di funzionamento e di sicurezza, dei pacchi batteria. Nel paragrafo 2.6, vengono esposte differenti soluzioni tecnologiche presenti in commercio. In modo analogo alla prima soluzione progettuale, si opta per un raffreddamento a liquido per i motivi spiegati in precedenza. In quest'attività progettuale si vuole garantire un raffreddamento il più possibile omogeneo che possa raffreddare ogni singola cella del pacco batteria. Il sistema proposto nel seguito, trae ispirazione dal layout adottato da *Tesla Motors* (un esempio simile è visibile in figura 5.11). Il concetto di base è quello di raffreddare ogni singola cella, sfruttando gli orifizi presenti fra le varie righe delle celle. Pertanto, si propone l'utilizzo di piastre di raffreddamento (cooling plate) a liquido (acqua e glicole) interposte fra le varie celle. Inoltre, per incrementare la superficie di scambio e quindi il contatto termico fra le celle e la piastra, si interpone un materiale deformabile e conduttivo termicamente.

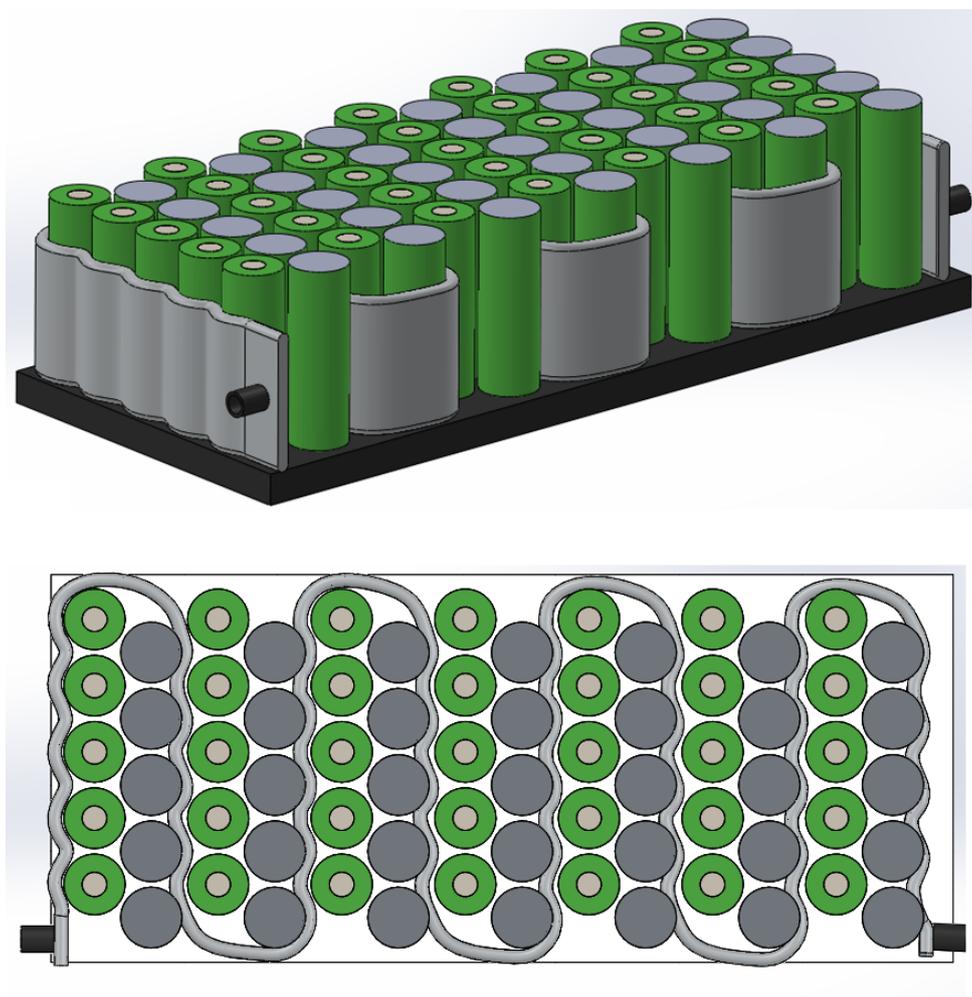


Figura 5.11: Esempio di sistema di raffreddamento riconducibile a quello adottato da *Tesla Motors*.

Come si evince dalla figura 5.11, la serpentina di raffreddamento studiata da *Tesla Motors*, di materiale metallico, presenta una certa complessità costruttiva, idonea alla produzione di massa, ma non per il nostro caso di studi. Di conseguenza, mantenendo la stessa logica di funzionamento, si preferisce adottare la soluzione visibile in figura 5.13 e 5.12. Il layout è

costituito da sei piastre di raffreddamento in alluminio, ottenute per estrusione, aventi sezione rettangolare. Il numero e la forma dei canali interni può variare a seconda dei risultati termici desiderati. In questa soluzione progettuale si adotta una piastra di raffreddamento fornita di quattro canali. Il collegamento fra le varie piastre di raffreddamento viene effettuato con appositi tubi in silicone e fascette.

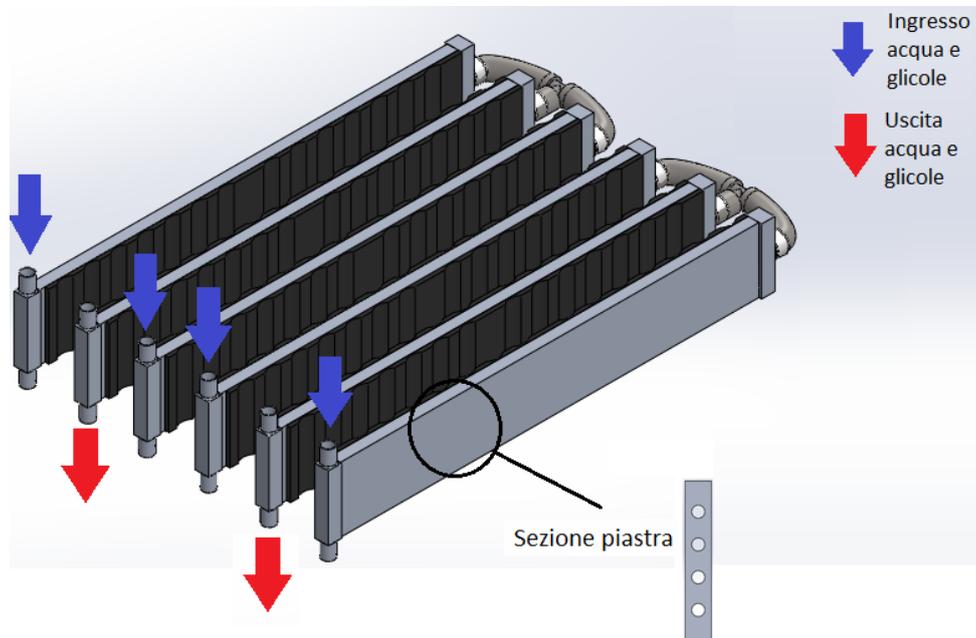


Figura 5.12: Sistema di raffreddamento utilizzato in questa soluzione progettuale.

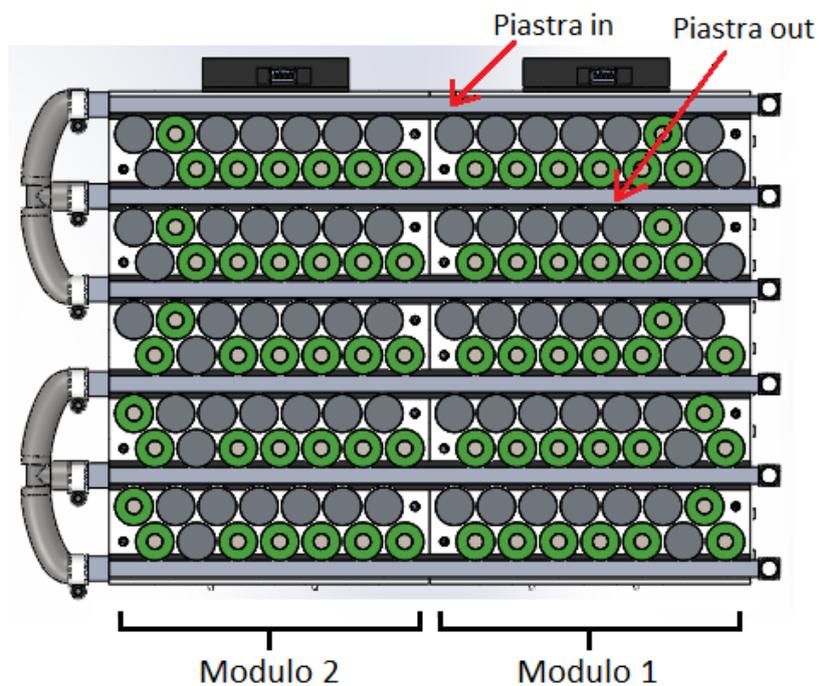


Figura 5.13: Modulo munito del sistema di raffreddamento.

In figura 5.12, è possibile osservare che sulle pareti di ogni singola piastra di raffreddamento viene applicato uno strato di materiale elastico. In questa soluzione si consiglia l'utilizzo del *Graphite Pad Panasonic*, le cui specifiche tecniche sono riportate in figura 5.14. Tale materiale costituito da uno strato di grafite e resina di silicone, viene scelto per garantire una maggiore superficie di scambio termico rispetto al puro contatto fra la piastra e le celle inoltre, è leggero ed elastico.

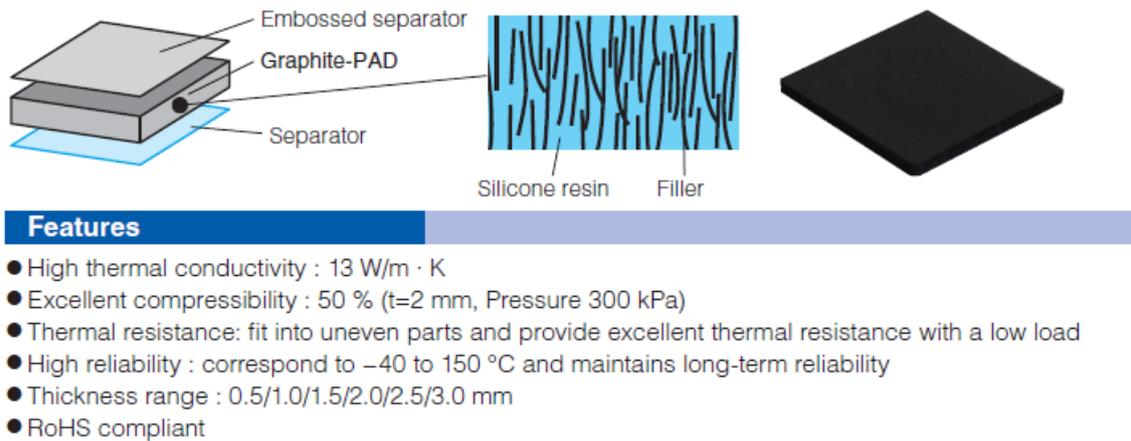


Figura 5.14: Struttura interna e caratteristiche principali *Graphite Pad Panasonic*[44].

Dimensionamento preliminare della piastra di raffreddamento

Nel seguito, vengo riportati i risultati del dimensionamento preliminare delle piastre di raffreddamento. In modo del tutto analogo alla prima soluzione, il sistema di raffreddamento deve essere in grado di integrarsi perfettamente con gli attuali impianti presenti nei veicoli. Anche in quest'analisi, si assume come portata principale 8 l/min. Dato che il pacco batteria è costituito da sette moduli, distribuiti su quattro piani, ne consegue che la portata di liquido refrigerante che giunge al piano risulta essere pari a 2 l/min. Quest'ultima si divide nelle quattro piastre d'ingresso, per poi fluire via attraverso le due piastre di uscita del modulo. La logica utilizzata nel dimensionamento termico preliminare viene affrontata nel paragrafo 4.4.3 della prima soluzione progettuale.

Grandezze fisiche	valore	unità
Portata volumetrica al piano	2	[l/min]
Portata volumetrica alla piastra IN	0,5	[l/min]
Numero dei canali interni (piastra IN)	4	[-]
Portata volumetrica nel singolo canale (piastra IN)	0,125	[l/min]
Diametro del singolo canale interno (piastra IN)	4	[mm]
Velocità liquido nel singolo canale (piastra IN)	0,17	[m/s]
Reynolds nel singolo canale (piastra IN)	55300	[-]
Portata volumetrica alla piastra OUT	1	[l/min]
Portata volumetrica nel singolo canale (piastra OUT)	0,25	[l/min]
Diametro del singolo canale interno (piastra OUT)	6	[mm]
Velocità liquido nel singolo canale (piastra OUT)	0,15	[m/s]
Reynolds nel singolo canale (piastra OUT)	73700	[-]
Potenza estratta dall'impianto di raffreddamento nel piano	1,28	[kW]

Tabella 5.2: Risultati ottenuti dal dimensionamento preliminare delle piastre di raffreddamento.

I risultati presenti nella tabella 4.4, mostrano che con tali dimensioni dei canali interni, si ottiene un buon compromesso, sia in termini d'ingombri sia in termini di velocità del fluido refrigerante. Infatti, in tutti i canali delle piastre di raffreddamento, si è in regime turbolento ($Re > 4300$).

Calcolo di verifica

Dal punto di vista termico, è giocoforza verificare che la quantità di potenza termica estratta dal sistema di raffreddamento, risulti maggiore rispetto a quella dissipata globalmente dalle celle. Valgono i medesimi ragionamenti e considerazioni fatte per la prima soluzione progettuale. L'unica differenza è che la corrente massima continuativa che attraversa la singola cella, risulta essere pari a 30 A.

Grandezze fisiche	valore	unità
Numero celle nel piano	140	[-]
Resistenza elettrica della cella	10	[mΩ]
Corrente massima continuativa alla cella	30	[A]
Potenza dissipata dalla cella	9	[W]
Potenza dissipata da tutte le celle nel piano	1,260	[kW]

Tabella 5.3: Risultati ottenuti dal calcolo di verifica.

Dalle tabelle 5.2 e 5.3 si osserva che il sistema di raffreddamento utilizzato da due moduli nel piano, secondo il dimensionamento adottato, può scambiare termicamente una potenza pari a 1,28 kW. Questo valore risulta essere leggermente superiore al calore dissipato da tutte le celle del piano (1,26 kW). Pertanto, il dimensionamento preliminare è verificato, ma necessita di opportune e future analisi termiche per confermare e/o migliorare il sistema di raffreddamento.

5.2.5 Isolamento elettrico

Il pacco batteria, per questioni di sicurezza, deve garantire un alto livello d'isolamento elettrico verso l'esterno. Pertanto, è giocoforza individuare e isolare i componenti interni che sono a contatto con gli elementi di potenza. Come visto nel paragrafo 2.3.1, solitamente le celle cilindriche sfruttano il contenitore esterno (case) come terminale elettrico, quindi quest'ultimo risulta essere elettricamente conduttivo. Pertanto, in questo progetto è necessario isolare elettricamente tutti gli elementi a contatto con le celle, ad eccezione delle piastre in policarbonato, che per la loro chimica garantiscono tale tipo di isolamento. Per raggiungere un elevato grado di sicurezza, si prevede di rivestire le pareti delle piastre di raffreddamento con la pellicola *DuPont Nomex 410*. In tabella 5.4 vengono riportate le sue caratteristiche principali.

Grandezze fisiche	valore	unità
Spessori disponibili	0,05÷0,6	[mm]
Conducibilità termica	18÷38	[W/m K]
Rigidità dielettrica	103 ÷ 175	[kV/mm]
Classe di resistenza alla fiamma	UL94V-0	[-]

Tabella 5.4: Specifiche tecniche della pellicola *DuPont Nomex 410*[50].

In figura 5.15, viene messa in evidenza la logica utilizzata per realizzare un perfetto isolamento elettrico del modulo. Dato che la pellicola ha uno spessore inferiori al millimetro, per questione di visualizzazione, nella figura 5.15 il *Nomex 410* viene rappresentato da linee e curve rosse fuori scala. Inoltre, tale pellicola non viene adoperato esclusivamente per ragioni di sicurezza ma viene anche utilizzata per evitare cortocircuiti interni fra le celle. Infatti, in ogni settore, fra le varie colonne di celle viene interposta la pellicola, per tale motivo. Oltre a ciò, in ogni colonna di celle del modulo, vi sono due celle molto vicine, ma non collegate elettricamente fra loro, come è visibile in figura 5.16. Pertanto, per evitare cortocircuiti interni fra le celle della medesima colonna, le due celle in questione devono essere rivestite con una pellicola termo restringente (pvc) per isolarle elettricamente.

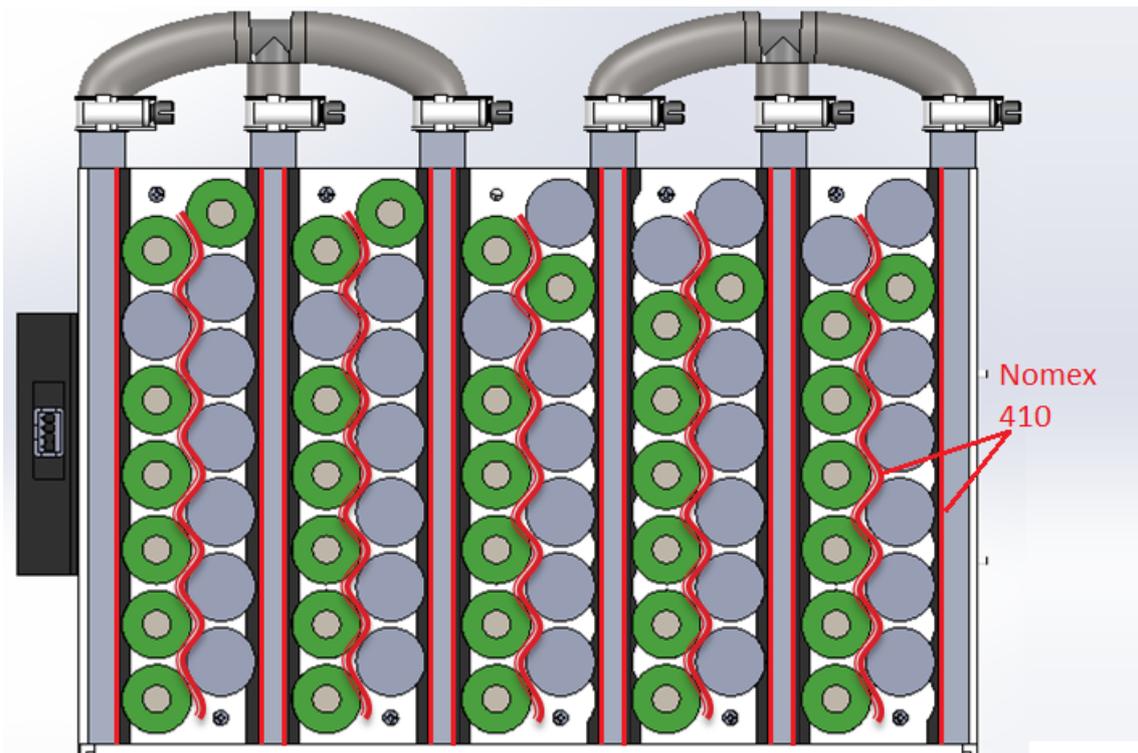


Figura 5.15: Applicazione della pellicola *Nomex 410* ,nel modulo.

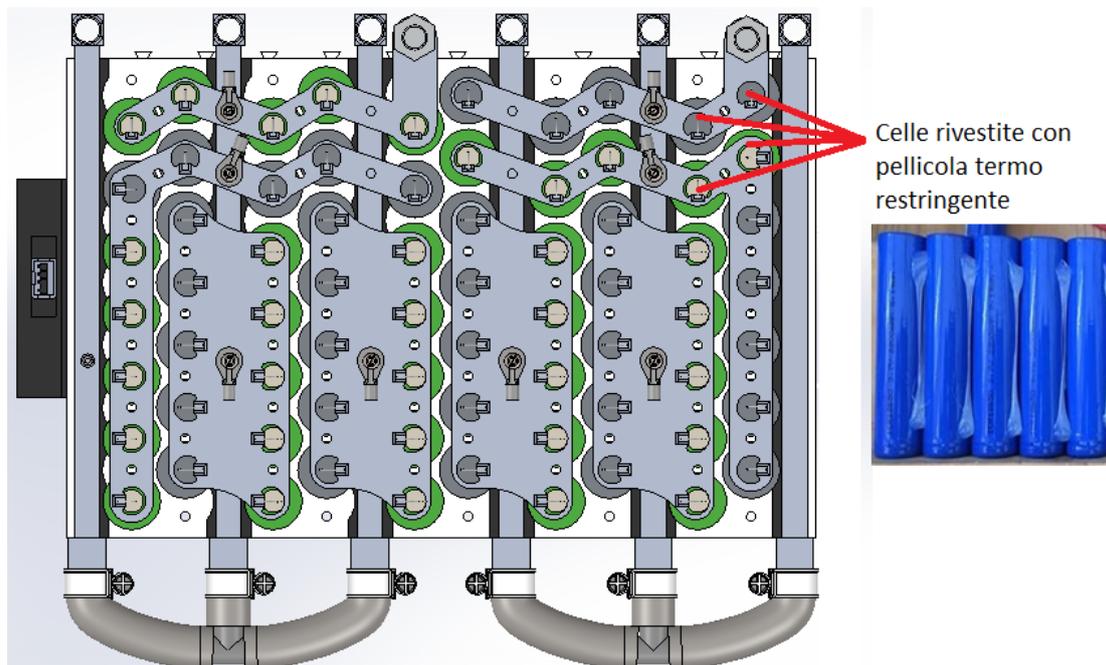


Figura 5.16: Individuazione delle celle da isolare elettricamente, all'interno del modulo.

Per quanto concerne la protezione da cortocircuiti interni, la progettazione del modulo tiene conto di tale aspetto, seguendo le medesime misure di sicurezza intraprese nella prima soluzione (vedere il paragrafo 4.4.4). La zona di maggiore interesse risulta essere quella in cui si hanno le

bus bar, di due diversi moduli, sovrastanti. In figura 5.17, si osserva che grazie ad una corretta progettazione delle piastre in policarbonato, vi è una notevole distanza verticale (9 mm) fra le bus bar del modulo sottostante e quello sovrastante, idonea per evitare cortocircuiti interni. Inoltre, entrambi i terminali di ogni modulo sono rivestiti con il nastro *Kapton*, per garantire un perfetto isolamento elettrico nel tempo.

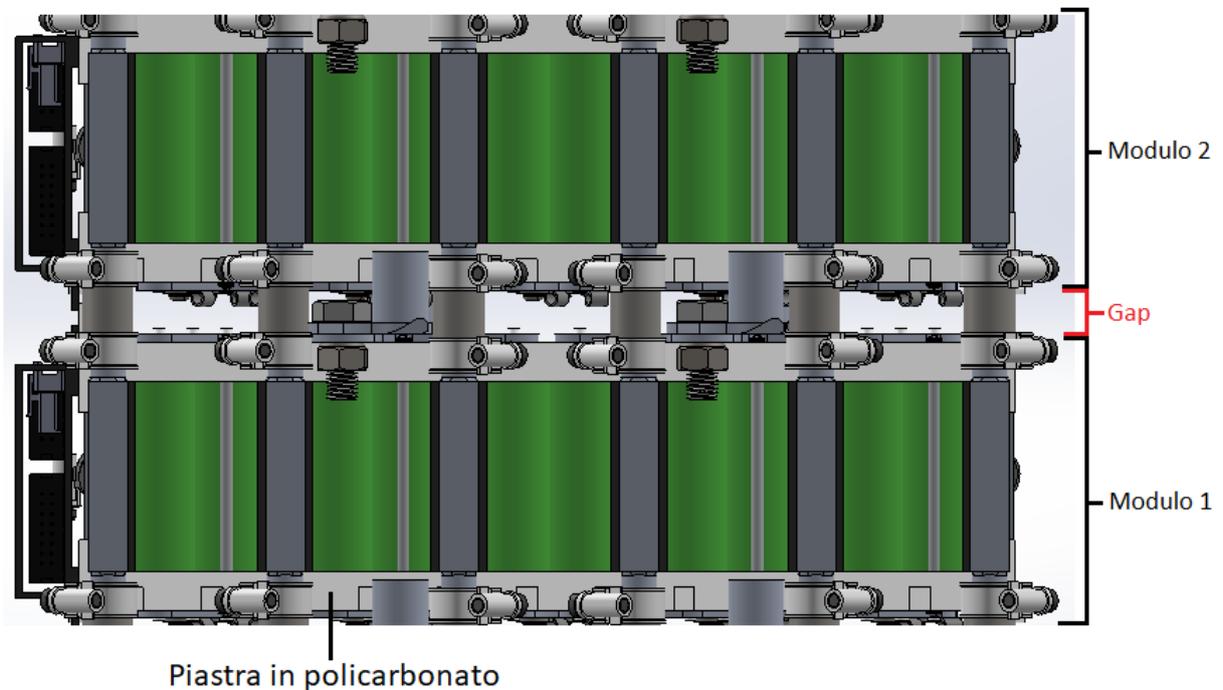


Figura 5.17: Particolare sulla connessione di due moduli sovrastanti.

5.2.6 Serraggio del modulo

Per gli stessi motivi spiegati nel paragrafo 4.4.5, anche in questa soluzione si necessita garantire un buon serraggio del modulo. Pertanto, le piastre in policarbonato presentano dei fori atti ad ospitare delle apposite viti di serraggio, visibili in figura 5.18.

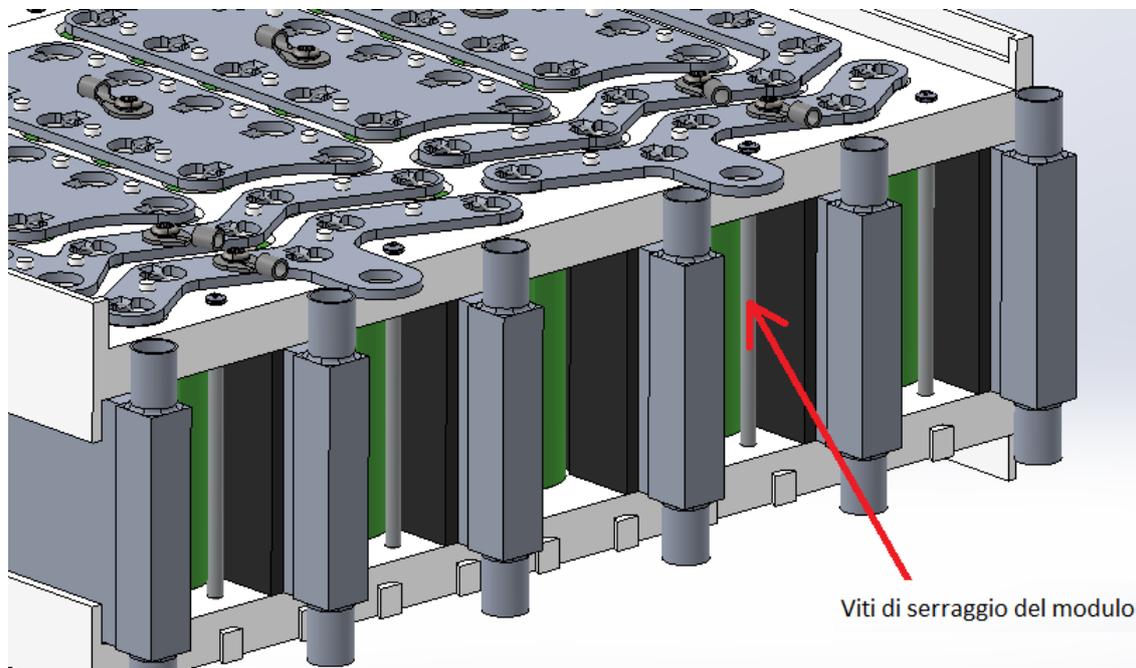


Figura 5.18: Viti di serraggio del modulo.

5.3 Pacco batteria

Nel seguito viene riportato il pacco batteria nel suo insieme, si precisa che la struttura esterna di quest'ultimo, rappresenta solo una configurazione preliminare e necessita pertanto, di una futura analisi progettuale.

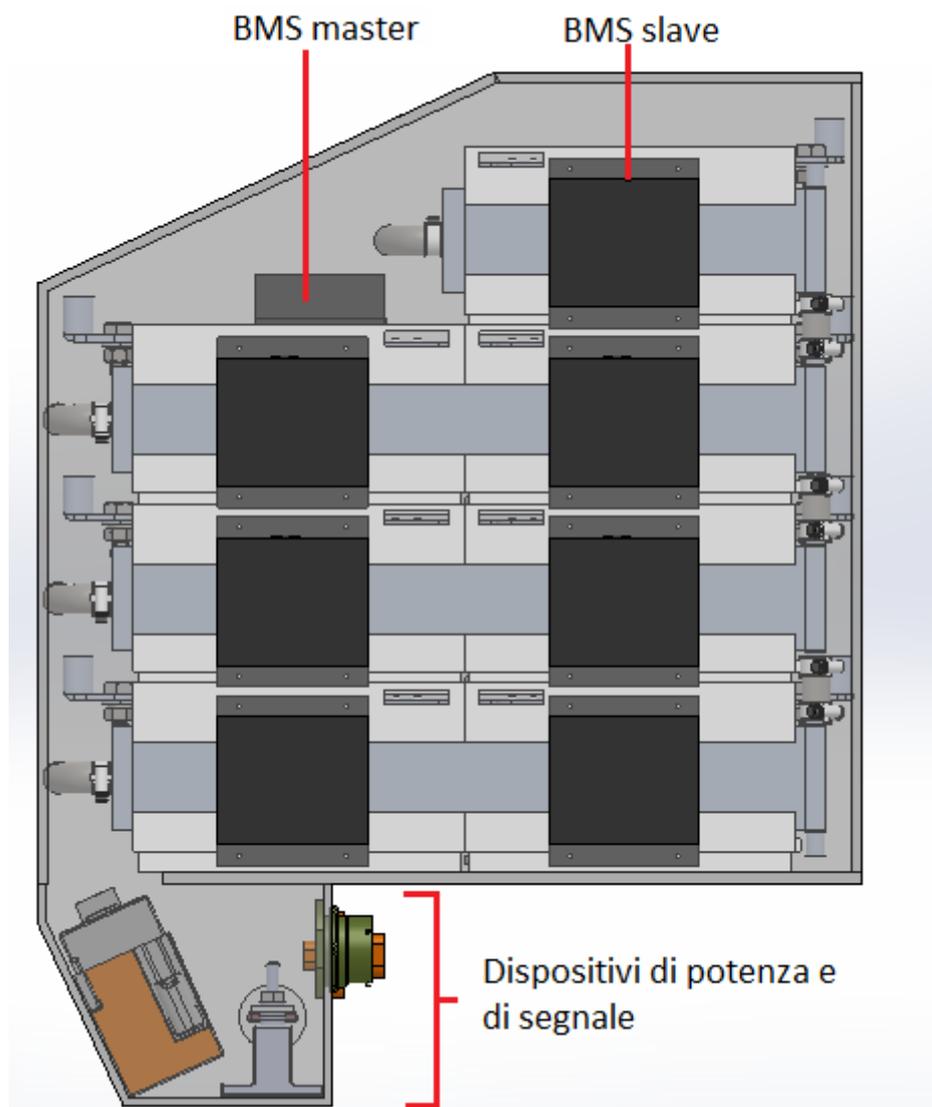


Figura 5.19: Vista frontale del pacco batteria.

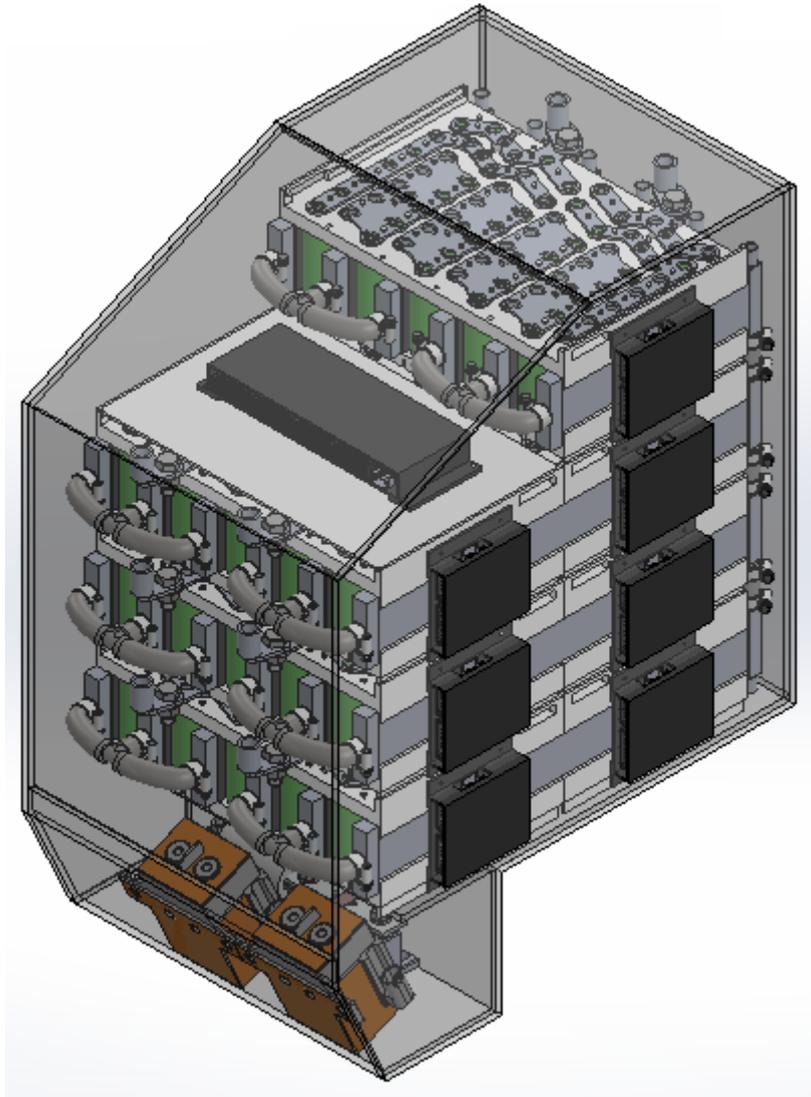


Figura 5.20: Vista in assonometria del pacco batteria.

Capitolo 6

Analisi comparativa delle due soluzioni

In questo capitolo si riporta un'analisi comparativa fra le due soluzioni progettuali di pacco batteria, presentate nei capitoli 4 e 5. Gli aspetti esaminati di questi due prototipi sono: i parametri elettrici nominali ottenuti (tensione, potenza ed energia) e le proprietà fisiche (peso e volume).

Confronto delle caratteristiche

Per quanto concerne il raggiungimento degli obiettivi elettrici di progetto, entrambi i prototipi di pacco batteria assicurano il rispetto di tali vincoli. Innanzitutto, la prima soluzione progettuale prevedeva l'utilizzo di 160 celle a sacchetto, per rispettare il raggiungimento dell'energia nominale del pacco e 190 celle per garantire la potenza nominale del pacco (come riportato nel capitolo 4, in tabella 4.1). Pertanto, si è deciso per il primo pacco, di utilizzare 192 celle, in modo tale da rispettare entrambi gli obiettivi elettrici di progetto e al fine di realizzare un numero intero di moduli standardizzati (infatti, con 190 celle sarebbe stato necessario usufruire di un modulo, in termini di numero di celle, leggermente più piccolo rispetto agli altri). Anche per la seconda soluzione progettuale, la potenza nominale ha vincolato la scelta del numero di celle costituenti il pacco. In questo caso, in termini di numero di celle, il gap fra il parametro energetico e quello di potenza è piuttosto accentuato (vedere nel capitolo 5, la tabella 5.1). Questo viene spiegato dal fatto che, la cella cilindrica risulta avere molta meno densità di potenza rispetto alla pouch cell, per colpa della sua bassa capacità nominale. Quindi, il secondo prototipo di pacco batteria ha previsto l'utilizzo di 490 celle cilindriche, distribuite in 7 moduli standardizzati, da 70 celle ciascuno. Nella tabella 6.1, vengono riportati le caratteristiche tecniche dei due prototipi di pacco batteria progettati.

Parametri del pacco batteria	Soluzione 1	Soluzione 2
Tipologia di cella	Pouch cell	Cella cilindrica
Numero di celle utilizzate	192	490
Tensione nominale di cella [V]	3,7	3,6
Capacità nominale di cella [Ah]	5	2,6
Configurazione elettrica	95S 2P	98S 5P
Tensione nominale del pacco [V]	355,2	352,8
Potenza nominale del pacco [kW]	53,3	52,9
Energia nominale del pacco [kWh]	3,55	4,59
Peso complessivo [kg]	53,0	47,5
Peso delle celle [kg]	25,1	23,1
Peso della struttura [kg]	27,9	24,43
Volume complessivo [l]	39,6	38,3
Volume delle celle [l]	13,6	8,4
Volume occupato dai moduli [l]	18,9	15,7
Potenza specifica del pacco [kW/kg]	1,04	1,16
Densità di potenza del pacco [kW/l]	1,35	1,38
Energia specifica del pacco [kWh/kg]	0,07	0,10
Densità di energia del pacco [kWh/l]	0,09	0,12

Tabella 6.1: Caratteristiche tecniche dei due prototipi di pacco batteria.

In quest'analisi, il peso della struttura è il contributo apportato dai componenti utilizzati all'interno dei moduli (piastre di raffreddamento, viti, bus bar ecc.) al netto del peso delle celle. Pertanto, tale valore si calcola dalla differenza fra il peso complessivo del pacco e il peso delle celle. Mentre, per quanto riguarda il volume, non viene definito un volume della struttura, dato dalla differenza fra il volume complessivo e il volume delle celle. Questo perché in tale valore, oltre ai contributi apportati dai componenti, si considererebbero anche i volumi dovuti agli spazi vuoti fra il case e la struttura stessa. Le grandezze specifiche del pacco batteria, sono riferite al peso e al volume complessivo.

Come emerge dalla tabella comparativa 6.1, si osserva che entrambe le soluzioni di pacco batteria rispettano i requisiti di progetto, anche se la seconda soluzione si dimostra leggermente sovradimensionata, a livello energetico. Questo perché, nel caso delle celle cilindriche, il numero di celle che soddisfano il parametro energetico non è sufficiente per garantire il raggiungimento della potenza di progetto. Pertanto, è necessario incrementare il numero di celle cilindriche per rispettare entrambi i parametri.

Proseguendo nell'analisi emerge che, la seconda soluzione, nel suo complesso risulta essere meno pesante. Bisogna mettere in evidenza che tale risultato non dipende fortemente dal peso dovuto alle sole celle infatti, sotto questo punto di vista i pesi sono molto simili per entrambe le soluzioni (25,1 e 23,1 kg). Il fattore determinante per tale caratteristica, è il peso dovuto alla struttura del modulo. Per il fatto che la cella a sacchetto possiede i terminali su lati opposti, si è reso necessario replicare tutta la componentistica elettrica, di segnale e gli accorgimenti di sicurezza su entrambi i lati della cella. Ciò comporta ad un incremento di pesi a livello di modulo.

Per quanto riguarda il volume occupato, anche qui la prima soluzione risulta essere leggermente più ingombrante, nel complessivo. In questo caso, tale aspetto è direttamente influenzato dalla dimensione della cella inoltre, viene confermato anche dai volumi dei moduli, abbastanza simili in entrambe le soluzioni, pertanto poco influenti.

Ulteriore considerazione riguarda le grandezze elettriche (potenza ed energia) specifiche, dove le due soluzioni presentano valori molto simili. Mentre, se si fa riferimento all'unità di volume, la seconda soluzione si dimostra leggermente migliore, sia in termini di energia che di potenza.

Capitolo 7

Conclusioni

Questo elaborato riporta per esteso la procedura di progettazione di due soluzioni alternative di pacco batteria. Entrambi i pacchi proposti soddisfano i requisiti di progetto imposti, presentando alcuni vantaggi e svantaggi, illustrati per esteso nel capitolo 6.

Nel seguito viene riportata l'analisi sull'inquadramento nel mercato, delle due soluzioni progettuali. In figura 7.1 si mettono a confronto le specifiche tecniche fra vari pacchi batteria considerati. Nello specifico, per questioni di completezza d'informazioni, il confronto viene effettuato con i pacchi batteria delle seguenti moto: *Piaggio MP3 Hybrid 300ie*, *Vespa* elettrica ed ibrida ed *Energica Ego*. Per quanto riguarda la potenza nominale del pacco, laddove non viene fornito il suo valore, in questo studio lo si assume pari alla potenza massima del motore elettrico, dato che quest'ultimo è l'utilizzatore del pacco batteria e perciò entrambi devono lavorare in range di funzionamento simile. Un'analisi volumetrica non viene affrontata per carenza di dati.

	Capacità nominale [Ah]	Corrente nominale [A]	Tensione nominale [V]	Potenza nominale del pacco [kW]	Potenza max motore elettrico [kW]	Energia nominale [kWh]	Peso [kg]	Volume [l]	Densità di energia [kWh/kg]	Densità di potenza [kW/kg]
Piaggio MP3 hybrid 300ie	31,0	60,0	37,0	2,2	2,6	1,2	12,0	ND	0,100	0,185
Vespa elettrica X (hybrid)	42,0	ND	48,0	ND	4,0	2,0	25,0	ND	0,080	0,160
Vespa elettrica	86,0	ND	48,0	ND	4,0	4,2	25,0	ND	0,168	0,160
Energica ego (full electric)	39,0	400,0	300,0	120,0	107,0	11,7	115,0	136,1	0,102	1,043
Soluzione 1	30,0	150,0	355,2	53,3	ND	3,5	56,1	39,0	0,062	0,950
Soluzione 2	30,0	150,0	352,8	52,9	ND	4,6	45,7	39,0	0,101	1,158
Honda Pcx Hybrid	ND	41,6	50,4	2,1	1,40	ND	ND	5,00	ND	ND
Perseo Hybrid 150 cc	24,0	ND	48,0	ND	1,0	1,2	ND	ND	ND	ND
Zero Ds 14.4 (full electric)	ND	ND	ND	ND	44,00	11,0	ND	ND	ND	ND
Lightning LS-218 (full electric)	31,6	ND	380,0	ND	150,0	12,0	ND	ND	ND	ND

Figura 7.1: Tabella comparativa fra diverse soluzioni di pacco batteria.

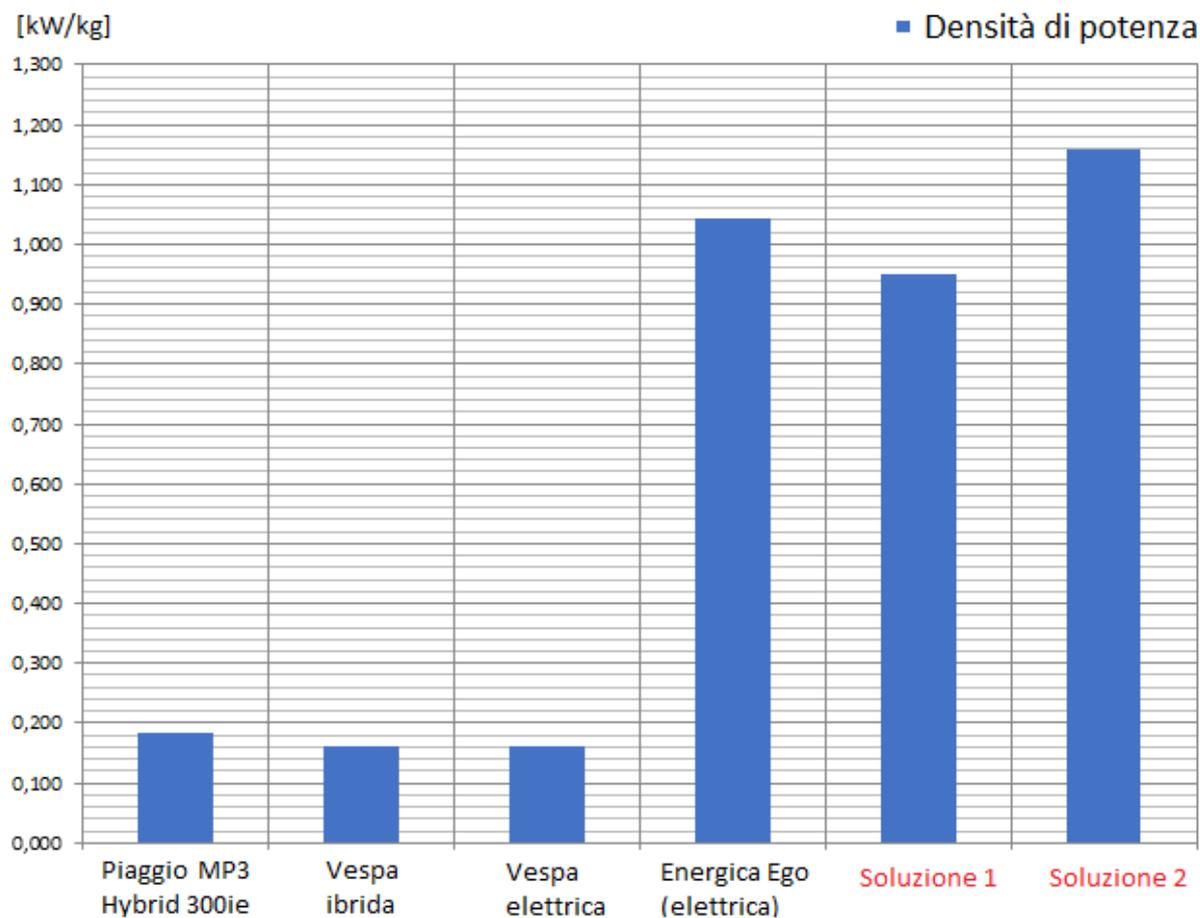


Figura 7.2: Analisi comparativa della densità di potenza, fra le soluzioni prese in studio.

Le due soluzioni di pacchi batteria progettati in quest'attività, possiedono una densità di potenza notevolmente più grande, rispetto alle moto ibride analizzate. Infatti, sono molto vicini al caso dell'*Energica Ego* (full electric) e ciò è dovuto alla scelta dei requisiti progettuali. Pertanto, in termini di potenza, i due prototipi progettati possono perfettamente integrarsi con qualsiasi tipologia di moto ibrida ed inoltre, sono idonei anche per applicazioni puramente elettriche. Se si volesse ridurre il peso delle due soluzioni, per alleggerire nel complessivo la motocicletta ed avvicinarsi alle soluzioni ibride in commercio, si consiglia di scalare la potenza, mantenendo un tasso di densità di potenza pressoché unitario. In tal modo, con un tasso unitario o poco sotto, dal 100% del peso del pacco, si ricava un elevato contributo in termini di potenza (90% ÷ 100%).

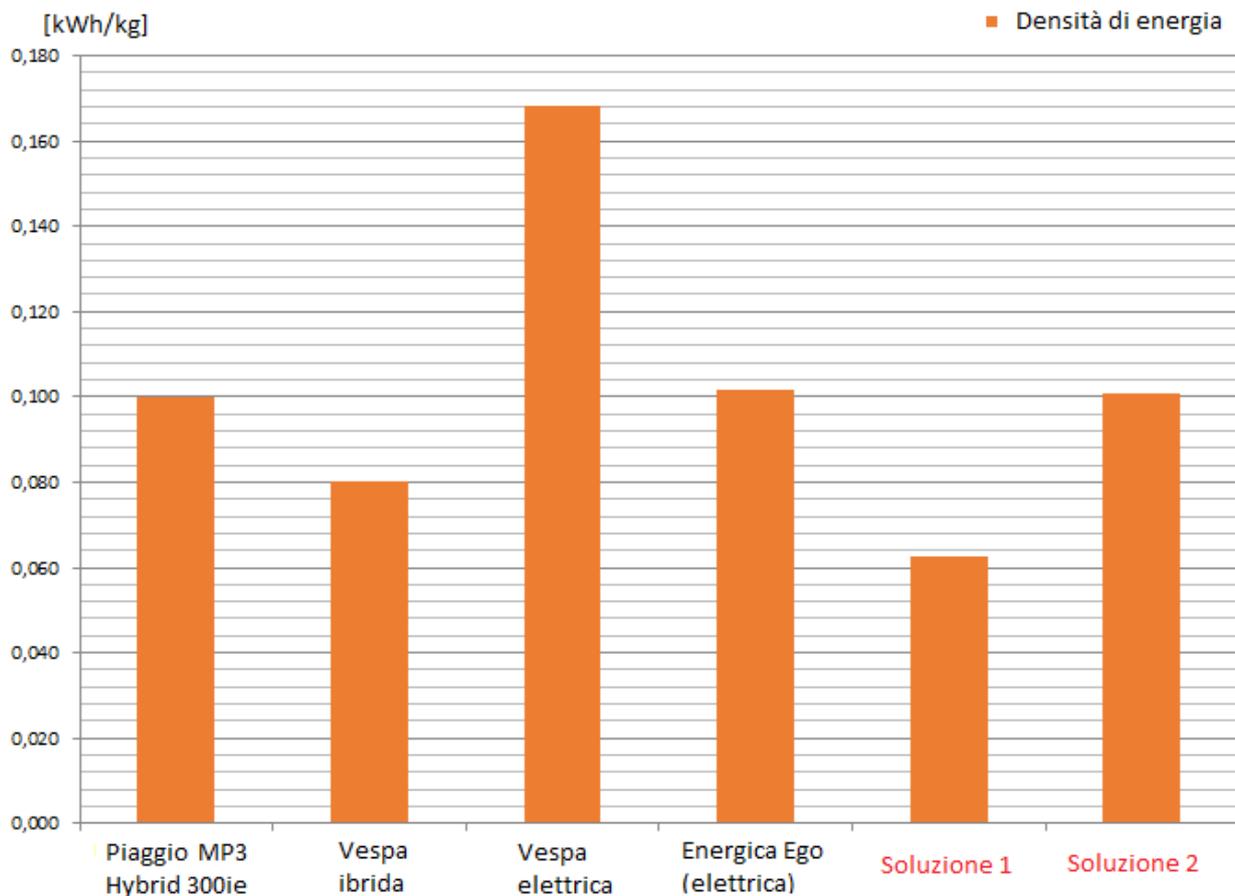


Figura 7.3: Analisi comparativa della densità di energia, fra le soluzioni prese in studio.

Per quanto concerne la densità di energia, la soluzione 2 risulta essere in linea con le caratteristiche di alcune delle moto ibride prese in commercio. Va ricordato che, tale soluzione, risulta leggermente sovradimensionata energeticamente (4,6 kWh, rispetto a 3kWh di progetto) ed essendo più leggera, presenta una densità migliore rispetto alla soluzione alternativa 1. Entrambi i pacchi, in termini energetici sono idonei per essere integrati su motociclette ibride. Mentre, in termini assoluti, presentano dei valori di energia nominali abbastanza distanti dalle applicazioni puramente elettriche. Infatti, nel caso della *Energica Ego*, l'energia nominale è pari a 11,7 kWh, molto al di sopra del valore di progetto delle due soluzioni. Anche in questo caso, se si volesse incrementare l'aspetto energetico dei pacchi, si consiglia di scalare l'energia, con un tasso di densità energetico compreso fra 0,08 e 0,1, essendo un range tipicamente utilizzato in molte soluzioni commerciali.

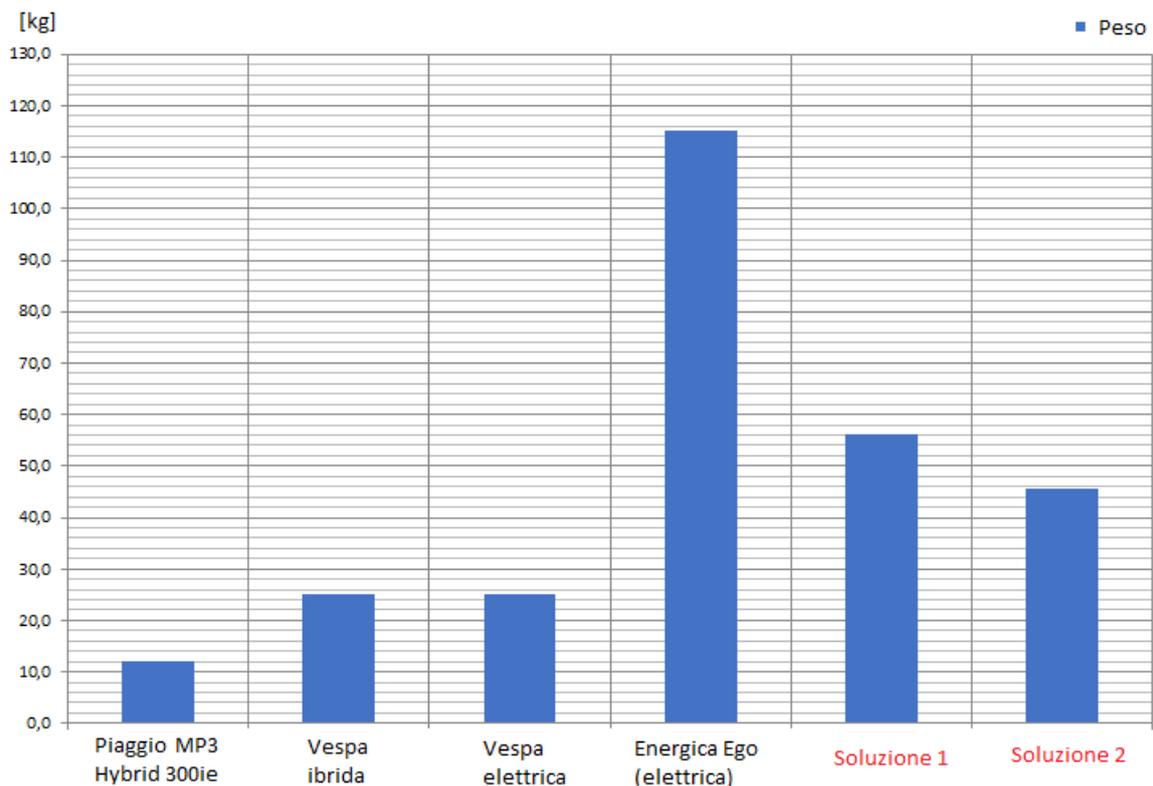


Figura 7.4: Analisi comparativa del peso, fra le soluzioni prese in studio.

In conclusione, i prototipi di pacchi batteria progettati, rientrano perfettamente nelle applicazioni di natura ibrida. Qualora si volesse ottenere una riduzione del peso del pacco batteria, si consiglia di scalare la potenza nominale, mantenendo una densità di potenza pressoché unitaria. I pacchi, per come si presentano, hanno potenze nominali molto simili a quelle previste nelle applicazioni puramente elettriche. Per renderli completamente integrabili è necessario potenziare l'energia nominale dei pacchi, andando ad utilizzare delle celle più energetiche (celle cilindriche).

Bibliografia

- [1] Wahid Ooi Abdullah, cur. *Tokyo Motor Show 2017: Honda Announces Electric, Hybrid Scooters*. 2017. URL: <https://www.bikesrepublic.com/featured/honda-pcx-electric-and-pcx-hybrid-unveiled/>.
- [2] David Williams Abhishek Das Dezhi Li e David Greenwood. "Joining Technologies for Automotive Battery System Manufacturing". In: *World Electric Vehicle Journal* (2018).
- [3] Noshin Omar Ahmadou Samba, Joeri Van Mierlo Hamid Gualous Peter Van den Bossche e Tala Ighil Boubekour. *Development of 2D Thermal Battery Model for Lithium-ion Pouch Cells*. Report. 2013.
- [4] Alibaba.com, cur. *Add to CompareShare A123 lifepo4 20Ah prismatic pouch battery cell*. 2019. URL: https://www.alibaba.com/product-detail/A123-lifepo4-20Ah-prismatic-pouch-battery_60158522994.html.
- [5] AllCell-Technologies, cur. *Thermal Management Material*. 2019. URL: http://www.allcelltech.com/images/datasheets/pcc/AllCell%20PCC%202019_01.pdf.
- [6] Amphenol, cur. *Duramate AHDM 24-31*. 2018. URL: https://www.amphenol-sine.com/_p_9289.html.
- [7] Amphenol, cur. *e-power lite connector*. 2019. URL: <http://www.amphenol-industrial.com/epower-lite>.
- [8] Amphenol, cur. *RADLOK*. 2019. URL: <http://www.amphenol-industrial.com/radlok>.
- [9] Rutronik Elektronische Bauelemente GmbH Andreas Mangler Roland Hofmann. *Metodi efficaci per combattere l'instabilità termica (Thermal runaway) nelle batterie agli ioni di litio*. URL: https://fortronic.it/wp-content/uploads/2018/09/RUTRONIK_-_IT_MAY18-RUT-Fighting-Thermal-Runaways_revised.pdf.
- [10] Mario Pedrini ASVEA, cur. *Le batterie per trazione elettrica*. URL: <https://docplayer.it/4039070-Le-batterie-per-trazione-elettrica-asvea-associazione-per-lo-sviluppo-di-veicoli-ad-energia-alternativa.html>.
- [11] Jean-Marie Tarascon Bruce Dunn Haresh Kamath. *Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices*. URL: <https://science.sciencemag.org/content/334/6058/928.figures-only>.
- [12] Car-shooters, cur. *Tesla model S*. 2019. URL: <https://www.car-shooters.com/2018/06/30/tesla-model-s-funzionamento/>.
- [13] Hybrid Auto Center, cur. *Vectrix Lithium Conversion 9kWh Battery Pack 136V/60Ah*. 2019. URL: http://hybridautocenter.com/HAC4/index.php?option=com_hikashop&ctrl=product&task=show&cid=93&name=vectrix-lithium-conversion-9kwh-battery-pack-136v-60ah-18-nissan-leaf-modules&Itemid=605.

- [14] Hybrid Auto Center.com, cur. *Lithium-Ion Pack of 7 Battery Modules 60AH 58.8V NISSAN Leaf*. 2019. URL: http://hybridautocenter.com/HAC4/index.php?option=com_hikashop&ctrl=product&task=show&cid=101&name=lithium-ion-pack-of-7-battery-modules-60ah-58-8v-nissan-leaf&Itemid=605.
- [15] TE Connectivity, cur. *Main contactors*. 2019. URL: <https://www.digikey.ca/product-detail/en/te-connectivity-potter-brumfield-relays/V23720A0002A001/PB1986-ND/5215142>.
- [16] Rogers Corporation, cur. *PORON 4701-30 Very Soft*. 2019. URL: <https://parafix.com/wp-content/uploads/2019/01/rogers-poron-4701-30-15188-04-astm-data-sheet-parafix.pdf>.
- [17] Sony Energy Devices Corporation, cur. *Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information*. 2015.
- [18] cwttd.org, cur. *CWTD Design Notebook*. 2019. URL: http://www.cwttd.org/CWTD_Design_Notebook.html.
- [19] ENEA, cur. *Le batterie al litio*. 2019. URL: <http://www.uttei.enea.it/veicoli-a-basso-impatto-ambientale/file-veicoli-basso-impatto-ambientale/le-batterie-al-litio>.
- [20] Energyskeptic, cur. *Electric Vehicle overview*. URL: <http://energyskeptic.com/2015/electric-vehicle-overview/>.
- [21] Chris Hillseth Enterprises, cur. *About Lithium-Ion Battery Manufacturing*. 2019. URL: <http://chrishillsethenterprises.com/battery/about-lithium-ion-battery-manufacturing/>.
- [22] Energy Storage Association ESA, cur. *Accumulatore nichel-metallo idruro*. 2019. URL: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/solid-electrode-batteries/>.
- [23] Amada Miyachi Europe, cur. *Heat Staking*. 2019. URL: <https://www.amadamiyachi.eu/knowledge-base/heat-staking>.
- [24] EWI, cur. *Ultrasonic Metal Welding for Lithium-Ion Battery Cell*. 2014. URL: <https://ewi.org/ultrasonic-metal-welding-for-lithium-ion-battery-cells-2/>.
- [25] TUFFAK FI, cur. *polycarbonate sheet*. 2018. URL: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/TUFFAK-FI-Data-Sheet>.
- [26] Adventure Rider forum, cur. *Super Soco - Electric (scooter) motorcycle*. 2017. URL: <https://advrider.com/f/threads/super-soco-electric-scooter-motorcycle.1268999/>.
- [27] Endless Sphere Forums, cur. *A123 20Ahr Pouch Cell Battery Build e Info Thread*. 2012. URL: <https://endless-sphere.com/forums/viewtopic.php?t=38761>.
- [28] Energica Motor Company S.P.A. Giampiero Testoni, cur. *Energica Motor Company*. 2017.
- [29] Said Al-Hallaj. *Innovative Hybrid Battery Passive Thermal Management*. Patent. 2011.
- [30] Honda, cur. *Honda to Launch Motorcycle Hybrid System-equipped PCX HYBRID Scooter Pursuing a New Joy of Mobility*. 2019. URL: <https://global.honda/newsroom/news/2018/2180706eng-pcx.html>.
- [31] Hybridscars, cur. *BMW and LG Chem Trump Tesla in Battery Thermal Management*. 2019. URL: <https://www.hybridcars.com/bmw-and-lg-chem-trump-tesla-in-battery-thermal-management/>.

- [32] Indiamart, cur. *12mm Polyimide Kapton Tape Roll*. 2019. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/polyimide-kapton-tape-18901822255.html>.
- [33] Isabellenhuetten, cur. *Isa Weld Precision Resistors*. 2019. URL: <https://www.isabellenhuetten.de/en/precision-and-power-resistors/>.
- [34] KaptonTape, cur. *Technical Datasheet 1, 2 and 5 Mil Kapton Film RoHS Compliant*. 2019. URL: https://www.kaptontape.com/PDF/Kapton_Films_Datasheet.pdf.
- [35] Kokam, cur. *Technical Specification SLPB11543140H5*. 2019.
- [36] Littelfuses, cur. *L50s Series Fuse datasheet*. 2019. URL: <https://www.littelfuse.com/~media/electrical/datasheets/fuses/semiconductor-fuses/littelfuse-fuse-150s-datasheet.pdf>.
- [37] Net Positive LLC, cur. *Tesla boat battery destruction and teardown*. 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mWjG3REOF-M>.
- [38] CRP Meccanica, cur. *Cassa batteria in alluminio mediante fusione e CNC per moto elettriche Energica*. 2019. URL: <https://www.crpmeccanica.com/it/cassa-batteria-alluminio-fusione-cnc-moto-elettriche-energica/>.
- [39] Metra, cur. *Lega di alluminio da estrusione*. 2019. URL: <http://www.metra.it/aluminium/tabellaLeghe/tabellaCatalogo6061.pdf>.
- [40] VRUZEND Micah Toll, cur. *What are Parallel and Series Connections?* 2019. URL: <https://vruzend.com/tech-center/what-are-parallel-and-series-connections/>.
- [41] Zero Motorcycles, cur. *Zero DSR*. 2019. URL: <https://www.zeromotorcycles.com/it/zero-ds>.
- [42] Judith Jeevarajan NASA-JSC, cur. *Validation of Battery Safety For Space Missions*. 2012. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120002724.pdf>.
- [43] EuroCar news, cur. *S400 HYBRID Lithium Ion Battery Technical Drawing*. 2019. URL: <http://www.eurocarnews.com/13/0/327/2039/s400-hybrid-lithium-ion-battery-technical-drawing/gallery-detail.html>.
- [44] Panasonic, cur. *Graphite-PAD*. 2019. URL: <https://industrial.panasonic.com/ww/pgs2/graphite-pad>.
- [45] Panasonic, cur. *Li-ion*. 2007. URL: https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/panasonic_li-ion_handbook.pdf.
- [46] Panasonic, cur. *PGS Graphite Sheets*. 2019. URL: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/thermal-solutions/graphite-sheet/pgs/pgs?list=1>.
- [47] PennState, cur. *A Structure of Cylindrical Lithium ion Batteries*. 2019. URL: http://sites.psu.edu/pxp940/wp-content/uploads/sites/14275/2014/08/Poowanart_Assignment_4_revised.pdf.
- [48] Weston Arthur Hermann Peter Thomas Tennessen Jeffrey C. Weintraub. *Extruded and ribbed thermal interface for use with a battery cooling system*. Patent US 8,758,924 B2. 2014.
- [49] Piaggio, cur. *Hybrid Overview, info batteria e layout*. 2018.
- [50] Du Pont, cur. *Du Pont Nomex 410 Technical Data Sheet*. URL: https://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/electronic-electrical-materials/assets/DPT16_21668_Nomex_410_Tech_Data_Sheet_me03_REFERENCE.pdf.
- [51] Qnovo.Blog, cur. *All you wanted to know about batteries but were afraid to ask*. URL: <http://qnovo.blogspot.com/2014/10/23.html>.

- [52] Randomev, cur. *Pouch cell pack building*. 2012. URL: <https://randomev.wordpress.com/2012/01/21/pouch-cell-pack-building/>.
- [53] Paul Laurain Satish Ketkar e Richard McCormick. *Battery system and method for cooling the battery system*. Patent US 2014/0322563 A1. 2014.
- [54] Brian Charles Hewett Scott Kohn Gene Berdichevsky. *Tunable frangible battery pack system*. Patent US 7,923,144 B2. 2011.
- [55] A123 Energy Solution, cur. *Battery pack Design, Validation and Assembly Guide using A123 Systems Nanophosphate Cells*. URL: https://formula-hybrid.org/wp-content/uploads/A123_AMP20_battery_Design_guide.pdf.
- [56] Joey Stetter. “Can phase change material mitigate thermal runaway in Li-ion packs?” In: *CHARGED ELECTRIC VEHICLES MEGAZINE* (2013). URL: <https://chargedevs.com/features/allcell-technologies%C3%A2%C2%80%99-new-phase-change-thermal-management-material/>.
- [57] Erik C.Yen Taeyoung Han Bahram Khalighi e Shailendra Kaushik. “Li-Ion Battery Pack Thermal Management: Liquid Versus Air Cooling”. In: *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* (2019).
- [58] CarAndBike team, cur. *Tokyo Motor Show 2017: Honda Announces Electric, Hybrid Scooters*. 2017. URL: <https://auto.ndtv.com/news/tokyo-motor-show-2017-honda-announces-electric-hybrid-scooters-1767557>.
- [59] MIT Electric Vehicle Team, cur. *A Guide to Understanding Battery Specifications*. URL: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf.
- [60] MotorBeam Team, cur. *Kawasaki Fully-Faired Electric Bike Patented*. 2019. URL: <https://www.motorbeam.com/kawasaki-electric-bike-patent-fully-faired/>.
- [61] THERMOCOOL, cur. *Cold Plate*. 2019. URL: <https://thermocoolcorp.com/project/cold-plate/>.
- [62] Professoressa Silvia Licoccia Università degli Studi Tor Vergata Didattica web, cur. *Batterie*. URL: <http://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/148670-Chimica-Per-Lenergia>.
- [63] Battery University, cur. *Types of Battery Cells*. URL: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_battery_cells.
- [64] Vespa, cur. *vespa-elettrica-2019*. 2018.
- [65] VRUZEND, cur. *VRUZEND DIY Battery Kit*. 2019. URL: <https://vruzend.com/>.
- [66] Weidmueller, cur. *Cable lugs and tools Addition catalogue*. 2015. URL: <https://www.weidmueller.cz/files/download/download-sekce/product-catalogues/tools/1541050000-cat-tools-addition-en.pdf>.
- [67] L'enciclopedia libera Wikipedia, cur. *Accumulatore agli ioni di litio*. 2019. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_agli_ioni_di_litio.
- [68] L'enciclopedia libera Wikipedia, cur. *Accumulatore di carica elettrica*. 2019. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_di_carica_elettrica.
- [69] L'enciclopedia libera Wikipedia, cur. *Accumulatore litio-polimero*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_litio-polimero.
- [70] Jun Ma Zhenpo Wang e Lei Zhang. *Finite Element Thermal Model and Simulation for a Cylindrical Li-Ion Battery*. Report. 2017.

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va a tutte le persone che hanno contribuito alla stesura e al lavoro di questa tesi. In particolare, colgo l'occasione per ringraziare il Professore Andrea Tonoli e il tutor aziendale Fabrizio Impinna, che hanno dedicato tempo ed energie per guidarmi con professionalità e grande disponibilità.

Ringrazio con gioia i colleghi della *FLAG-MS srl* e i miei compagni tesisti per il supporto tecnico e morale che mi hanno dato in questi ultimi mesi.

I ringraziamenti più grandi vanno ai miei genitori per gli innumerevoli sacrifici che hanno fatto per me in questi anni e per i consigli e le parole di conforto trasmessi nei momenti più difficili. Ai miei fratelli, a mia zia e i miei nonni che hanno sempre creduto in me.

Un ringraziamento di Cuore va alla mia ragazza Valentina, che mi ha accompagnato in questi cinque anni universitari, sostenendomi ogni giorno, con grande affetto e pazienza. Ringrazio specialmente anche la sua famiglia, dai genitori ai nonni, per la costante vicinanza che mi hanno fatto sentire.

Infine, ringrazio tutti gli amici, Giorgio, Christian, Francesco, Giuliano, Tommaso, Vincenzo e tanti altri che hanno condiviso con me questo percorso scolastico, nei momenti di gioia e di sofferenza, vivendo esperienze che non dimenticherò mai.

Oggi, non avrei raggiunto questo traguardo senza di voi, Grazie a tutti.