



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale Ingegneria Aerospaziale
A.A.2023/2024
Sessione di Laurea Aprile 2024

**Studio sulla gestione termica
delle batterie per UAS in
condizioni di freddo estremo**

Relatore:
Dr. Stefano Primatesta

Candidato:
Antonio Malvindi

Sommario

Nel mondo della mobilità elettrica, gli UAS (Unmanned Aircraft Systems), comunemente chiamati droni, vengono utilizzati sempre di più e per molteplici applicazioni, che includono anche la possibilità di trasportare un payload in diverse condizioni atmosferiche, anche nella stessa missione di volo, e in diverse aree geografiche.

Sempre più oggetto di studi è la temperatura delle batterie che condiziona in maniera decisiva la capacità della batteria stessa di fornire energia al sistema propulsivo.

Nel presente studio si procederà all'esame e alla descrizione generale delle cause e degli effetti delle temperature nelle batterie nonché delle diverse soluzioni impiegate nel mondo della mobilità per la gestione termica. Successivamente, si analizzerà all'analisi del comportamento delle batterie a basse temperature e come le stesse potrebbero pregiudicare le prestazioni della batteria di un drone con massa inferiore a 25 kg.

Il confronto tra gli esiti della ricerca effettuata e i test sperimentali condotti da produttori di droni in condizioni ambientali controllate consente di determinare le modalità per ottimizzare la gestione termica delle batterie per questa specifica classe di droni a basse temperature.

Vengono, inoltre, fornite prospettive sulla possibile evoluzione futura di questo studio.

Indice

Sommario.....	3
Indice delle figure	6
Indice delle tabelle.....	8
1 Introduzione.....	10
1.1 Green Mobility	10
1.2 Utilizzo degli UAS (Unmanned Aerial System)	11
1.3 Obiettivo della tesi	12
1.4 Struttura espositiva.....	13
2 Le batterie	14
2.1 Cos'è una batteria.....	14
2.2 Classificazione delle batterie	17
2.2.1 Batterie Primarie	20
2.2.2 Batterie Secondarie.....	21
2.3 I materiali	22
2.4 Le Batterie Ioni-Litio.....	24
2.5 Effetti della temperatura	28
2.5.1 Aging	29
2.5.2 Thermal Runaway	30
3 Battery Thermal Management System (BTMS)	34
3.1 BTMS attivo.....	36
3.1.1 Dispositivi di Riscaldamento Attivi.....	37
3.2 BTMS Passivo	39
3.2.1 Dispositivi di Raffreddamento passivi.....	40
3.3 BTMS Ibrido.....	41
3.4 Risultati test con BTMS	42

4	Effetti delle basse temperature sulle batterie LIBs.....	43
4.1	Introduzione.....	43
4.2	Modello elettro-termico batteria LIBs	44
4.2.1	Modello elettrico di Thévenin per batteria LIBS	45
4.2.2	Modello termico della batteria LIBS	46
4.2.3	Distribuzione termica batteria litio	49
5	Drone e profilo di missione di volo	52
5.1	Introduzione.....	52
5.2	Quadrirotore Q4X	54
5.3	Batterie LiPo 6S	56
5.4	Dati sperimentali.....	57
6	Conclusioni	60
6.1	Warm-up batterie Litio	62
7	Sviluppi futuri.....	63
8	Ringraziamenti	64
9	Bibliografia	65
	Appendice A	74

Indice delle figure

FIGURA 1 - GREEN MOBILITY	10
FIGURA 2 - ILLUSTRATIVA UTILIZZO DRONI PER MONITORAGGIO ALPINO	11
FIGURA 3 - BATTERIA A. VOLTA, 1800	14
FIGURA 4 - ILLUSTRATIVA INTERNO BATTERIA	15
FIGURA 5 - CLASSIFICAZIONE DELLE BATTERIE	17
FIGURA 6 - ILLUSTRAZIONE DELLE DIMENSIONI DELLA BATTERIA PRIMARIE	18
FIGURA 7 - SCHEMA BATTERIA PRIMARIA	20
FIGURA 8 - SCHEMA BATTERIA SECONDARIA	21
FIGURA 9 - EVOLUZIONE DEI MATERIALI NELLE BATTERIE	22
FIGURA 10 - MATERIALI UTILIZZATI PER LE BATTERIE	23
FIGURA 11 - BATTERIA LITIO-IONI.....	24
FIGURA 12 - GRAFICO ENERGIA SPECIFICA-DENSITÀ DI ENERGIA	25
FIGURA 13 – SPIDER CHART DELLE PRESTAZIONI DELLE CELLE AGLI IONI-LITIO CON UTILIZZO DI DIFFERENTI MATERIALI.....	26
FIGURA 14 - RANGE OPERATIVO DELLA BATTERIA IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA.....	28
FIGURA 15 - CONFRONTO DELL'INVECCHIAMENTO DELLA BATTERIA NEL TEMPO A DIVERSI STATI DI CARICA E TEMPERATURE.....	29
FIGURA 16 - SCHEMA A BLOCCHI DELLE CAUSE DEL FENOMENO DEL THERMAL RUNAWAY	30
FIGURA 17 - ESEMPIO DEFORMAZIONE BATTERIA SOTTOPOSTA AD UN CARICO MECCANICO.....	31
FIGURA 18 - NAIL PENETRATION TEST LIBS	31
FIGURA 19 - ANDAMENTO TEMPERATURE DURANTE IL SURRISCALDAMENTO.....	33
FIGURA 20 - PRINCIPALI SOLUZIONI DI BTMS. FONTE: CIC ENERGI GUNE	35
FIGURA 21 - SCHEMA A BLOCCHI BTMS ATTIVO.....	36
FIGURA 22 - SCHEMA A BLOCCHI BTMS PASSIVO.....	39
FIGURA 23 - BTMS IBRIDI CHE UTILIZZANO TUBI DI CALORE ACCOPPIATI CON PIASTRE DI RAFFREDDAMENTO (A) PIASTRE DI TUBI DI CALORE-RAME A FORMA DI “L” E PIASTRE DI RAFFREDDAMENTO A LIQUIDO; (B) BTMS IBRIDO COSTITUITO DA TUBI DI CALORE A FORMA DI L CON MANICOTTI.....	41
FIGURA 24 - RAPPRESENTAZIONE ELETTRICA BATTERIA LIBS.....	45
FIGURA 25 - CALORE REVERSIBILE E IRREVERSIBILE IN FUNZIONE DELLO C-RATE (FONTE : HAIDER ADEL , ZIAD NAMIR ABDELJAWAD: THERMAL MANAGEMENT TECHNOLOGIES OF LITHIUM-ION BATTERIES APPLIED FOR STATIONARY ENERGY STORAGE SYSTEMS).....	48

FIGURA 26 - EFFETTI DELLA VELOCITÀ DI SCARICA C SULLA DISTRIBUZIONE RADIALE DELLA TEMPERATURA DURANTE LA SCARICA (FONTE: IN SITU MEASUREMENT OF RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN CYLINDRICAL LI-ION CELLS)	49
FIGURA 27 – VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA INTERNA CON 1C-RATE COSTANTE DURANTE IL CICLO DI SCARICA A DIVERSE TEMPERATURE AMBIENTE (FONTE: IN SITU MEASUREMENT OF RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTIONS IN CYLINDRICAL LI-ION CELLS)	50
FIGURA 28 - VARIAZIONE DELLA CAPACITÀ A DIVERSE TEMPERATURE AMBIENTE	51
FIGURA 29 - DRONE Q4X (FOTO SITO: HTTPS://WWW.MAVTECH.EU/IT/)	54
FIGURA 30 - ESEMPIO DI BATTERIA LIPO	56
FIGURA 31 - CHAMBER SETUP (FONTE: CHARACTERISATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE PERFORMANCE UNDER EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN A CONTROLLED ATMOSPHERIC FACILITY).....	57
FIGURA 32 - BATTERY TEMPERATURE VARIATION (FONTE: CHARACTERISATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE PERFORMANCE UNDER EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN A CONTROLLED ATMOSPHERIC FACILITY)	58
FIGURA 33 - BATTERY DISCHARGE CURVES (FONTE: CHARACTERISATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE PERFORMANCE UNDER EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN A CONTROLLED ATMOSPHERIC FACILITY).....	59
FIGURA 34 - WARM-UP DEL PACCO BATTERIA ALL'INTERNO DI UNA DOCK-STATION CON SISTEMA DI GESTIONE TERMICA E RICARICA.....	62

Indice delle tabelle

TABELLA 1 - DISPOSITIVI DI RISCALDAMENTO ATTIVI	38
TABELLA 2 - DISPOSITIVI DI RAFFREDDAMENTO PASSIVI	40
TABELLA 3 – TEST SPERIMENTALI PER RISCALDARE UNA BATTERIA DA TEMPERATURE ESTREME A TEMPERATURE DI CORRETTO FUNZIONAMENTO CON DIVERSI DEVICE ESTERNI (FONTE: BATTERY WARM-UP METHODOLOGIES AT SUBZERO TEMPERATURES)	42
TABELLA 4 - CARATTERISTICHE PRINCIPALI DRONE Q4X FONTE HTTPS://WWW.MAVTECH.EU/IT/	55

1 Introduzione

1.1 Green Mobility

Negli ultimi anni nel campo della mobilità si è assistito ad un incremento dell'elettrificazione, dovuto essenzialmente al cambiamento climatico che ha spinto la maggior parte dei governi mondiali e degli enti internazionali ad emanare leggi sempre più stringenti e a favore della green mobility. L'interesse dei grossi produttori di auto nei confronti del settore della green mobility ha, nel tempo, consentito alla ricerca di fare passi in avanti nello sviluppo di batterie e sistemi per la loro gestione in termini di efficienza termica. Lo sviluppo di batterie sempre più performanti ha avuto effetti positivi anche sulla micromobilità, come, ad esempio, monopattini elettrici, bici elettriche e UAS (Unmanned Aircraft System). Tutti questi sistemi utilizzano batterie a litio (LIBs - Lithium-ion Batteries), in quanto caratterizzate da una elevata densità di carica, ma anche dall'importante capacità di erogare grandi quantità di corrente. Tuttavia, di contro, queste batterie necessitano di un sistema di gestione del controllo della temperatura (BTMS - Battery Thermal Management System) in quanto molto sensibili a variazioni di temperatura esterne ed interne.



Figura 1 - Green mobility

L'utilizzo delle batterie LIBs nel campo degli UAS comporta la necessità di occuparsi della gestione termica, in quanto tali sistemi possono trovarsi in diverse condizioni ambientali, anche durante la missione di volo, portando, così, la batteria ad operare in condizioni non ottimali e, quindi, a pregiudicarne il funzionamento.

1.2 Utilizzo degli UAS (Unmanned Aerial System)

Originariamente costruiti per scopi militari, i droni hanno raggiunto, negli ultimi anni, una crescita esponenziale, grazie soprattutto al mercato dell'elettronica di consumo.

Nella distribuzione al grande pubblico sotto forma di piccoli quadricotteri, esacotteri ed ottocotteri hanno trovato impiego, nel tempo, in un'ampia gamma di realtà lavorative ed applicazioni, come, ad esempio, nel campo dell'agricoltura (dove il loro utilizzo consente di monitorare e fertilizzare i raccolti in maniera strategica), nel campo dell'e-commerce (dove si iniziano ad utilizzare per le consegne di prodotti acquistati on-line), ma anche nel campo della logistica (dove possono aiutare enormemente all'interno dei magazzini di grandi dimensioni per la gestione degli inventari).

Tra le tante applicazioni vi è anche quello delle emergenze ambientali e umanitarie, che è sicuramente il più interessante, in quanto in caso di calamità naturali o di primo soccorso, consentono di fare la differenza in un tempestivo intervento e, talvolta, anche tra la vita e la morte.



Figura 2 - Illustrativa utilizzo droni per monitoraggio alpino

Proprio a tal fine vengono utilizzati anche dalle squadre di emergenza del soccorso alpino, sia per individuare il soggetto da assistere, sia per inviare kit di primo soccorso contenenti coperte isotermitiche, acqua, disinfettanti, defibrillatori e altri oggetti di primaria importanza.

Durante la missione di volo, il drone può trovarsi in diverse condizioni ambientali e, pertanto, deve essere in grado di adattarsi e non avere "failure" che ne pregiudicano il funzionamento, fino, nei casi più gravi, alla mancanza di potenza durante il volo.

Di conseguenza, per le batterie dei droni è necessario non solo tenere presente le quote che essi raggiungeranno durante tutto il volo, ma anche considerare gli effetti delle temperature (soprattutto molto basse) al di fuori dei range operativi delle batterie e tale controllo avviene anche grazie ad opportuni sistemi di gestione termica che consentono di garantire il buon funzionamento delle batterie anche in condizioni di freddo estremo.

1.3 Obiettivo della tesi

Il presente elaborato si pone lo scopo di valutare e comprendere la sussistenza dei presupposti per poter installare un sistema di gestione termico della batteria su velivoli senza pilota dotati di batteria Ioni-Litio, che vengono impiegati in condizioni di freddo estremo.

Inoltre ci si pone l'obiettivo di esaminare i vari modelli di gestione termica attualmente in uso nel mondo della mobilità elettrica al fine di poter eventualmente individuare il sistema più compatibile per la predetta categoria di velivoli.

1.4 Struttura espositiva

Il presente elaborato è strutturato nei seguenti capitoli:

- nel capitolo 2 verrà descritto il principio di funzionamento di una batteria e, dopo un breve cenno sulla storia delle batterie, si arriverà a descrivere la batteria agli Ioni-Litio e le diverse tipologie presenti in commercio, descrivendone le principali caratteristiche tra le quali gli effetti della temperatura sulle prestazioni della batteria;
- nel capitolo 3 verrà definito il concetto di gestione termica delle batterie e descritte le diverse tecnologie e soluzioni adottate nel campo della mobilità elettrica;
- nel capitolo 4 verrà affrontato il tema degli effetti della temperatura sulle batterie LIBs, prendendo come esempio alcuni modelli matematici che descrivono l'andamento elettro-termico della batteria con l'obiettivo di capire come varia la temperatura al suo interno nel corso del tempo;
- nel capitolo 5 verrà analizzata la prova sperimentale in ambiente controllato condotto da Mavtech S.r.l. su un drone da loro sviluppato ed utilizzato per missioni di soccorso alpino;
- nel capitolo 6 verranno formulate le conclusioni del presente elaborato e approfondite alcune soluzioni a completezza di informazioni;
- nel capitolo 7 verranno ipotizzati possibili risvolti successivi e suggerimenti per poter proseguire gli studi e verificare quanto affrontato in questo elaborato.

2 Le batterie

2.1 Cos'è una batteria

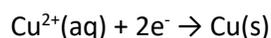
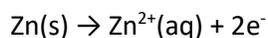
La batteria viene definita come un dispositivo per l'accumulo di energia elettrica mediante processo chimico con conseguente rilascio controllato sotto forma di corrente continua.



Figura 3 - Batteria A. Volta, 1800

La prima batteria è stata inventata, nel 1800 circa, da Alessandro Volta, il quale si è basato sugli studi di Luigi Galvani.

In particolare, Volta, per la sua batteria, utilizzò un disco di zinco e un disco di rame, che, separati tra loro da un feltro o da un cartone imbevuto in soluzione acida (costituita da acqua e acido solforico), se collegati esternamente da un conduttore, generano una differenza di potenziale che crea un movimento di elettroni dall'anodo al catodo. L'energia chimica che si sviluppa durante le reazioni fra i metalli e la soluzione acida è quella necessaria per consentire il flusso di corrente.



Si definiscono:

- **Conduttore di prima classe o conduttori elettronici:** materiali che permettono il movimento di elettroni in una o più direzioni;
- **Conduttore di seconda classe o conduttori ionici:** soluzioni o materiali che permettono il movimento di ioni in una o più direzioni;
- **Ione:** atomo o molecola con carica elettrica positiva o negativa (es. sale da cucina NaCl → Na⁺ + Cl⁻);
- **Cella elettrochimica:** due conduttori di prima classe separati da un conduttore di seconda classe.

In generale, si può affermare che, all'interno di una batteria, vi sono una o più celle elettrochimiche connesse tra loro all'interno un involucro metallico (*case*) con il quale l'utente finale interagisce.

Il *case* esterno può essere di diverse forme secondo gli standard internazionali. La forma della batteria può, ad esempio, essere:

- cilindrica;
- prismatica a base rettangolare;
- a sacchetto.

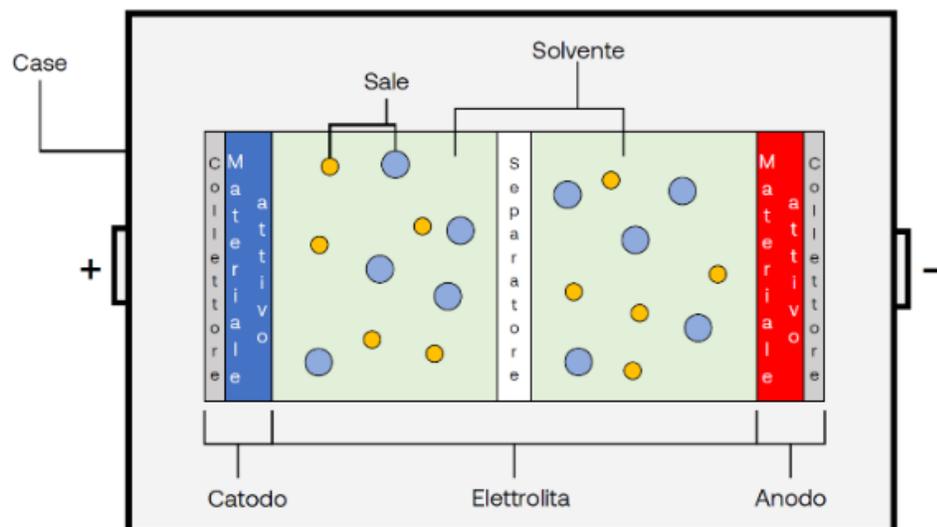


Figura 4 - Illustrativa interno batteria

La batteria si caratterizza per le dimensioni, le caratteristiche fisiche, la chimica utilizzata, le modalità di connessione dei terminali, ecc., rendendo necessario il rispetto di norme di utilizzo e sicurezza, tra le quali il Regolamento UE 2023/1542 (relativo alle batterie e ai rifiuti di batterie), ove viene previsto che le batterie immesse nel mercato europeo debbano essere sicure e sostenibili, prevenendo e riducendo gli effetti negativi sull'ambiente e sulla salute umana, in linea con i principi dell'economia circolare della strategia di crescita dell'Europa "Green Deal europeo" dell'11 dicembre 2019 finalizzata al raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050.

2.2 Classificazione delle batterie

Una delle principali classificazioni delle batterie è determinata dal numero di utilizzi che può essere fatto della stessa batteria, ovvero se la batteria è “monouso” se progettata per un singolo utilizzo oppure è “ricaricabile” se può essere ricaricata più volte.

Più nello specifico, in sintesi, la batteria “monouso” è una batteria primaria, ovvero può essere scaricata una sola volta, in quanto la reazione chimica non è reversibile, mentre la batteria “ricaricabile” è una batteria secondaria ove la reazione chimica è reversibile.

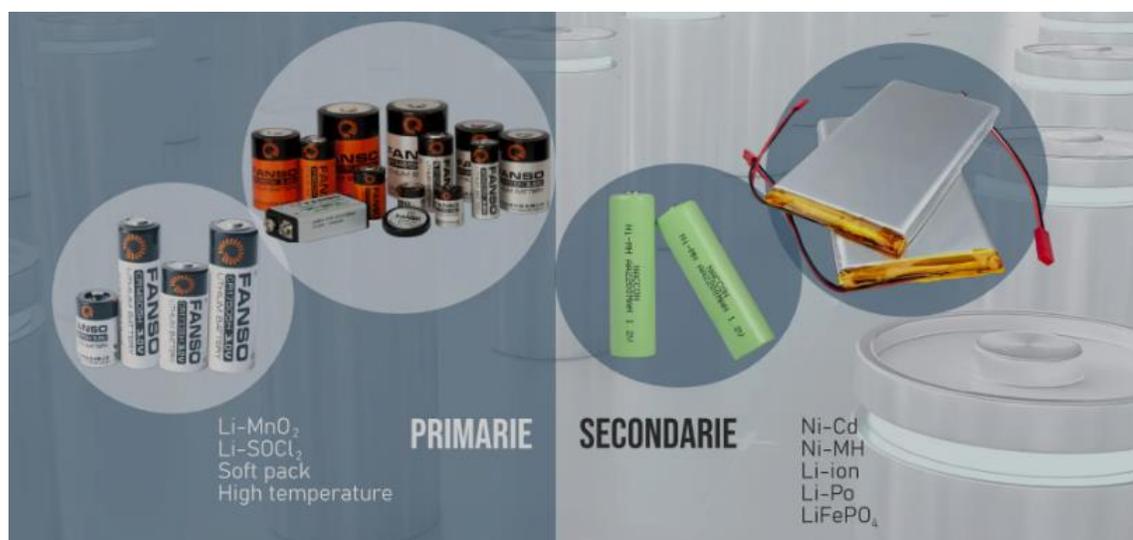


Figura 5 - Classificazione delle batterie

Esempi di batterie primarie sono:

1. **Batterie Alcaline:** utilizzano un elettrolita alcalino come idrossido di potassio. Sono comunemente usate in dispositivi come telecomandi, orologi, giocattoli e molti altri.
2. **Batterie al Litio Primarie:** Queste batterie utilizzano un anodo di litio e un catodo di manganese o di solfuro di titanio. Sono note per la loro lunga durata e per la capacità di mantenere la carica per lunghi periodi di inattività. Sono spesso usate in dispositivi come orologi, apparecchi fotografici, elettronica portatile e molto altro.
3. **Batterie al Zinco-Carbonio:** sono tra le batterie primarie più economiche e comuni. Sono usate in dispositivi come telecomandi, torce elettriche, giocattoli e altro ancora.

4. **Batterie al Manganese:** batterie che usano un elettrolita di permanganato di potassio e sono utilizzate in dispositivi a basso consumo come orologi, giocattoli, radio elettroniche e altri apparecchi.
5. **Batterie al Cloruro di Zinco:** batterie che hanno una bassa resistenza interna e sono utilizzate in dispositivi ad alto consumo come flash elettronici, fotocamere digitali, giocattoli motorizzati e altro.

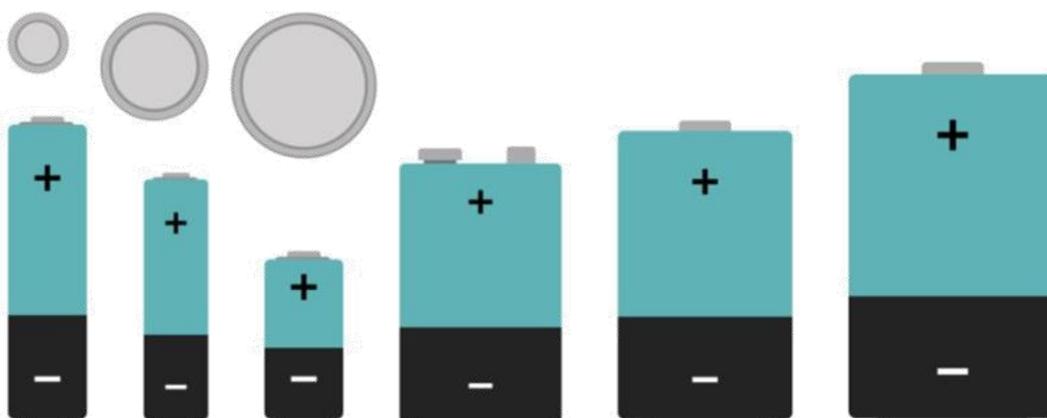


Figura 6 - Illustrazione delle dimensioni della batteria primarie

Esempi di batterie secondarie:

1. **Batterie al Piombo (Pb-Acid):** batterie comunemente utilizzate nelle automobili, possono essere ricaricate molte volte ma sono pesanti e hanno una densità energetica moderata.
2. **Batterie al Nichel-Cadmio (NiCd):** molto comuni, ma meno popolari ora a causa della presenza di cadmio tossico, vengono utilizzate in strumenti elettrici, come trapani elettrici e apparecchiature di emergenza ma presentano una tendenza alla "memoria" che può influire sulla capacità nonostante una buona capacità di scarica ad alta corrente.

3. **Batterie al Nichel-Metallo-Ion (NiMH):** sono diventate più popolari al posto delle NiCd per via della minore tossicità, vengono utilizzate in telefoni cellulari, macchine fotografiche digitali, elettronica di consumo grazie anche al fatto che hanno una tendenza minore alla "memoria" rispetto alle NiCd.
4. **Batterie agli ioni di Litio (Li-ion):** molto comuni in telefoni cellulari, laptop, veicoli elettrici, ecc. Hanno un'alta densità energetica e bassa autoscarica ma richiedono circuiti di protezione per evitare sovraccarichi e scariche profonde.
5. **Batterie agli ioni di Litio-Polimero (Li-Po o Li-Poly):** utilizzate in dispositivi più sottili dove lo spazio è limitato sono più leggere e più sottili rispetto alle batterie Li-ion. Ma molto sensibili alle condizioni di carica e scarica.
6. **Batterie al sale fuso (Sodium-ion):** presentano costo potenzialmente inferiore rispetto alle Li-ion e possono essere utilizzate in grandi sistemi di stoccaggio dell'energia e per applicazioni su larga scala.
7. **Batterie a flusso (Flow Battery):** vengono utilizzate per lo stoccaggio su larga scala di energia da fonti rinnovabili come il solare e l'eolico. Sono composte da elettroliti liquidi contenuti in serbatoi esterni ed hanno una buona capacità di immagazzinare grandi quantità di energia.
8. **Batterie al Litio-Solfo (Li-S):** hanno un'alta densità energetica, potenzialmente molto più leggere e più economiche delle attuali Li-ion. Sono ancora in fase di sviluppo e non ampiamente commercializzate.

2.2.1 Batterie Primarie

Come accennato, le batterie primarie sono tutte quelle batterie dove le reazioni chimiche interne sono irreversibili, ossia non è possibile invertire la reazione semplicemente fornendo energia alla pila e, dunque, divengono inutilizzabili una volta esaurita la carica.

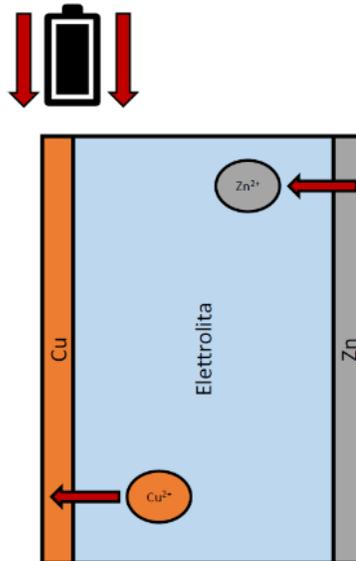


Figura 7 - Schema batteria primaria

I componenti principali di questo tipo di batteria sono l'elettrolita e gli elettrodi (anodo e catodo) dove l'anodo (componente primario) passa in soluzione sotto forma di ione, liberando elettroni per alimentare il *device* connesso. Lo ione del catodo presente nella soluzione, sfrutta i due elettroni liberati dall'anodo, passando così nello stato solido.

Il principale vantaggio di questa batteria è che, se non è connessa ad un circuito elettrico esterno, mantiene le sue condizioni di carica ("shelf life") e, pertanto, può essere utilizzata in qualsiasi momento con immediata disponibilità di energia.

Inoltre, in commercio sono disponibili in varie taglie e misure ad un basso costo d'acquisto. Tuttavia, dall'altra parte, non essendo ricaricabili, hanno un ciclo di vita breve con un conseguente impatto ambientale non indifferente.

Pro

- Durata di conservazione («Shelf life»)
- Immediata disponibilità di energia
- Varie taglie e misure
- Basso costo d'acquisto

Contro

- Non ricaricabili
- Durata di ciclo breve
- Alto impatto ambientale

2.2.2 Batterie Secondarie

Le batterie secondarie o “ricaricabili” si definiscono come dei dispositivi elettrochimici che, a differenza delle batterie primarie o “usa e getta”, possono essere caricate e scaricate molte volte. Il sistema di funzionamento è lo stesso descritto per la batteria primaria, dove, in un verso di reazione, si genera un flusso di elettroni in maniera spontanea per alimentare il dispositivo collegato (“ciclo di scarica”) e, nell’altro verso, cedendo energia alla batteria, il flusso di elettroni percorre il tragitto nel senso opposto riportando la batteria nel suo stato iniziale di energia immagazzinata (“ciclo di carica”).

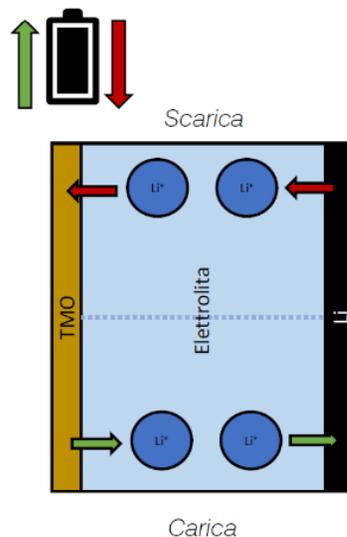
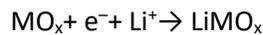


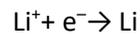
Figura 8 - Schema batteria secondaria

Di seguito, si riporta un esempio di reazione elettrochimica di una batteria secondaria Litio-Ioni:

Ciclo di scarica:



Ciclo di carica:



Pro

- Ricaricabile molte volte
- Basso costo di manutenzione e mantenimento
- Alta potenza di scarica
- Modulari e adatte a sistemi di grandi dimensioni (auto, aerospace)
- Minor impatto ambientale

Contro

- Durata di vita breve
- Eticità e materiali rari
- Alto costo di acquisto
- Necessario sistema di gestione e controllo

2.3 I materiali

La capacità di immagazzinare energia nel tempo è una delle caratteristiche principali della batteria ed è direttamente collegata ai materiali utilizzati nella sua realizzazione.

Osservando l'evoluzione tecnologica è possibile notare una relazione tra l'efficienza dei sistemi elettronici o elettrici e la chimica delle batterie.



Figura 9 - Evoluzione dei materiali nelle batterie

Come illustrato dalla *figura 9*, si è passati dalla prima cella Pb-acido fino ad arrivare alle celle per batterie Ioni-Litio con un ampio sviluppo e diffusione del suo utilizzo, data la sua alta efficienza energetica e di facile produzione, salvo alcune accortezze.

I materiali tipicamente utilizzati per le batterie secondarie sono:

- per il catodo (elettrodo positivo): ossidi di metalli di transizione (TMOs), come LCO, LMO, NCA, NCM, ecc.;
- per l'anodo (elettrodo negativo): Grafite, Silicio, Litio metallico, TMOs.

The figure shows a periodic table of elements. A green box highlights the transition metals, including Scandium (Sc) through Zinc (Zn) in the first row, and Yttrium (Y) through Cadmium (Cd) in the second row. A blue box highlights Lithium (Li) and Silicon (Si). Below the main table is the lanthanide and actinide series.

1	3,008																	2	4,003																
	H																		He																
3	6,941	4	9,012													5	10,8	6	12,01	7	14,01	8	16,00	9	19,00	10	20,18								
	Li		Be														B		C		N		O		F		Ne								
	Litio		Berillio														Boro		Carbonio		Azoto		Ossigeno		Fluoro		Neon								
11	22,99	12	24,31													13	26,98	14	28,09	15	30,97	16	32,07	17	35,45	18	39,95								
	Na		Mg														Al		Si		P		S		Cl		Ar								
	Sodio		Magnesio														Aluminio		Silicio		Fosforo		Zolfo		Cloro		Argon								
19	39,10	20	40,08	21	44,96	22	47,87	23	50,94	24	52,00	25	54,94	26	55,85	27	58,93	28	58,80	29	63,55	30	65,37	31	69,72	32	72,64	33	74,92	34	78,96	35	79,91	36	83,80
	K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr
	Potassio		Calcio		Scandio		Titanio		Vanadio		Cromo		Manganese		Ferro		Cobalto		Nichel		Rame		Zinco		Gallio		Germanio		Arsenico		Selenio		Bromo		Kriptone
37	85,47	38	87,62	39	88,91	40	91,22	41	92,91	42	95,94	43	98,91	44	101,1	45	102,9	46	106,4	47	107,9	48	112,4	49	114,8	50	118,7	51	121,8	52	127,6	53	126,9	54	131,3
	Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe
	Rubidio		Stronzio		Ittrio		Zirconio		Niobio		Moibdeno		Tecnecio		Rutenio		Rodio		Palladio		Argento		Cadmio		Indio		Stagno		Antimonio		Tellurio		Iodio		Xenone
55	132,9	56	137,3	57	138,9	72	178,5	73	180,9	74	183,8	75	186,2	76	190,2	77	192,2	78	195,1	79	197,0	80	200,6	81	204,4	82	207,2	83	209,0	84	[209]	85	[210]	86	[222]
	Cs		Ba		La		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn
	Cesio		Bario		Lantanio		Hafnio		Tantalio		Tungsteno		Reniio		Osmio		Iridio		Platino		Oro		Mercurio		Tallio		Piombo		Bismuto		Polonio		Astatato		Radone
87	[223]	88	[226]	89	[227]	104	[261]	105	[262]	106	[266]	107	[264]	108	[265]	109	[268]	110	[271]	111	[272]	112	[285]	113	[284]	114	[289]	115	[289]	116	[291]	117	[110]	118	[314]
	Fr		Ra		Ac		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Cn		Nh		Fl		Mc		Lv		Ts		Og
	Francio		Radio		Actinio		Rutherfordio		Dubnio		Seaborgio		Bohrio		Hassio		Meltnero		Darmstadtio		Roentgenio		Copernicio		Nihonio		Fleborio		Moscovio		Livermorio		Tennesio		Oganesson

58	140,1	59	140,9	60	144,2	61	(145)	62	150,4	63	152,0	64	157,3	65	158,9	66	162,5	67	164,9	68	167,3	69	168,9	70	173,0	71	175,0
	Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu
	Cerio		Praseodimio		Neodimio		Promezio		Samario		Europio		Gadolino		Terbio		Diprosio		Osmio		Erbio		Tulio		Itterbio		Luterio
90	232,0	91	231,0	92	238,0	93	(237)	94	(244)	95	(243)	96	(247)	97	(247)	98	(251)	99	(252)	100	(257)	101	(258)	102	(259)	103	(262)
	Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr
	Torio		Protattinio		Uranio		Nettunio		Plutonio		Americio		Curio		Berkelio		Californio		Einsteinio		Fermio		Mendelevio		Nobelio		Laurencio

Figura 10 - Materiali utilizzati per le batterie

2.4 Le Batterie Ioni-Litio

Le batterie agli ioni di litio sono batterie secondarie, ossia ricaricabili, che hanno come principale componente per il catodo il Litio metallico.

Per aumentare le performance in termini di durata, capacità o riduzione dei costi, si aggiungono metalli secondari, come, ad esempio, il cobalto o manganese.

La batteria a litio può essere rappresentata come nella *figura 11*.

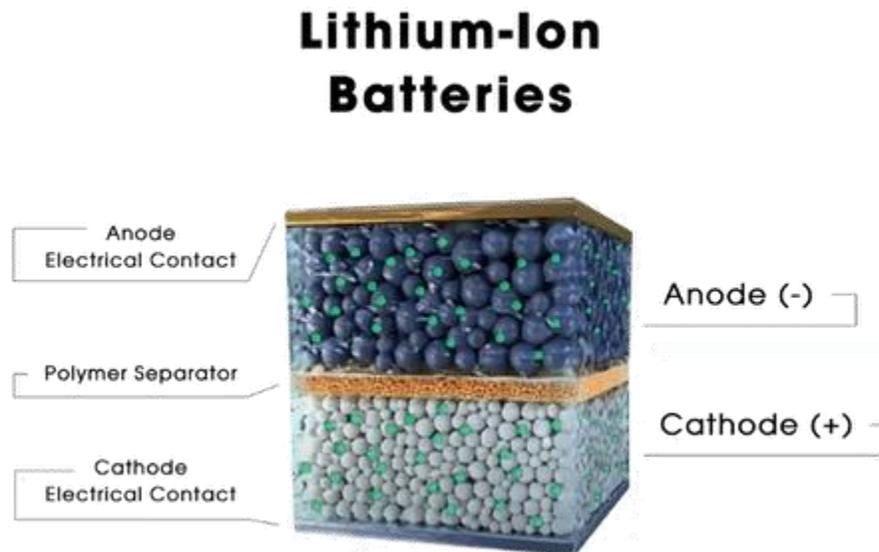


Figura 11 - Batteria Litio-Ioni

Come accennato in precedenza, i materiali utilizzabili sono:

Anodo:

Grafite
Grafite/Si
LTO

Catodo:

LCO
LMO
LFP
NMC
MCA

La relazione tra la densità di energia (che definisce quanta carica volumetrica ha a disposizione la batteria) e la sua energia specifica (che indica la sua capacità di immagazzinare energia in funzione del peso) consente di avere una panoramica dell'evoluzione delle batterie e, in particolare, delle batterie Ioni-Litio.

Nello specifico, le batterie agli Ioni-Litio hanno avuto un'importante evoluzione grazie all'introduzione di materiali all'interno del catodo, i quali hanno conferito alla batteria stessa un aumento della propria capacità di immagazzinare energia sia in ragione della natura del materiale introdotto sia a seguito dell'interazione di tale materiale con il litio che può migliorare la cinetica della reazione elettrochimica.

PANORAMICA TIPI DI CELLE ELETTRICHE

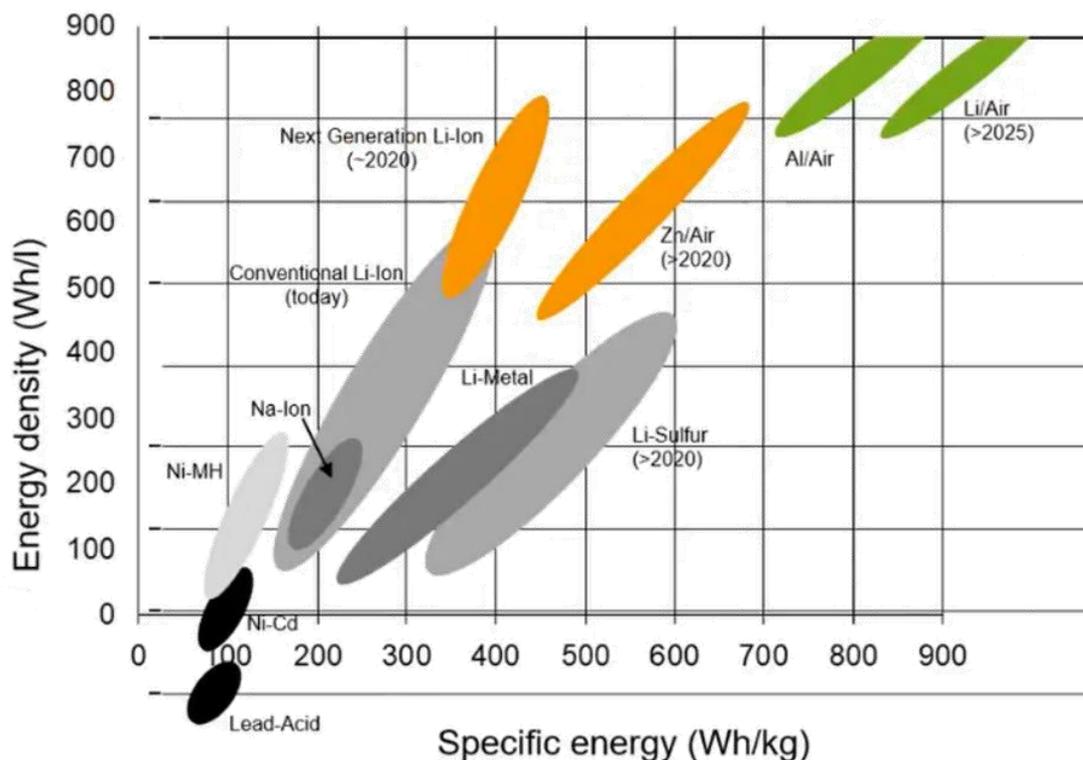


Figura 12 - Grafico energia specifica-densità di energia

Come rilevato, i diversi materiali utilizzati nella struttura della cella elettrochimica influiscono sulle prestazioni della cella stessa.

Le celle vengono classificate in base ai seguenti criteri:

- capacità;
- potenza specifica;
- sicurezza;
- durata;
- costi.

Il grafico a ragno sotto riportato (*figura 13*) mostra in maniera visiva il comportamento delle diverse batterie in funzione dei criteri sopra elencati.

Come indicato, la cella raggiunge la massima capacità possibile nel caso di presenza di Nichel all'interno del catodo (NMC e NCA), anche se, dall'altro lato, il livello di sicurezza di queste due chimiche risulta inferiore se confrontato con le LFP o LMO.

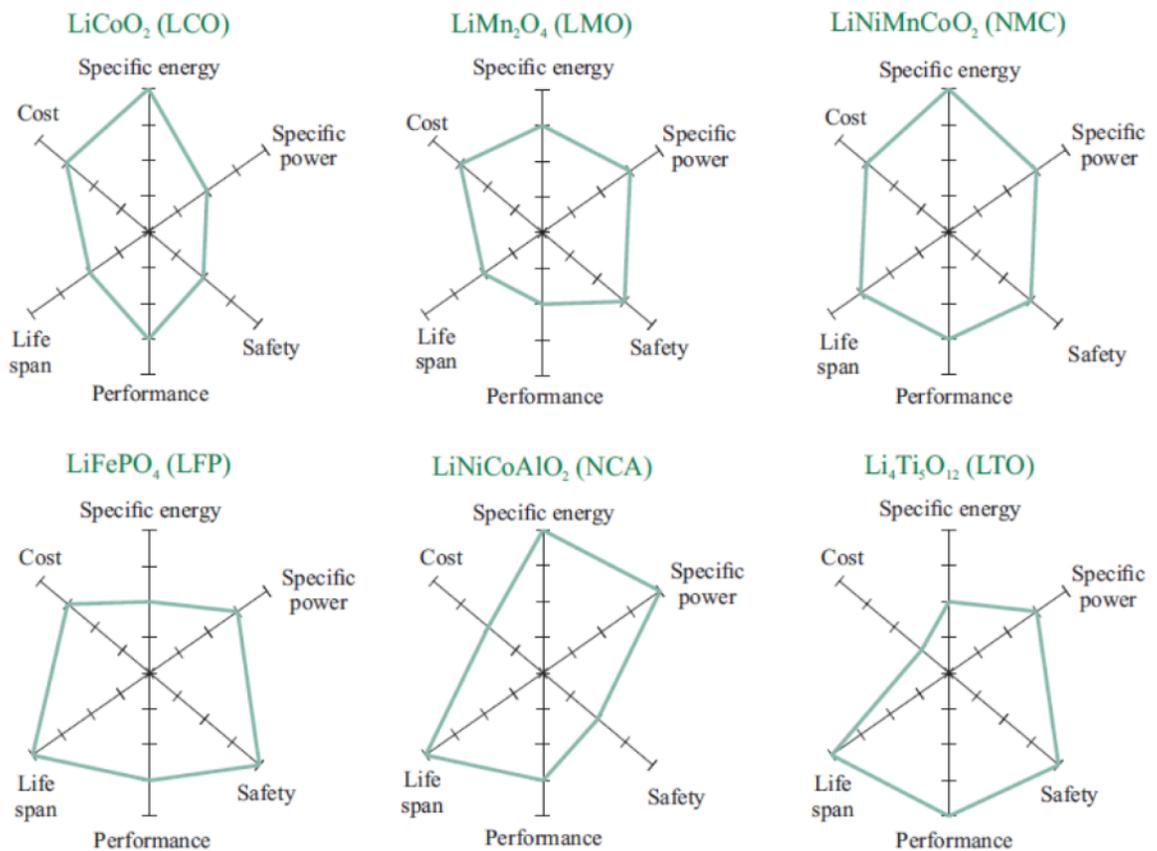


Figura 13 – Spider chart delle prestazioni delle celle agli Ioni-Litio con utilizzo di differenti materiali

Di seguito vengono descritte le principali celle in utilizzo:

- **NMC (LiNiMnCoO₂)**: grazie alla combinazione di nichel, manganese e cobalto il catodo assume caratteristiche di densità di energia e durata di vita elevate a fronte di un minore costo dei materiali per il basso contenuto di cobalto. La capacità specifica raggiunta dalla batteria è di 180 mAh/g;
- **LCO (LiCoO₂)**: è molto diffusa nelle celle per dispositivi elettronici portatili. Lo svantaggio maggiore è dato dall'instabilità del materiale, che può portare a problemi in termini di sicurezza;
- **NCA (LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂)**: alcuni atomi di cobalto vengono sostituiti da nichel, consentendo, così, una riduzione del costo. L'alluminio, inoltre, determina benefici in termini di stabilità chimica e, dunque, di sicurezza della cella rispetto alla LCO. La capacità specifica raggiunta è di 200 mAh/g;
- **LFP (LiFePO₄)**: vengono utilizzati materiali di facile reperimento, hanno costi minori rispetto alle batterie tradizionali costano meno delle batterie tradizionali, hanno una lunga durata e le batterie di ultima generazione arrivano anche ad una capacità specifica di 110 mAh/g.

2.5 Effetti della temperatura

La reazione chimica e i materiali utilizzati all'interno delle batterie sono fortemente influenzati dalla temperatura e, di conseguenza, anche la conducibilità ionica degli elettrodi e degli elettroliti ne viene influenzata.

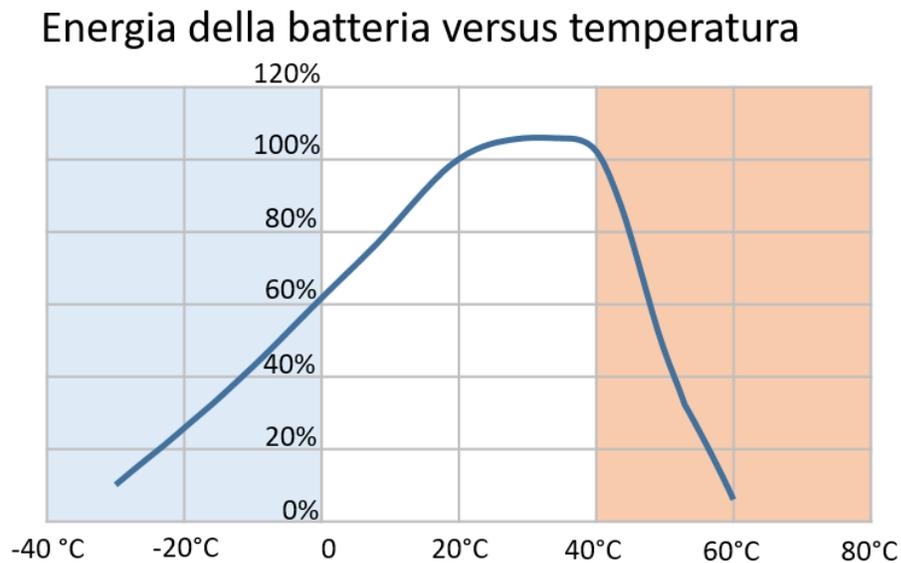


Figura 14 - Range operativo della batteria in funzione della temperatura

Le criticità legate alle temperature possono verificarsi ogni qualvolta ci si trovi al di fuori degli intervalli consigliati dai produttori di batterie, sia ad alte che a basse temperature. L'intervallo di temperatura influisce sulla potenza e sulla durata della batteria. Allo stesso tempo, la distribuzione della temperatura dovrebbe essere uniforme al fine di garantire le prestazioni della batteria per tutta la vita. I fenomeni principali sono sostanzialmente di due tipi, ovvero "Aging" e "Thermal Runaway", i quali riducono la durabilità e le prestazioni della batteria, con il rischio, in casi estremi, di fenomeni di degassing o esplosione della batteria.

In generale, per poter garantire le prestazioni e la durata del ciclo, la temperatura deve essere controllata tra i 20°C e i 40°C.

La distribuzione della temperatura deve, invece, essere controllata per preservare la sicurezza e la durata della batteria.

2.5.1 Aging

Il fenomeno noto come “Aging” non solo influisce sulle prestazioni della batteria riducendone la durabilità, ma, soprattutto, all’aumento della temperatura operativa oltre quella ottimale, ne accelera il processo di invecchiamento, portando alla degradazione.

In linea generale questo fenomeno comprende due tipologie di invecchiamento, ovvero il “cycle aging” e il “calendar aging”, le quali si verificano sempre in combinazione tra loro a causa della complessa natura e del funzionamento delle celle.

La velocità con la quale diminuisce la capacità della batteria dipende da una serie di fattori, tra i quali il tipo di batteria, la velocità di carica e scarica, le temperature alle quali è esposta e il numero di cicli ai quali è stata sottoposta.

A differenza della perdita di capacità, la resistenza interna di una batteria aumenta nel tempo, determinando una riduzione della potenza.

Nel complesso, a temperature e SOC (State Of Charge) più elevati, le batterie invecchiano più velocemente.

Nella *figura 15* si può notare come all’aumento medio di 10°C può dimezzare la durata di vita di una batteria.

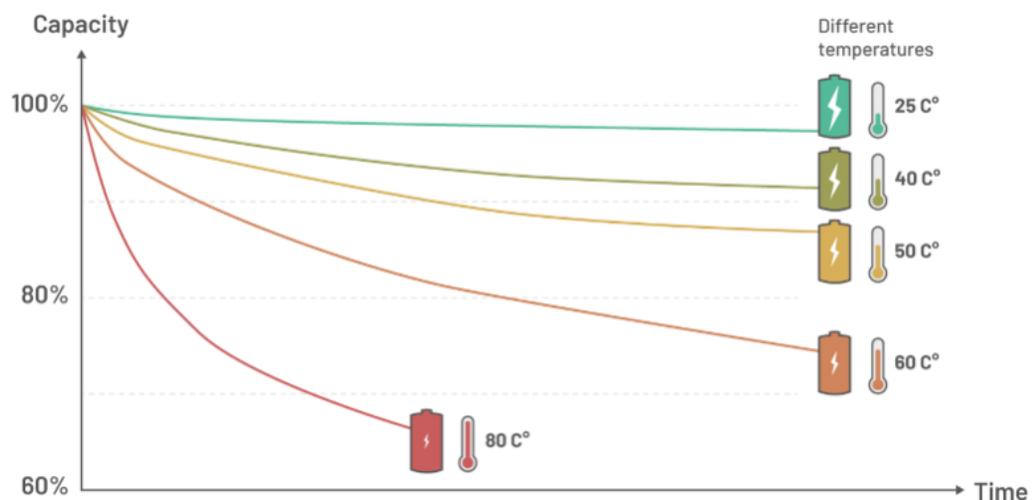


Figura 15 - Confronto dell'invecchiamento della batteria nel tempo a diversi stati di carica e temperature. Fonte: Accure.net

2.5.2 Thermal Runaway

Il fenomeno noto come “Thermal Runaway”, invece, si verifica quando, a causa delle elevate temperature di funzionamento, si innescano delle reazioni esotermiche nelle batterie. Tali reazioni rilasciano un quantitativo di calore maggiore, determinando l’ulteriore aumento della temperatura all’interno delle batterie. Quando questa generazione incontrollata di calore supera la resistenza termica delle batterie, si possono verificare incendi e, nei casi peggiori, esplosioni con conseguenti implicazioni per la sicurezza.

In generale, la fuga termica può essere determinata da tre tipi di cause principali: meccaniche, elettriche o termiche.

La probabilità che questi rischi si verifichino varia a seconda della chimica, della progettazione e delle condizioni operative

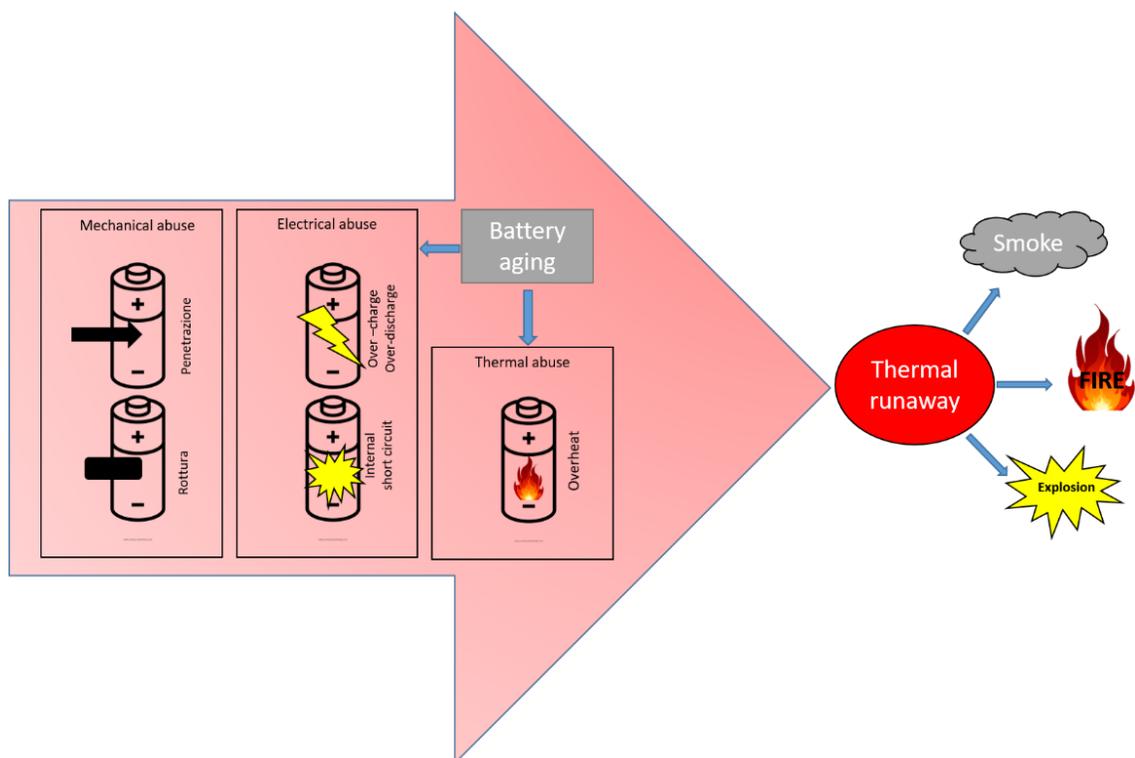


Figura 16 - Schema a blocchi delle cause del fenomeno del thermal runaway

2.5.2.1 Rottura meccanica

La rottura meccanica della batteria avviene per il suo schiacciamento oppure dalla sua perforazione o penetrazione da parte di un oggetto esterno. Per tale ragione, ogni qualvolta un veicolo elettrico a batteria subisce un incidente o un qualsivoglia dispositivo a batteria subisce un urto, è necessario prestare particolare attenzione e adottare le opportune cautele.

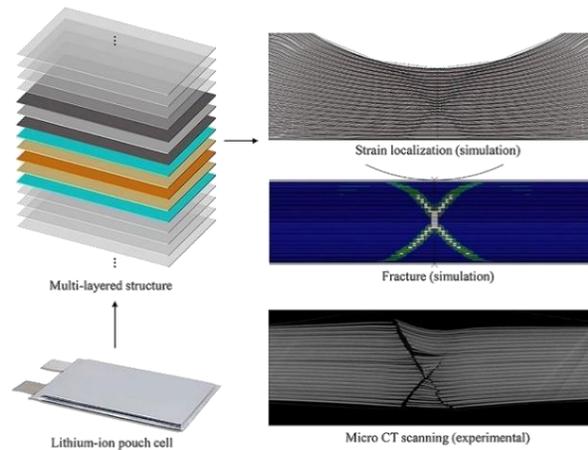


Figura 17 - Esempio deformazione batteria sottoposta ad un carico meccanico

In caso di deformazione si può verificare la rottura del separatore polimerico, avente la funzione essenziale di impedire agli elettrodi positivo e negativo di entrare in contatto tra loro generando un cortocircuito interno che provoca un improvviso aumento della corrente interna che sprigiona una quantità di calore sufficiente a portare all'incendio della batteria.

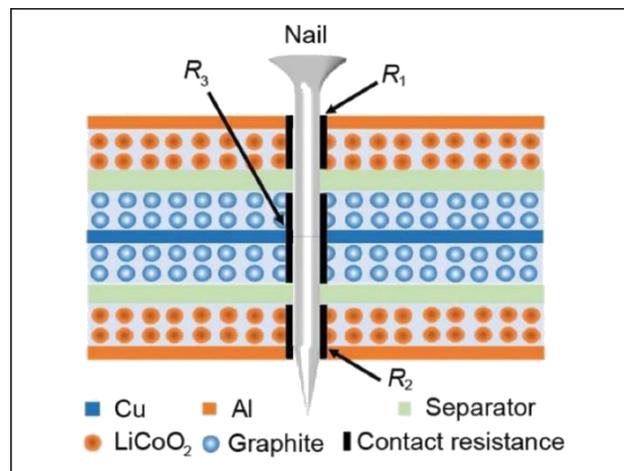


Figura 18 - Nail penetration test LiBS

2.5.2.2 Guasto elettrico

Il guasto elettrico può configurarsi come sovraccarico oppure scarica eccessiva.

2.5.2.2.1 Sovraccarico

Nel caso di normale funzionamento della batteria, gli ioni di litio si spostano dal catodo all'anodo e l'operazione termina nel momento in cui tutti (o quasi tutti) gli ioni di litio hanno compiuto questa migrazione.

L'anodo della batteria è comunemente in grafite placcato al litio al fine di evitare il contatto diretto con l'elettrolita, in quanto l'interazione tra i due è termodinamicamente instabile.

Nel caso, invece, di batteria sovraccarica (ovverosia carica una singola cella a $> 4,2$ V), la grafite si satura di ioni litio e non può più ospitarne all'interno della propria struttura. Continuando, poi, ad applicare una corrente di carica, lo spessore del litio presente sulla superficie della grafite aumenta, portando la batteria al cortocircuito.

Inoltre, parte del litio presente nel catodo inizia a disciogliersi nell'elettrolita per bilanciare il fabbisogno energetico della reazione elettro-chimica, andando a corrodere il catodo stesso e ad aumentare il potenziale della cella, rendendo instabile la struttura atomica dell'atomo.

L'effetto principale del sovraccarico è la formazione di gas all'interno della batteria con deformazioni meccaniche del case esterno e, in casi peggiori, la fuoriuscita di gas tossici.

2.5.2.2.2 Scarica eccessiva

Nell'ipotesi di scarica eccessiva (ovverosia scarica di una singola cella a $< \sim 2,7$ V), tutto il litio presente sulla grafite viene rimosso, ma, continuando ad applicare una corrente di scarica, la placcatura dell'anodo può danneggiarsi, mettendolo in contatto diretto con l'elettrolita.

In questa fase, l'anodo si scioglie all'interno dell'elettrolita e, durante la fase di carica, ovverosia quando gli ioni di litio migrano verso di esso, si creano dei detriti all'interno della soluzione elettrolitica che possono mettere in cortocircuito la batteria stessa.

2.5.2.2.4 Surriscaldamento

Nel caso di rottura meccanica o di guasto elettrico, la temperatura all'interno della batteria aumenta fino a causare lo scoppio della stessa.

In particolare, l'incremento di temperatura all'interno della batteria porta alla decomposizione del separatore, consentendo all'elettrolita di entrare in contatto con nuove superfici di grafite.

La decomposizione del separatore è generalmente esotermica e determina un'ulteriore generazione di calore. Se la batteria continua a riscaldarsi superando i 130°C, il separatore polimerico, spesso costituito da polietilene o polipropilene, può sciogliersi portando l'anodo e il catodo a toccarsi, provocando un cortocircuito.

Il cortocircuito genera una notevole quantità di calore (a seconda dello stato di carica) e, al di sopra dei 200 °C, l'elettrolita e il catodo possono decomporsi, dando luogo alla formazione di ossigeno (altamente infiammabile) e di componenti come l'acido fluoridrico, che è particolarmente tossico.

La *figura 19* illustra l'andamento delle temperature all'interno della batteria con il passare del tempo durante il surriscaldamento. L'energia rilasciata dalla decomposizione del materiale combinata alla velocità di reazione ha un grosso impatto sulla sicurezza della batteria stessa.

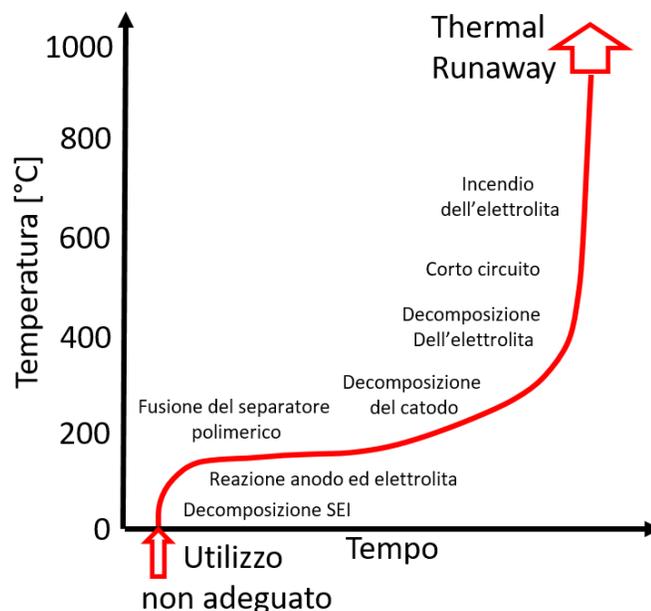


Figura 19 - Andamento temperature durante il surriscaldamento

3 Battery Thermal Management System (BTMS)

Le batterie in commercio, durante la loro vita, possono funzionare in diverse condizioni ambientali e, come rilevato nei precedenti capitoli, la temperatura ha un ruolo cruciale per il ciclo di vita della batteria.

Un altro aspetto molto importante è prevenire l'insorgere di fenomeni che possono causare incrementi improvvisi di corrente e, quindi, di calore. Per tale ragione, nel corso degli anni, sono stati effettuati sempre più studi e applicazioni per la gestione termica con lo scopo di far lavorare in sicurezza le batterie tra i -40°C e i 60°C al fine di garantire le loro massime prestazioni, che, secondo le indicazioni dei produttori si hanno tra i 15°C e i 35°C e che non vi sia una differenza superiore a 5°C tra le celle.

In senso generale, il BTMS può essere definito come un componente dedicato alla supervisione e alla gestione in modo efficiente della temperatura del pacco batterie.

Difatti, una corretta gestione termica è fondamentale per garantire l'efficienza, la durata e la sicurezza delle batterie stesse e, di conseguenza, anche del velivolo/veicolo sul quale sono equipaggiate.

Esistono diverse tipologie di applicazioni del BTMS, raggruppabili in tre grandi famiglie:

1. BTMS Attivo: la gestione termica viene effettuata attraverso un circuito di controllo che governa lo scambiatore di calore;
2. BTMS Passivo: la gestione termica viene effettuata direttamente con lo scambiatore di calore;
3. BTMS Ibrido: la gestione termica viene effettuata attraverso scambiatori di calore autoregolanti.

La *figura 20* alla seguente pagina illustra le principali soluzioni di Battery Thermal Management System suddivise nelle varie sottocategorie, in modo da dare al lettore una panoramica generale al fine di comprendere meglio le possibili soluzioni ad oggi in uso

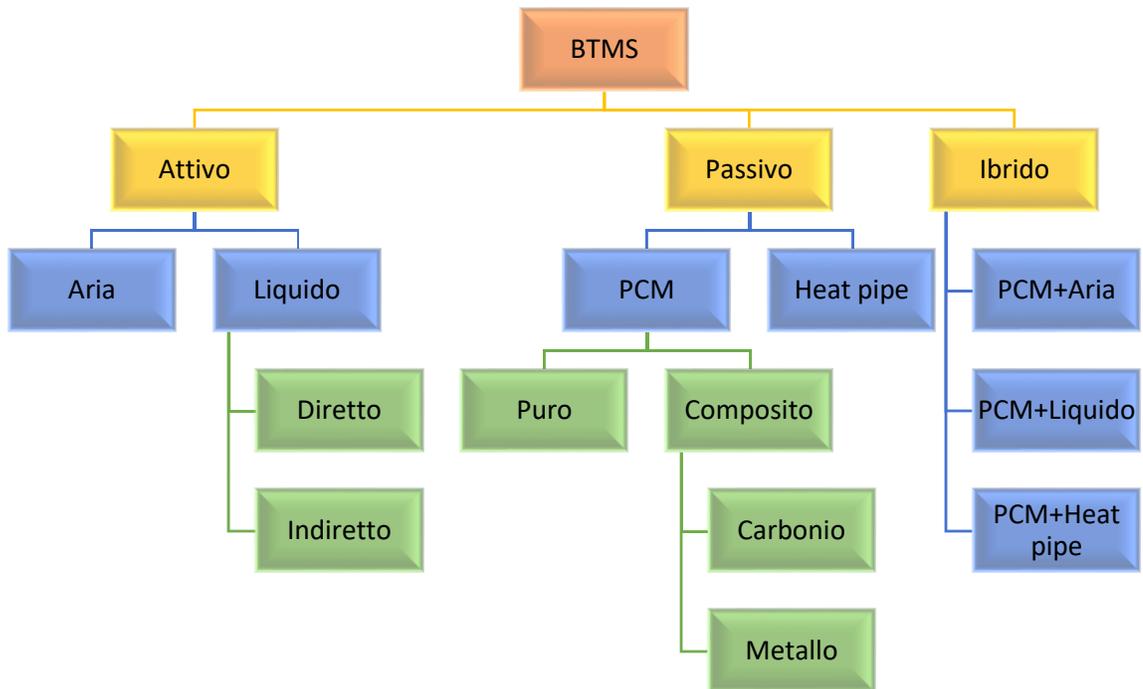


Figura 20 - Principali soluzioni di BTMS. Fonte: CIC energi GUNE

3.1 BTMS attivo

Al fine di rendere il sistema reattivo ai cambiamenti climatici esterni ai quali viene sottoposta la batteria (come, ad esempio, temperatura ambiente, umidità, pressione, ecc.), all'interno del pacco batteria vengono installati dei sensori adibiti al monitoraggio di queste grandezze fisiche. I dati forniti da questi sensori vengono processati da una centralina esterna, che regola in modo attivo l'alimentazione di dispositivi di riscaldamento e raffreddamento ("scambiatore di calore").

La descritta configurazione definisce il BTMS di tipo attivo.

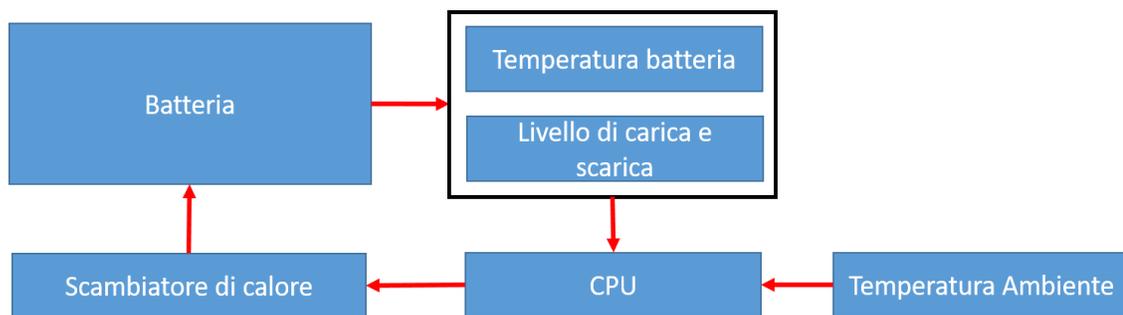


Figura 21 - Schema a blocchi BTMS attivo

Mantenendo la batteria alla temperatura corretta, il sistema di gestione termica riduce la perdita di energia dovuta al calore e i cali di tensione improvvisi dovuti al freddo, ottimizzando l'uso dell'energia disponibile assicurando che la batteria sia sempre nel suo range ottimale di funzionamento.

Inoltre, questo tipo di sistema consente di prevenire i danni alla batteria e di ridurre i rischi legati alla sicurezza, soprattutto in considerazione della circostanza che le batterie LIBs in caso di surriscaldamento sono soggette a fenomeni *thermal runaway* (come rilevato nel capitolo precedente), che – a sua volta – può causare la fuoriuscita di gas tossici e, in casi estremi, all'incendio o all'esplosione della batteria.

In ambienti con temperature estreme, il BTMS attivo è fondamentale per garantire il corretto funzionamento della batteria e del dispositivo in generale.

Dunque, il BTMS attivo rappresenta uno dei principali sviluppi nella gestione termica delle batterie al litio, consentendo un controllo preciso ed efficace della temperatura per garantire prestazioni ottimali, sicurezza e durata della batteria. È, quindi, un componente essenziale nei veicoli e nei dispositivi alimentati a batteria che richiedono prestazioni affidabili in una vasta gamma di condizioni ambientali.

3.1.1 Dispositivi di Riscaldamento Attivi

Una pratica comune in ambienti freddi è quella di riscaldare esternamente una batteria al litio al fine di garantire le sue prestazioni ottimali e la sua lunga durata.

Il BTMS attivo utilizza riscaldatori incorporati oppure esterni per generare calore e portare la batteria alla temperatura desiderata

Tipo di riscaldatore	Descrizione	Considerazioni
Custodia Termica con Elementi Riscaldanti	Custodia progettata per contenere la batteria e dotata di elementi riscaldanti incorporati	<ul style="list-style-type: none"> - Efficiente Riscaldamento: il calore viene distribuito uniformemente intorno alla batteria - Controllo della Temperatura: alcune custodie hanno sensori di temperatura integrati per regolare il riscaldamento - Portabilità: alcuni modelli sono progettati per essere portatili e facilmente trasportabili
Riscaldatori con Resistenza elettrica	Dispositivi che generano calore quando una corrente elettrica passa attraverso di essi; possono essere avvolti intorno alla batteria o posizionati nelle vicinanze	<ul style="list-style-type: none"> - Versatilità: possono essere adattati a diverse dimensioni e forme di batterie - Facile da Utilizzare: richiedono una fonte di alimentazione e possono essere accesi o spenti facilmente - Rischio di Surriscaldamento: è importante monitorare la temperatura per evitare il surriscaldamento

Capitolo 3.1.1 – Dispositivi di riscaldamento attivi

Tipo di riscaldatore	Descrizione	Considerazioni
Coperte Termiche o Tappeti Riscaldanti	Coperte progettate per mantenere caldi oggetti come batterie; possono essere posizionate sotto la batteria o avvolte attorno ad essa	<ul style="list-style-type: none"> - Facilità d'Uso: possono essere semplicemente posizionate sotto la batteria o avvolte attorno ad essa - Uniformità di Riscaldamento: bisogna assicurarsi che la coperta copra uniformemente la batteria per un riscaldamento omogeneo - Spessore e Isolamento: alcune coperte possono essere più spesse e isolanti, aumentando l'efficienza del riscaldamento
Riscaldatori a Filo o a Nastro	Sottili fili o nastri con resistenza incorporata, che possono essere avvolti attorno alla batteria o posizionati nelle vicinanze	<ul style="list-style-type: none"> - Precisione: possono essere posizionati esattamente dove è necessario il riscaldamento - Adattabilità: si adattano a diverse forme di batterie - Rischio di Surriscaldamento: è necessario monitorare attentamente la temperatura per evitare il surriscaldamento
Riscaldamento ad Induzione	Utilizza campi magnetici alternati per generare calore direttamente all'interno della batteria	<ul style="list-style-type: none"> - Efficienza: il riscaldamento avviene direttamente all'interno della batteria, senza dispersione di calore - Controllo della Temperatura: alcuni sistemi di riscaldamento ad induzione hanno sensori per regolare la temperatura - Costo: può essere più costoso rispetto ad altre opzioni di riscaldamento
Riscaldamento Solare	Utilizza l'energia solare per generare calore attraverso pannelli solari dedicati	<ul style="list-style-type: none"> - Sostenibile: utilizza un'energia rinnovabile e pulita - Efficienza Dipendente dalla Luce Solare: richiede condizioni di luce solare sufficiente per funzionare efficacemente - Tempo di Riscaldamento: potrebbe richiedere più tempo per riscaldare la batteria in alcune condizioni metereologiche (es. nuvoloso)

Tabella 1 - Dispositivi di riscaldamento attivi

3.2 BTMS Passivo

Il BTMS passivo è un sistema di gestione termica che non richiede attivamente l'uso di energia aggiuntiva per regolare la temperatura della batteria.

Tale tipologia di sistema, in particolare, si basa su materiali o design che sfruttano i principi della conduzione termica al fine di dissipare il calore prodotto durante la carica e lo scarico della batteria.

Questi sistemi, di frequente, utilizzano materiali termicamente conduttivi o sistemi di dissipazione passiva del calore per mantenere la batteria entro un range di temperatura sicura.

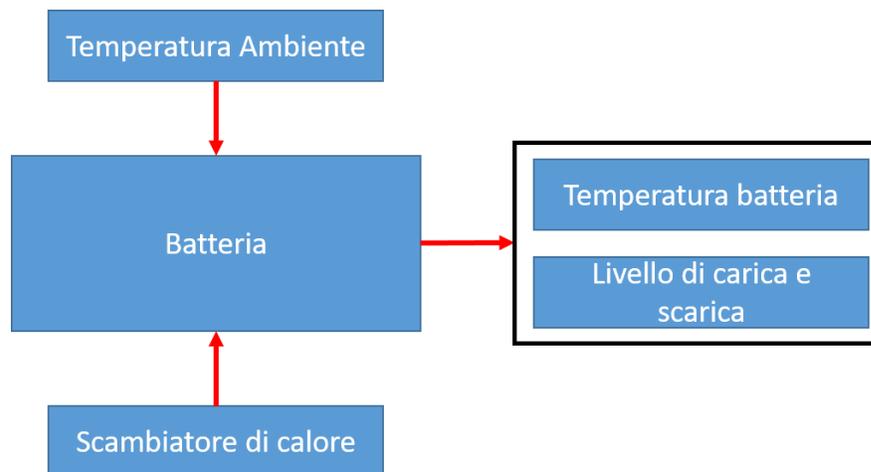


Figura 22 - Schema a blocchi BTMS passivo

Tra i vantaggi principali del BTMS Passivo vi sono la semplicità di installazione, il minore consumo energetico complessivo, ma anche l'assenza di componenti aggiuntivi rispetto ai sistemi BTMS attivi, che, da un lato, riduce i potenziali guasti a questi associati (che potrebbero anche causare surriscaldamenti o problemi di sicurezza) e, dall'altro lato, riduce i costi di manutenzione.

Tuttavia, i sistemi passivi possono essere meno efficaci nel raffreddamento delle batterie durante condizioni di carico molto elevate o in ambienti estremamente caldi e presentano inerzie di diffusione termica molto più lunghe rispetto ai sistemi attivi. Inoltre, alcuni sistemi di raffreddamento potrebbero richiedere un ingombro maggiore o aggiungere peso al sistema e la loro efficienza dipende molto dalle condizioni esterne, come la temperatura ambiente e il flusso d'aria.

3.2.1 Dispositivi di Raffreddamento passivi

Come rilevato, i dispositivi di raffreddamento passivi sono soluzioni che non richiedono l'uso di energia elettrica o altre fonti di alimentazione attiva per funzionare.

Nel dettaglio, questi dispositivi sfruttano principi fisici come la conduzione, la convezione e la radiazione per dissipare il calore.

Tipo di riscaldatore	Descrizione	Considerazioni
Alette di raffreddamento	Aumentano la superficie della batteria e facilitano la dispersione del calore nell'aria circostante	<ul style="list-style-type: none"> - Limitazioni del raffreddamento: il calore viene distribuito uniformemente solo sulla superficie di contatto tra aletta e batteria - Efficienza del raffreddamento: le alette possono essere realizzate in materiali come alluminio o rame, che sono buoni conduttori termici - Versatilità: possono essere adattati a diverse dimensioni e forme di batterie
Raffreddamento strutturale	Progettazione di parti strutturali della batteria come dissipatori di calore	<ul style="list-style-type: none"> - Efficienza raffreddamento: la struttura stessa è progettata per consentire un flusso ottimale di calore verso l'ambiente circostante - Costo: può essere più costoso rispetto ad altre opzioni di raffreddamento
PCM (Materiali a Cambiamento di Fase)	Materiali che assorbono o rilasciano energia sotto forma di calore durante la transizione di fase	<ul style="list-style-type: none"> - Difficoltà di utilizzo: necessaria implementazione nel pacco batteria - Uniformità di riscaldamento: riscaldamento omogeneo dovuto al fatto che riveste le singole celle, ma con bassa conduttività termica - Costo: batterie più pesanti e quindi aumento di costo in termini di efficienza del sistema
Raffreddamento ad Aria Naturale	Progettazione di design della batteria per facilitare il passaggio di aria naturale	<ul style="list-style-type: none"> - Efficienza: il raffreddamento avviene direttamente all'interno della batteria, ma con bassa efficienza - Tempo di riscaldamento: potrebbe richiedere più tempo per raffreddare la batteria ed è molto soggetto alle condizioni ambientali esterne - Costo: costo solo per la fase di progettazione, quindi molto economico rispetto ad altri sistemi di dissipazione

Tabella 2 - Dispositivi di raffreddamento passivi

3.3 BTMS Ibrido

Un BTMS ibrido combina strategie di raffreddamento e riscaldamento al fine di mantenere le batterie funzionanti in condizioni ottimali durante svariate situazioni operative.

Sebbene questi sistemi BTMS mostrino prestazioni molto più efficaci rispetto ai sistemi puri attivi o passivi nella gestione termica del pacco batterie, la loro complessità e i costi rappresentano un fattore limitante per la loro implementazione nei veicoli elettrici.

Un esempio di sistema ibrido è illustrato di seguito (figura 23), dove, al di sopra della piastra di raffreddamento all'interno del quale passa il liquido refrigerante, vengono saldate delle piastre di rame a stretto contatto con le batterie. In questo modo, si garantisce la dissipazione del calore in maniera costante ed omogenea.

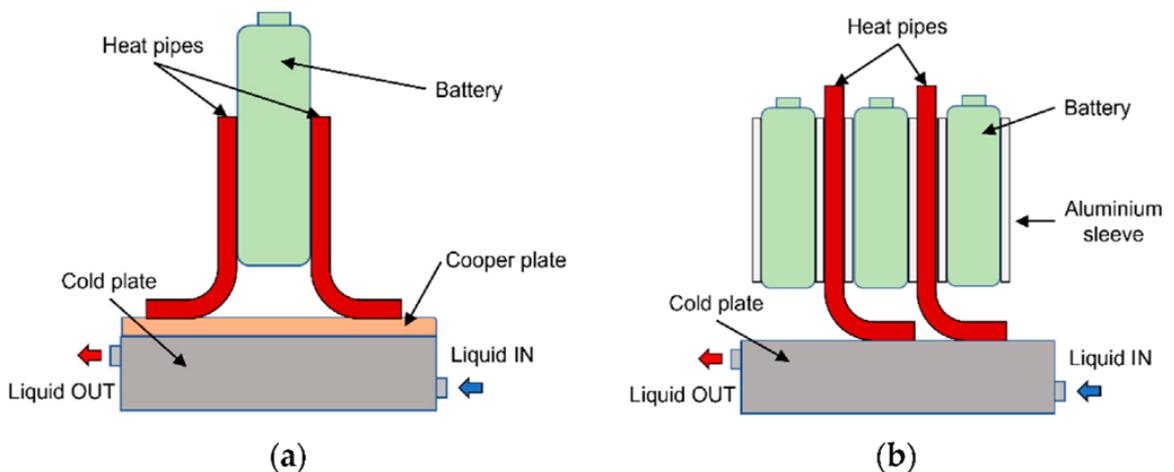


Figura 23 - BTMS ibridi che utilizzano tubi di calore accoppiati con piastre di raffreddamento (a) piastre di tubi di calore-rame a forma di "L" e piastre di raffreddamento a liquido; (b) BTMS ibrido costituito da tubi di calore a forma di L con manicotti

3.4 Risultati test con BTMS

Nello studio *“Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives”* condotto da Xiaosong Hu e Yusheng Zheng viene dimostrato che la differenza di temperatura all’interno della cella della batteria e del modulo/pacco è influenzata dalla geometria della cella, dal posizionamento degli elementi riscaldanti e dalla conduttività termica del mezzo di trasferimento del calore.

Le anzidette problematiche sono critiche per un BTMS di tipo conduttivo, come, ad esempio, le resistenze riscaldanti o PCM, rispetto ad un BTMS di tipo convettivo, come, ad esempio, aria o liquidi, dove l’aumento della velocità di trasferimento del calore viene ottimizzata dallo studio del flusso del mezzo di trasferimento del calore o utilizzando dei fluidi con una maggiore conduttività termica (ad esempio nano-fluidi).

Nella *tabella 3* si possono osservare i risultati dei test di cui al predetto studio, ove si vedono i tempi di riscaldamento a determinate condizioni ambientali.

Tipo di riscaldatore		Capacità della cella	Geometria della cella	Peso della cella	Temperatura ambiente	Potenza richiesta	Incremento di temperatura finale della cella	Tempo di riscaldamento
		[Ah]	-	[g]	[°C]	[W]	[°C]	[s]
Riscaldamento convettivo	Aria riscaldata	2,2	Cilindro	44	-20	23,6	40	85
	Liquido riscaldato	37	Prisma	864	-30	-	30	2100
Riscaldamento conduttivo	Resistenza riscaldante	35	Prisma	1080	-40	35	40	1500
	Riscaldamento per effetto Peltier	38	Prisma	-	17	-	15	1200
	Riscaldatori Heat Pipe	18	Prisma	-	-30	30	30	1100
	Riscaldatori PCM	1,5	Cilindro	45	-25	162	35	273

Tabella 3 – Test sperimentali per riscaldare una batteria da temperature estreme a temperature di corretto funzionamento con diversi device esterni (fonte: *Battery warm-up methodologies at subzero temperatures*)

La tabella non fornisce un chiaro dato oggettivo condotto sulla stessa batteria nelle medesime condizioni esterne, ma consente di comprendere i tempi e le capacità di riscaldamento della batteria. Allo stesso tempo, consente di avere un’idea di quale possa essere il miglior sistema di gestione della temperatura nell’ipotesi di temperature estreme in base all’applicazione finale (automotive, aerospace, eVTOL, UAS, ecc.).

4 Effetti delle basse temperature sulle batterie LIBs

4.1 Introduzione

La batteria al litio può essere fortemente influenzata in senso negativo dalle basse temperature, in quanto queste ultime incidono sulla reazione elettro-chimica che ne governa il funzionamento, ma anche sulla vita stessa della batteria. Difatti, quanto più la temperatura è bassa, tanto meno gli ioni che migrano tra anodo e catodo saranno in grado di muoversi nell'elettrolita, con conseguente diminuzione della capacità della batteria.

Ciò significa che la batteria potrebbe avere una durata inferiore rispetto a quanto ci si aspetterebbe nell'ipotesi in cui venisse utilizzata in condizioni più calde. Tale effetto è generalmente più evidente nel caso di utilizzo di dispositivi ad alta intensità di corrente, come, ad esempio, i telefoni cellulari durante la registrazione di video oppure le fotocamere digitali o, nondimeno, nel caso oggetto del presente studio nel momento in cui il drone è in fase di decollo, trasporta un payload o sta svolgendo manovre aggressive.

La diminuzione di capacità della batteria a temperature estreme è riconducibile all'aumento della resistenza interna, che genera una maggiore perdita di energia sotto forma di calore quando la batteria viene caricata o scaricata, facendo, così, diminuire l'efficienza del sistema.

I rischi di danni permanenti quando la batteria viene esposta a temperature estremamente basse per lunghi periodi sono dovuti alla formazione di cristalli di litio all'interno della batteria, i quali possono danneggiarne la struttura interna. Tuttavia, in genere, molti di questi effetti sono reversibili quando la temperatura della batteria viene riportata nei range consigliati dai costruttori. Dunque, ad esempio, se una batteria al litio sembra scaricarsi più velocemente del solito a basse temperature, una volta riscaldata potrebbe tornare alla sua capacità normale.

Per descrivere ed analizzare le temperature delle batterie in determinate condizioni esterne, si utilizzano dei modelli matematici elettro-termici del sistema. Questi modelli, una volta verificati con i dati sperimentali, forniscono un valido aiuto per prevenire fenomeni che possano danneggiare la batteria stessa.

4.2 Modello elettro-termico batteria LIBs

Un modello elettro-termico di una batteria è un modello matematico che considera sia le caratteristiche elettriche sia quelle termiche di una batteria.

Tali modelli sono importanti in quanto consentono di comprendere il comportamento di una batteria in diverse condizioni di funzionamento, quali la carica, la scarica e l'ambiente circostante.

Con l'utilizzo del metodo della sovrapposizione degli effetti, è possibile scindere il comportamento elettrochimico della batteria da quello termico con l'uso di modelli matematici dedicati e, in particolare, il primo descrive il comportamento elettrico della batteria durante le fasi di carica e scarica e il secondo tiene conto del trasferimento di calore tra la batteria e l'ambiente esterno durante il funzionamento.

La variazione di temperatura influisce sulla mobilità degli ioni all'interno dell'elettrolita, che varia la resistenza interna della batteria che – a sua volta – è direttamente collegata alla dissipazione di energia e, quindi, di calore che la batteria disperde nell'ambiente esterno.

Se si considera, ad esempio, un conduttore metallico, si rileva che anch'esso è influenzato dalla temperatura al quale si trova, così come descritto nella seguente equazione:

$$R_t = R_{ref} * [1 + \alpha * (T - T_{ref})]$$

dove:

- R_t è la resistenza a una temperatura T ;
- R_{ref} è la resistenza di riferimento a una temperatura di riferimento T_{ref} ;
- α è il coefficiente di temperatura della resistenza, che rappresenta la variazione percentuale della resistenza per grado di temperatura;
- T è la temperatura attuale.

4.2.1 Modello elettrico di Thévenin per batteria LIBS

Il "Modello Elettrico di Thévenin" è un modello equivalente utilizzato in elettronica per semplificare circuiti complessi.

In particolare, secondo il teorema di Thévenin il circuito originale può essere sostituito da un circuito equivalente più semplice, noto proprio come "circuito di Thévenin", che consiste di una sorgente di tensione (V_θ) in serie con una resistenza (R_θ). Il circuito di Thévenin offre il medesimo comportamento agli estremi del circuito originale.

Si considera una batteria come un generatore di corrente in serie ad una resistenza R_{TOT} :

$$R_{TOT} = R_0 + \sum X_i$$

dove:

- R_0 è la resistenza che influisce sulla caduta di tensione interna quando la batteria viene sottoposta a correnti elevate;
- $\sum X_i$ è la sommatoria delle impedenze capacitive che tiene conto della la resistenza interna R_i della batteria, che è una delle cause principali di perdita di energia sotto forma di calore durante la carica e la scarica, e della capacità C_i di immagazzinare energia della batteria.

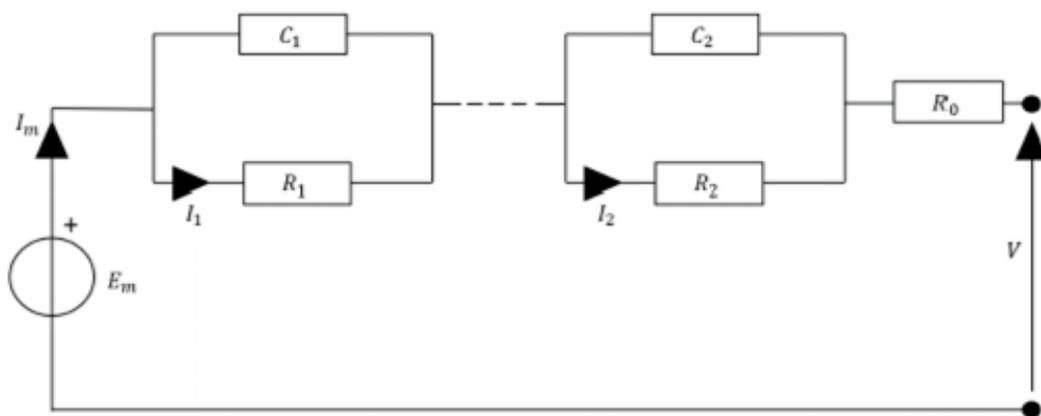


Figura 24 - Rappresentazione elettrica batteria LIBS

4.2.2 Modello termico della batteria LIBS

Un modello termico di una batteria è una rappresentazione matematica che considera i fenomeni termici all'interno di una batteria durante il suo funzionamento. Tali modelli sono essenziali per comprendere e prevedere come la temperatura influenza le prestazioni, la sicurezza e la durata della batteria.

Tra i vari aspetti da considerare per avere un modello termico efficace vi sono l'equilibrio termico, che considera come la temperatura all'interno della batteria si equilibra con l'ambiente esterno durante la fase di carica, di scarica e di inutilizzo, gli effetti sulla capacità e, nei modelli più avanzati, la gestione termica esterna che tiene conto del sistema di raffreddamento e riscaldamento attivo della batteria.

4.2.2.1 Esempio di Equazione del Modello Termico:

Un esempio di modello termico della singola cella elettro-chimica della batteria può essere rappresentato dalla seguente equazione, che descrive come il calore generato dalla reazione elettro-chimica dipenda dalla corrente generata e dalla temperatura a cui si trova la cella stessa:

$$q = I^2 R_{cella} - I * T * \frac{dE}{dt}$$

dove:

- $q [W]$ è il calore termico all'interno della cella della batteria;
- $I [A]$ è la corrente che attraversa la cella della batteria;
- $T [°K]$ è la temperatura della cella della batteria;
- $R_{cella} [\Omega]$ è la resistenza interna della cella alla temperatura T ;
- $\frac{dE}{dt}$ è il coefficiente di entropia che tiene conto del calore generato e asportato dalle reazioni chimiche durante la carica e scarica.

Risulta, quindi, che il calore generato dalla cella è fortemente legato dalla corrente elettrica che la attraversa che, a sua volta, è legata alla capacità della cella dalla relazione:

$$I_{MAX} = C * Class$$

dove:

- I_{MAX} [A] è la corrente massima che attraversa la cella della batteria;
- C [Ah] è la capacità della cella di immagazzinare energia;
- $Class$ è la classificazione della batteria con la quale può avvenire la scarica della cella stessa;

Ad esempio, una batteria Li-ion da 2000 mAh (2 Ah) con una classificazione C di 2C può erogare una corrente massima di 4 Ampere.

Inoltre, la conversione dell'energia attraverso processi chimici, elettrici e di trasporto di massa è responsabile del calore generato durante il funzionamento della cella della batteria.

Facendo riferimento al modello matematico elettrico, per lo sviluppo del modello termico si possono considerare due principali fonti di calore nella cella, una legata alle resistenze R_0 , R_1 , R_i ed un'altra legata alla capacità della batteria C_1 , C_2 , C_i .

Pertanto, il calore generato dalla batteria sarà la somma delle due, ovvero:

$$Q_{generata} = Q_{irreversibile} + Q_{reversibile}$$

Il calore irreversibile, denominato anche "effetto Joule", è dovuto dalle perdite ohmiche nella cella dovute alle resistenze elettriche interne e l'equazione è la seguente:

$$Q_{irreversibile} = I_{cella} * (V_{cella} - V_{OCV}) = I_{cella}^2 (R_0 + R_1 + R_2)$$

Si precisa che V_{OCV} è la tensione di circuito aperto che rappresenta la differenza di potenziale elettrico tra due terminali della batteria quando scollegato da qualsiasi circuito.

Il calore reversibile, invece, è dato dall'effetto entropico dalla reazione elettrochimica all'interno della batteria, che genera o consuma energia. L'equazione per il calore reversibile è la seguente:

$$Q_{reversibile} = I_{cella} * T_{cella} * \frac{\partial V_{OCV}}{\partial T}$$

Nella maggioranza dei casi il calore reversibile viene ritenuto trascurabile, a differenza di quello irreversibile, in quanto si ha maggiore entropia all'inizio del funzionamento della cella elettrolitica o per bassi C-rate. Con l'aumentare dei C-rate, il calore generato dalle resistenze interne è predominante rispetto al livello entropico della batteria e quindi il calore reversibile si può trascurare. Quindi è importante avere un modello termico che a bassi C-rate consideri un coefficiente entropico accurato.

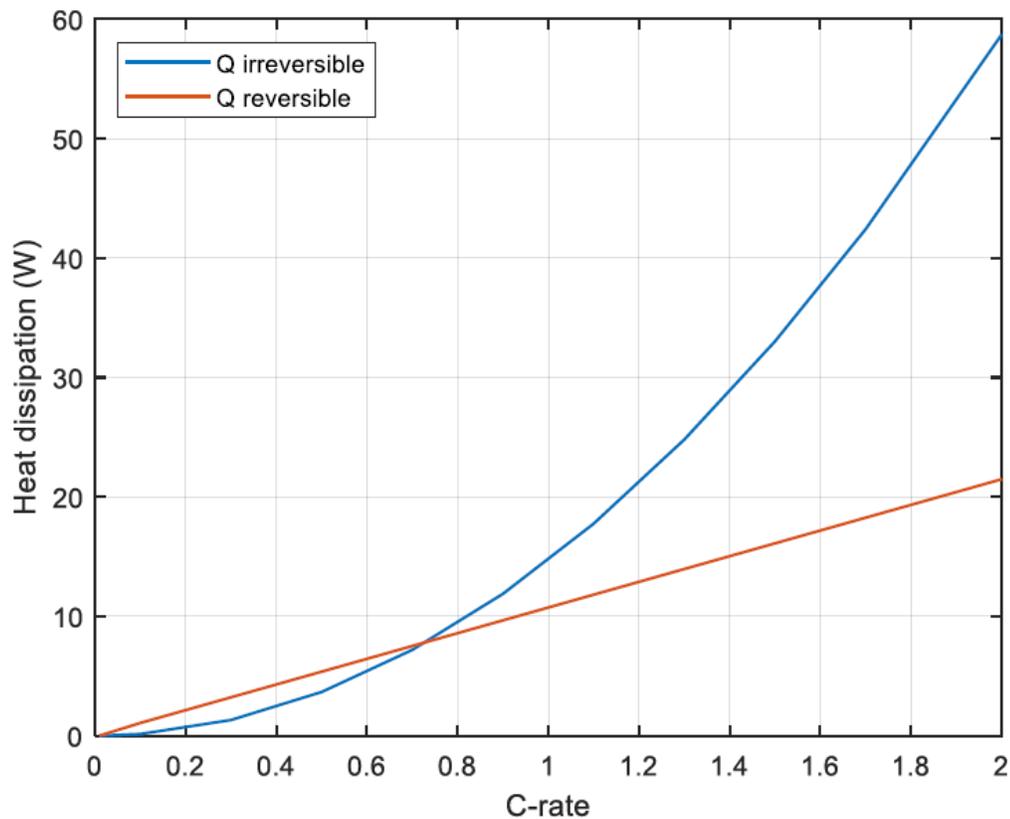


Figura 25 - Calore reversibile e irreversibile in funzione dello C-rate (fonte : Haider Adel , Ziad Namir Abdeljawad: Thermal management technologies of lithium-ion batteries applied for stationary energy storage systems)

4.2.3 Distribuzione termica batteria litio

Il trasferimento di calore tra la cella e l'ambiente circostante dovrebbe essere considerato durante le fasi di progettazione della geometria della cella, così da ottimizzare il percorso di trasferimento del calore. La distribuzione della temperatura all'interno della cella, che è influenzata dal trasferimento di calore anisotropo e dalla diversa geometria della cella, può diventare più irregolare nelle batterie per autoveicoli agli ioni di litio di grande formato. Inoltre, bisognerebbe considerare anche il consumo energetico e il tempo di riscaldamento.

Avere un accurato modello matematico della batteria consente di comprendere la diffusione del calore all'interno della batteria, la capacità di energia e la potenza dell'intero modulo/pacco per diverse condizioni ambientali.

A differenza del trasferimento di calore di una singola cella, quello che avviene in un modulo batteria è la combinazione dell'interazione cellula-cella e dell'interazione modulo batteria con l'ambiente circostante, che potrebbe essere influenzato anche dalla geometria della cella.

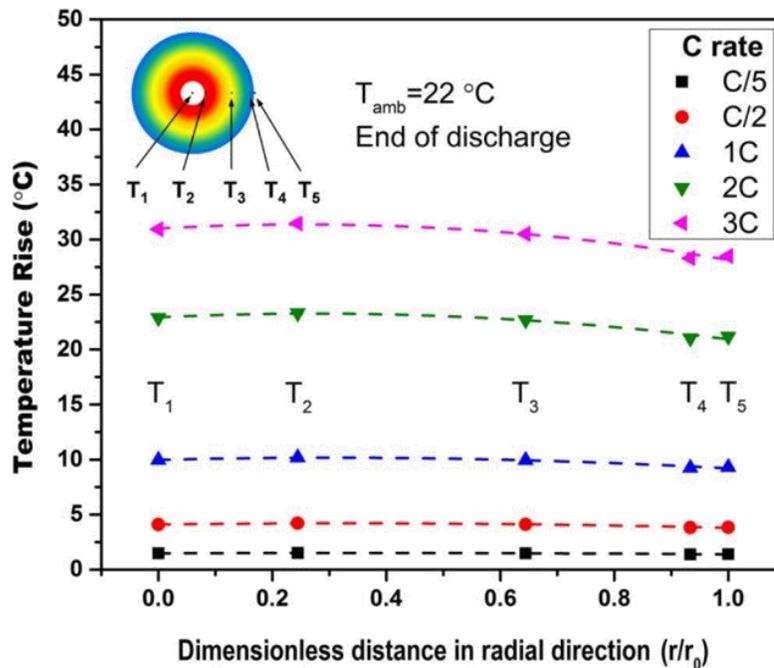


Figura 26 - Effetti della velocità di scarica C sulla distribuzione radiale della temperatura durante la scarica (fonte: In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in Cylindrical Li-Ion Cells)

Capitolo 4.2.3 – Distribuzione termica batterie al litio

La distribuzione in modo non uniforme della temperatura all'interno del modulo batteria, che potrebbe innescare incoerenze di temperatura tra celle e tensione, varia con il trasferimento di calore e con la configurazione delle celle dello stesso modulo. Alcuni studi sperimentali hanno permesso di constatare che nella fase di carica e di scarica, la batteria produce del calore interno dato dalla reazione elettrochimica.

Nello specifico, i test sperimentali condotti da Guangsheng Zhang descritti nello studio “*In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in Cylindrical Li-Ion Cells*” considerano una batteria cilindrica 18650 commerciale a T_{amb} 22°C alla quale vengono posizionate delle termocoppie lungo il raggio della batteria stessa. I test hanno appurato che il calore viene generato più velocemente con C-rate più elevati e quindi con un gradiente termico maggiore lungo il raggio della batteria, dimostrando in maniera inequivocabile che il tasso di carica o scarica determina il modo in cui la batteria stessa genera calore.

Nell'ipotesi in cui la velocità di scarica è costante, ma varia la temperatura esterna, si può notare come il gradiente di temperatura a temperatura ambiente più bassa aumenta più velocemente di quello a temperatura ambiente più alta. Tale differenza è dovuta alla dissipazione più efficiente del calore sugli strati esterni in condizioni di bassa temperatura ambiente rispetto alle condizioni di alta temperatura ambiente.

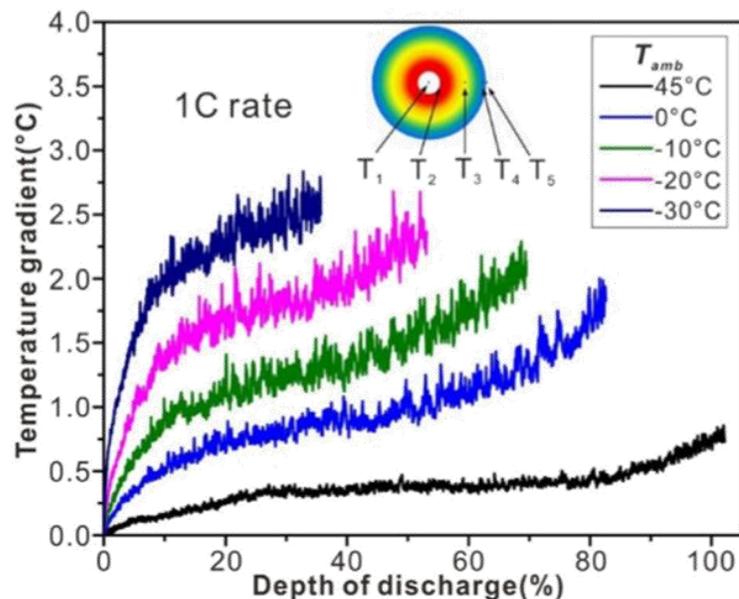


Figura 27 – Variazione della temperatura interna con 1C-rate costante durante il ciclo di scarica a diverse temperature ambiente (fonte: *In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in Cylindrical Li-Ion Cells*)

Sulla base di questi test, in generale, la correlazione tra tensione e capacità al variare della temperatura, può essere descritta dalla *figura 28*, dove è evidente che le temperature esterne influiscono sulla capacità della batteria di immagazzinare energia (ovverosia diminuisce al diminuire della temperatura).

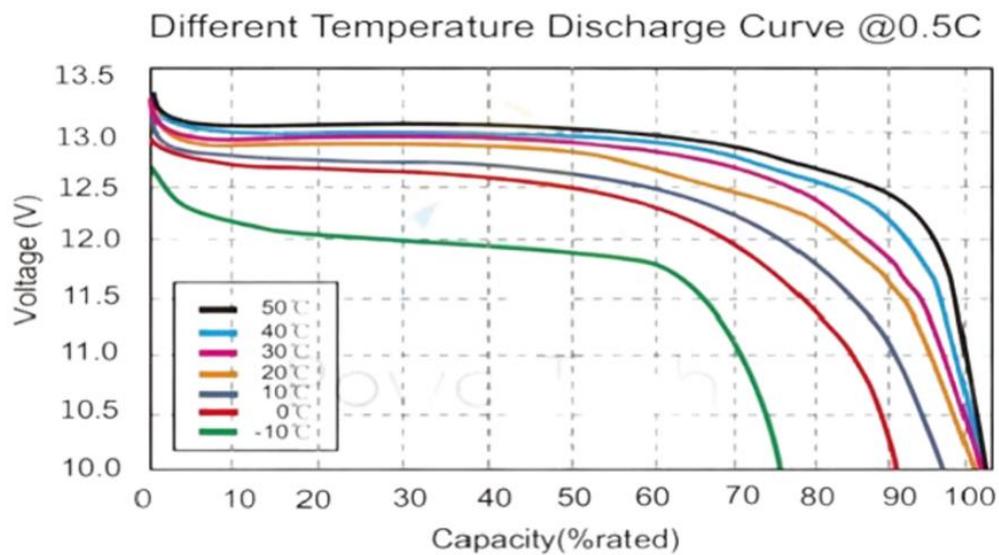


Figura 28 - Variazione della capacità a diverse temperature ambiente

5 Drone e profilo di missione di volo

5.1 Introduzione

Come accennato in precedenza, i droni vengono utilizzati in molteplici realtà lavorative e applicazioni, dal monitoraggio delle colture nei campi, alla consegna di spedizioni ai privati, sino ad attività particolarmente delicate ed importanti consistenti nell'impiego nelle emergenze ambientali e umanitarie come mezzo di supporto al primo soccorso.

I droni, infatti, sono in grado di fornire un fondamentale supporto alle unità di emergenza, in quanto consentono di raggiungere le persone in luoghi difficilmente raggiungibili e, grazie alla loro versatilità, possono, da un lato, trasportare un kit di primo soccorso e, dall'altro lato, nel contempo, possono fornire una panoramica della zona interessata dalla catastrofe naturale o della situazione di emergenza.

Un esempio recente di utilizzo di un drone in una situazione come quella descritta è il terremoto di magnitudo 7.9 avvenuto il 6 febbraio 2023 alle ore 4:17 nel sud-est della Turchia e nel nord della Siria. In tale occasione emergenziale, l'utilizzo dei droni da parte dei mezzi di soccorso è stato fondamentale per capire come meglio impiegare e distribuire le unità di emergenza come documentato da diverse testate giornalistiche.

Inoltre, i droni, se dotati di opportuni sistemi integrati, consentono anche il monitoraggio di colture e falde acquifere e vengono sempre più utilizzati dalle unità alpine nel territorio italiano, sia per monitorare i versanti delle montagne al fine di predire frane o valanghe, ma, allo stesso tempo, anche per prestare interventi di primo soccorso in luoghi ove vi sono difficoltà di raggiungimento (es. piste da sci).

Un esempio noto per i fatti di cronaca è il ritrovamento nel luglio del 2018 di Rick Allen disperso a 8000 m s.l.m. sul K3 dopo essere scivolato da un ghiacciaio. Inizialmente dato per morto, viene ritrovato attraverso l'uso di un drone che per un caso fortuito si trovava in quell'area per delle riprese di un videoclip.

Nello studio *“The potential use of unmanned aircraft systems (drones) in mountain search and rescue operations”* vengono confrontate due differenti strategie di ricerca e soccorso ad alta quota in montagna. Nella prima simulazione si effettua la ricerca e il soccorso perlustrando l’area di interesse a piedi, mentre nella seconda simulazione si effettua la ricerca attraverso l’utilizzo del drone e il raggiungimento della vittima utilizzando mezzi adeguati per il rapido soccorso. Lo studio ha dimostrato come l’utilizzo di droni in questo ambito consente di perlustrare aree maggiori in minor tempo, rendendo molto più efficace e sicuro per i soccorritori l’intervento in emergenza.

Proprio in ragione dell’utilizzo dei droni in applicazioni come quelle su indicate, tali sistemi potrebbero trovarsi in condizioni climatiche avverse e rigide, dove le basse temperature potrebbero influenzare significativamente le prestazioni e la durata delle batterie, ma anche il funzionamento complessivo del sistema.

5.2 Quadrirotore Q4X

Al fine di avere un riscontro pratico delle considerazioni e dei rilievi sino a qui svolti, è stato preso in considerazione il quadrirotore Q4X prodotto dalla società Mavtech S.r.l.

Il Q4X ha un peso di 4250 g con una diagonale dei motori di 715 mm, Dimensione Carrello di Atterraggio (altezza) 120 mm ed è in grado di trasportare carichi fino al doppio del suo peso con un'autonomia massima di circa 25 minuti. In hovering e senza payload la sua autonomia dichiarata è di 32 minuti.

Grazie al fatto che può lavorare nel range di temperatura tra i -10°C e +40°C viene già utilizzato per missioni di volo alpino.

Il sistema di propulsione è costituito da quattro motori T-Motor U5 Pro e quattro eliche T-Motor NS 16x5.4. il tutto alimentato da una batteria LiPo 6S con voltaggio nominale di 22,8 V ed una capacità di 16000 mAh installata in un alloggiamento esterno dalle dimensioni 68 x 75 x 190mm.



Figura 29 - Drone Q4X (foto sito: <https://www.mavtech.eu/it/>)

La *tabella 4* indica le caratteristiche specifiche del Drone Q4X prodotto di Mavtech S.r.l. dichiarate dalla stessa società produttrice.

Telaio	
Diagonale Motori	715 mm
Dimensione Carrello di Atterraggio (altezza)	120mm (altre altezze a richiesta)
ESC	
Corrente di Lavoro	60°
Voltaggio di Lavoro	6S LiPo
Drive System	FOC sine wave (vector control and active braking)
Parametri di Volo	
Peso al decollo	5000g ÷ 9600g
Peso netto (10000mAh 6S Lipo, senza Payload)	4250g
Massima potenza richiesta	2500W
Potenza richiesta in Hovering	520W (@4250g Peso al decollo)
Autonomia in Hovering	32 min (@16000mAh & 4450g Peso al decollo)
Temperatura ambientale di esercizio	-10 °C ~ +40 °C
Batteria Principale	
Voltaggio	LiPo 6s
Alloggiamento Standard Batteria, Dimensioni Max Batteria	68 x 75 x 190mm (XT90 Plug)
Requisito di potenza massima erogabile	almeno 2500W in continuo
Motore	
Dimensioni	55,6x33,9mm
KV	360rpm/V
Potenza massima	923W con eliche 18*6,1 @ 6s
Spinta massima	4600g @ 22,2V
Peso	350g

Tabella 4 - Caratteristiche principali Drone Q4X fonte <https://www.mavtech.eu/it/>

5.3 Batterie LiPo 6S

La batteria scelta e utilizzata per il drone Q4X è una batteria LiPo (Litio Polimero) 6S composta da sei celle collegate in serie.

Ogni cella di una batteria LiPo ha una tensione nominale di circa 3,7 volt quando è completamente carica. Pertanto, la tensione totale di una batteria 6S completamente carica è di circa 22,2 volt.

Il peso di questo tipo di batteria è compreso tra gli 800 e i 1500 grammi e le dimensioni fisiche possono variare notevolmente tra diverse marche e modelli delle batterie LiPo, ma, comunemente, una batteria 6S 10000mAh ha dimensioni approssimative di 150x50x50 millimetri (lunghezza x larghezza x altezza).

L'energia totale che può essere immagazzinata dalla batteria in esame può essere calcolata moltiplicando la capacità per la tensione nominale, ovvero:

- Capacità in Ampere-ora (Ah): $10000 \text{ mAh} / 1000 = 10 \text{ Ah}$
- Energia in Watt-ora (Wh): $\text{Capacità (Ah)} \times \text{Tensione (V)} = 10 \text{ Ah} \times 22,2 \text{ V} = 222 \text{ Watt-ora}$



Figura 30 - Esempio di batteria LiPo

5.4 Dati_sperimentali

I test condotti dalla società produttrice Mavtech S.r.l. descritti nell'articolo "*Characterisation of Unmanned Aerial Vehicle performance under extreme environmental conditions in a controlled atmospheric facility*" evidenziano il variare della temperatura esterna della batteria durante la simulazione di una tipica missione di volo in ambiente controllato con lo scopo di studiare il comportamento e l'efficienza dei quattro motori brushless installati sul drone al variare della densità dell'aria nonché studiare il corrispettivo comportamento di scarica della batteria anche con diversi livelli di spinta.

L'UAV è stato fissato all'interno della cella climatica dove è possibile variare ed impostare diversi parametri (come temperatura, percentuale di umidità, densità dell'aria in base alle specifiche del test richiesto) ed una termocoppia di tipo K (incertezza di ± 1 °C) è stata utilizzata per registrare la temperatura della batteria durante i test.

Sono stati definiti tre punti operativi corrispondenti a tre livelli di spinta specifica al fine di simulare tre diverse condizioni operative con diversi payload, rispettivamente 4500 g, 5000 g e 5500 g, ed è stato stabilito che durante i test ciascun punto operativo venisse mantenuto per almeno 10 secondi e sui parametri rilevati venisse calcolata la media dei valori rilevati su 5 secondi.



Figura 31 - Chamber setup (fonte: *Characterisation of Unmanned Aerial Vehicle performance under extreme environmental conditions in a controlled atmospheric facility*)

Anche se lo scopo dei test di Mavtech S.r.l. non coincide esattamente con lo scopo del presente lavoro, si ritiene che sia ugualmente utile per trarre delle considerazioni attinenti, in quanto sono stati eseguiti diversi setup che simulano i possibili profili di missione per il drone, come, ad esempio, la condizione operativa ideale (curva verde delle *figure 32 e 33*), le condizioni operative di freddo estremo (curva viola nelle *figure 32 e 33*) fino a poter simulare condizioni ibride dove la temperatura ambiente è prossima allo 0°C e la temperatura iniziale della batteria assume diversi valori (curva azzurra e curva rossa delle *figure 32 e 33*).

In particolare, è emerso che partendo da una temperatura della batteria di -5° (curva viola della *figura 32*), il sensore rileva, per i primi 180 secondi, la temperatura esterna invariata (non è possibile rilevare la temperatura interna della batteria, se non con l'utilizzo di termo-camere); successivamente, la temperatura della batteria inizia a salire con un andamento abbastanza lineare fino a portarsi nelle condizioni di ottimo operativo dopo 600 secondi, per, poi, continuare sino a raggiungere la temperatura di 30° dopo circa 1600 secondi.

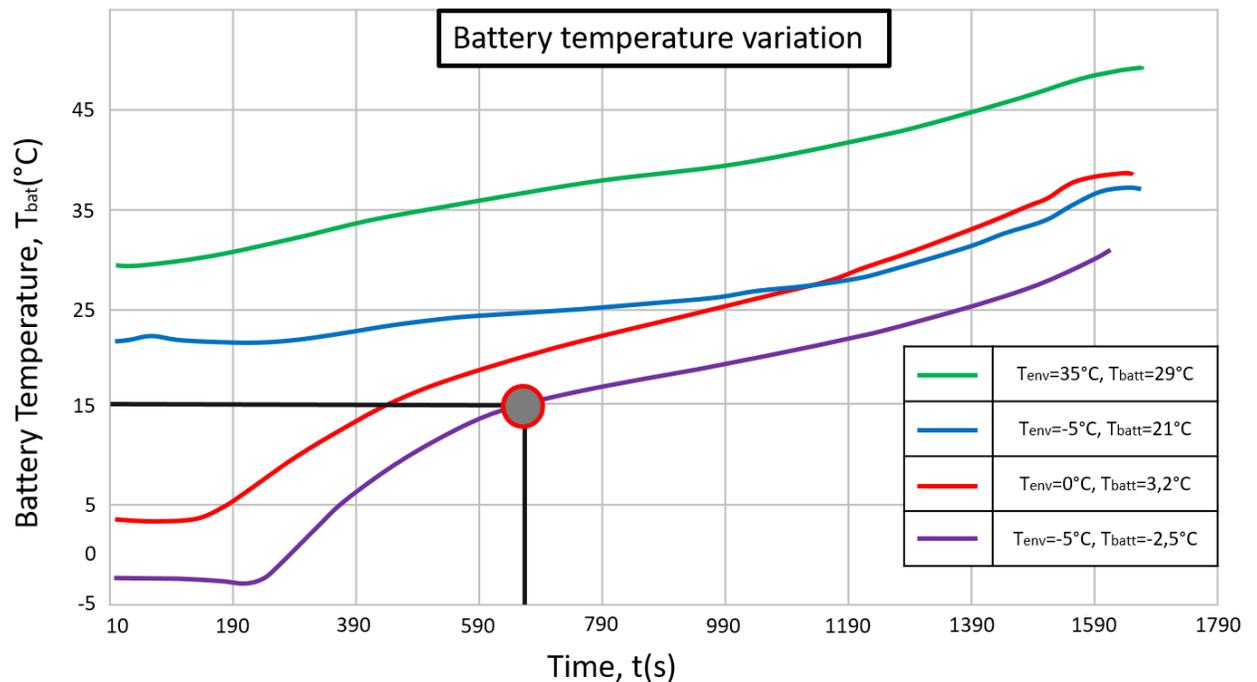


Figura 32- Battery temperature variation (fonte: *Characterisation of Unmanned Aerial Vehicle performance under extreme environmental conditions in a controlled atmospheric facility*)

Inoltre, monitorando anche la tensione che la batteria è in grado di fornire, si può notare che tanto più bassa è la temperatura di partenza, tanto più si avranno improvvisi cali di tensione (V_{drop}), che pregiudicano la missione di volo del drone, il quale si trova ad attivare misure di sicurezza, come l'atterraggio improvviso.

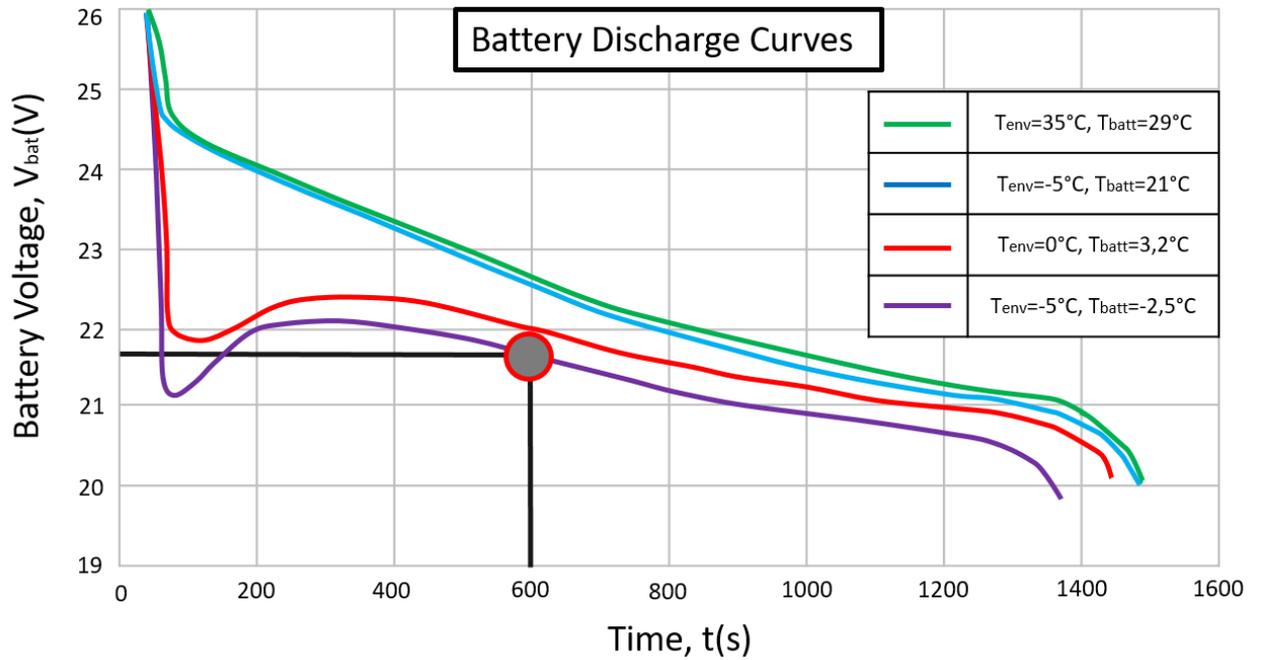


Figura 33 - Battery Discharge Curves (fonte: Characterisation of Unmanned Aerial Vehicle performance under extreme environmental conditions in a controlled atmospheric facility)

6 Conclusioni

Il presente studio ha dimostrato che le batterie LIBs utilizzate per droni sotto i 25Kg hanno un'evoluzione termica in grado di contrastare le basse temperature nelle quali potrebbero trovarsi durante le missioni di volo.

È stato dimostrato che il calore prodotto dalla reazione elettro-chimica e i gradienti di temperatura della cella hanno tempistiche tali da non giustificare l'installazione di sistemi di riscaldamento esterno per portare la batteria alle temperature ottimali operative (15°C-35°C).

È, altresì, stato dimostrato che nelle ipotesi in cui le batterie vengono a trovarsi a temperature estreme, ovvero sia al di sotto delle temperature operative consigliate dai costruttori (-5°C), esse si scaldano in pochi minuti, come dimostrato dai test di laboratorio condotti dalla società Mavtech S.r.l.

Di conseguenza, considerando che la durata di una missione di volo di un drone sotto i 25 Kg è di circa 40 minuti e che, nella migliore delle ipotesi, con un sistema di riscaldamento esterno convettivo si ottiene il raggiungimento della temperatura operativa ottimale in tempi brevi (*Tabella 3*), ma, allo stesso tempo, il sistema riscaldante considerato richiederebbe un ulteriore consumo di energia, sia nella fase iniziale (riscaldamento batteria), sia in termini di peso e volume, tale soluzione non risulta idonea.

Diversamente, una soluzione con resistenza riscaldante, come, ad esempio, Etched Foil Heating, ha vantaggi in termini di peso ed ingombro, ma necessita di un sistema di controllo per il suo corretto funzionamento. Inoltre, a causa delle limitazioni date dalle temperature dei materiali e della non perfetta adesione del riscaldatore sulla superficie della batteria, i tempi di riscaldamento della batteria sono molto lunghi. Ne consegue che, nonostante questa soluzione risulti facilmente implementabile, non si ritiene che possa soddisfare le performance richieste, risultando, dunque, non idonea.

A verifica di quanto evidenziato nella *tabella 3* il test che prevede l'utilizzo di resistenze riscaldanti richiede poca energia per il loro funzionamento, ma il tempo impiegato dal sistema per portare la temperatura media della batteria da -40°C in condizioni operative ottimali è molto ampio (maggiore di 1500 s), rendendolo non idoneo per questo tipo di applicazione.

Dall'altra parte, per avere una batteria nelle migliori condizioni operative e, nel contempo, evitare problemi di cali di tensione improvvisi (che possono avviare le procedure di atterraggio di emergenza del drone), si consiglia una gestione termica della batteria a "terra", ovvero sia è necessario assicurarsi che la fase di carica e la conservazione in deposito per brevi o lunghi periodi di tempo sia all'interno dei range di temperatura consigliati dalle case produttrici.

Per tale ragione, dunque, si ritiene consigliabile un warm-up della batteria oppure l'utilizzo delle smart Batteries (Appendice A) che ottimizzano i cicli di carica e scarica, deviando la corrente elettrica da e alla cella che può soddisfare la richiesta in quel momento.

Così facendo, si evitano scompensi di carica tra le diverse celle che compongono la batteria consentendo un livello di carica sempre omogeneo e, di conseguenza, anche le temperature al suo interno saranno omogenee, allungando così la vita della batteria stessa.

6.1 Warm-up batterie Litio

Il "warm-up" di una batteria al litio consente di aumentare gradualmente la temperatura della batteria prima di utilizzarla o di caricarla completamente.

Tale procedura è particolarmente importante in condizioni di freddo estremo, poiché le batterie al litio possono avere delle prestazioni ridotte o, addirittura, dei danni se vengono utilizzate o caricate a basse temperature. Di conseguenza, è consigliabile conservare la batteria in ambienti caldi, evitare di lasciarla per lunghi periodi in ambienti esterni freddi e, infine, utilizzare custodie termiche atte a mantenere la batteria al caldo durante il trasporto o l'utilizzo in condizioni fredde.

Nell'ipotesi di dover preriscaldare o raffreddare la batteria prima del suo utilizzo e dover così soddisfare l'energia richiesta dai motori del drone, una soluzione può essere l'utilizzo di una dock-station con controllo di temperatura e ricarica. Con tale soluzione si potrebbe garantire una fase di carica all'interno del range delle temperature consigliate dal produttore e si proteggerebbe la batteria dalle possibili variazioni climatiche durante il trasporto.

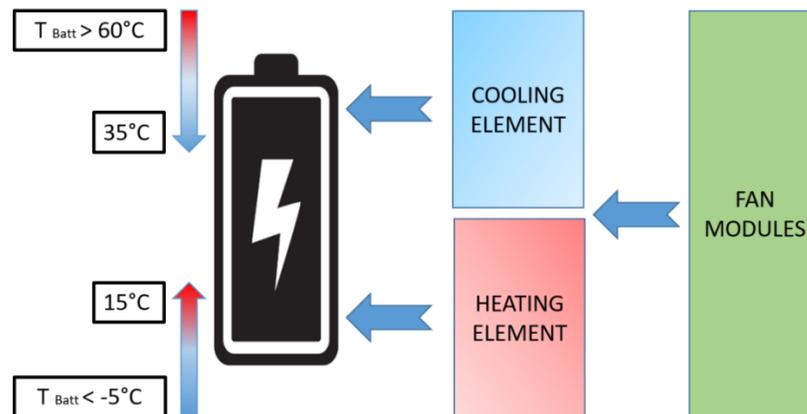


Figura 34 - Warm-up del pacco batteria all'interno di una dock-station con sistema di gestione termica e ricarica

Inoltre, nell'ipotesi di batteria con temperatura elevata o troppo bassa, dovuta, rispettivamente, a cicli di scarica intensi o allo stoccaggio in ambienti non adeguati, la dock station attiverrebbe protocolli di sicurezza finalizzati a riportare la temperatura della batteria in condizioni ottimali prima di avviare la carica, prolungando così la vita della batteria stessa.

7 Sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri della ricerca dovranno verificare, mediante appositi test sperimentali, se l'applicazione di riscaldatori esterni apporta dei benefici, non solo in termini di efficacia sul funzionamento della batteria, ma anche in termini di benefici/costi.

Un altro aspetto che non è stato considerato in questo studio è la variazione di condizioni climatiche nelle quali si potrebbe trovare il drone durante la missione di volo. Il drone, infatti, potrebbe passare da temperature estreme a condizioni climatiche standard (@15°C) oppure potrebbe trovarsi in ambienti ricchi di umidità o privi di umidità.

I cambiamenti climatici repentini possono far insorgere problemi di condensa o gas all'interno della batteria, che – a loro volta – potrebbero causare perdite di efficienza, fenomeni di surriscaldamento e, nei casi peggiori, incendi.

Nel campo Automotive, ad esempio, questi aspetti sono di rilevante interesse e sviluppo e gli studi effettuati potrebbero fornire delle linee guida su parametri e specifiche unificate e standardizzate.

Inoltre, si fa presente che il modello-elettrotermico è stato sviluppato in via preliminare, senza un'analisi teorica rigorosa e gli studi futuri potranno, senza dubbio, approfondirlo, anche con considerazioni sulla disomogeneità termica delle celle all'interno della batteria e sulla dissipazione di calore dei terminali.

8 Ringraziamenti

Ringrazio il Dr. Primatesta Stefano che mi ha guidato nel presente elaborato condividendo con me la conclusione del mio percorso accademico.

Ringrazio te, te che leggi, te che hai sorriso con me, te che mi hai incoraggiato, te che mi hai spronato, te che mi sei stato vicino e te che ci hai creduto come me.

Ti ringrazio perché hai voluto condividere con me il tuo tempo e mi hai supportato affinché concludessi questo percorso.

Ringrazio gli amici che ho avuto modo di conoscere in questi anni girovagando per l'Italia che mi hanno supportato e condiviso sorrisi e risate, rendendo questo percorso più piacevole.

Ringrazio la mia compagna, Alessia, mi ha sostenuto ed appoggiato facendomi “rigare dritto” anche quando mi concentravo su altro, la sua determinazione mi ha contagiato e la sua presenza arricchito la mia vita.

Ringrazio la mia Famiglia, fiero e orgoglioso di averli nella mia vita. Li ringrazio per tutto il sostegno e la fiducia che hanno riposto in me in questi anni.

Ringrazio mia Madre e mio Padre per la loro perseveranza, per la loro tenacia, per la loro fiducia, li ringrazio per avermi guidato ed incoraggiato senza farmi togliere lo sguardo dall'obiettivo, solo ora comprendo i loro sacrifici e le loro preoccupazioni.

Aver concluso questo percorso è il solo modo che ho per poterli ringraziare e per il quale gli sarò riconoscente per sempre.

Infine, ringrazio ME, che dopo tanti sacrifici posso chiudere questo capitolo e guardare avanti senza questioni in sospeso, tenendo sempre a mente che sono stato fortunato ad intraprendere questo percorso universitario che da una parte ha preso e dall'altra ha dato ed insegnato (tanto).

Ora però, un po' di meritato riposo.

Grazie

9 Bibliografia

Bojeri A., Mai E., Ristorto G., Parin R., Vilardi A., Guglieri G., *Characterisation of Unmanned Aerial Vehicle performance under extreme environmental conditions in a controlled atmospheric facility*, 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dubrovnik, Croatia, 2022, pp. 1030-1039

Bonadonna A., Giachino C., Truant E., *Sustainability and Mountain Tourism: The Millennial's Perspective*, in *Sustainability*, vol. 9, no. 7, p. 1219, 2017

Capocchi A., Vallone C., Pierotti M., Amaduzzi A., *Overtourism: A Literature Review to Assess Implications and Future Perspectives*, in *Sustainability*, vol. 11, no. 12, p. 3303, 2019

Cho Y.G., Kim Y.S., Sung D.G., et al., *Nitrile-assistant eutectic electrolytes for cryogenic operation of lithium ion batteries at fast charges and discharges*, in *Energy Environmental Science*, 7, pp. 1737–1743, 2014 - [https:// doi. org/ 10. 1039/ C3EE4 3029D](https://doi.org/10.1039/C3EE43029D)

Cho Y.G., Li M.Q., Holoubek J., et al., *Enabling the low-temperature cycling of NMC/graphite pouch cells with an ester-based electrolyte*. *ACS Energy Letters* 6, pp. 2016–2023, 2021 - [https:// doi.org/ 10. 1021/ acsen ergyl ett. 1c004 84 45](https://doi.org/10.1021/acsenergyl.1c00484). Feng, T.T.

Delika M. Weragoda, Guohong Tian, Arman Burkitbayev, Kin-Hing Lo, Teng Zhang: *A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems*, in *Applied Thermal Engineering*, vol. 224, 2023, 120070, ISSN 1359-4311

Ein-Eli Y., Aurbach D., *The correlation between the cycling efficiency, surface chemistry and morphology of Li electrodes in electrolyte solutions based on methyl formate.*, *Journal of Power Sources*, vol. 54, pp. 281–288, 1995, ISSN 0378-7753 - [https:// doi. org/ 10. 1016/ 0378- 7753\(94\) 02085-H](https://doi.org/10.1016/0378-7753(94)02085-H).

Electrochem J., *Li-ion battery electrolyte formulated for low-temperature applications*, *Journal of the Electrochemical Society*, 144, pp. 823–829, 1997 - [https:// doi. org/ 10. 1149/1. 18374 95](https://doi.org/10.1149/1.1837495).

Gao Y., Rojas T., Wang K., et al., *Low-temperature and highrate-charging lithium metal batteries enabled by an electrochemically active monolayer-regulated interface*, Nature Energy 5, pp. 534–542, 2020 - [https:// doi. org/ 10. 1038/ s41560- 020- 0640-7](https://doi.org/10.1038/s41560-020-0640-7).

Guo R., Ouyang M., Lu L., Feng X., *Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries*, Scientific Reports, 6, 30248, 2016

Haider Adel, Ziad Namir Abdeljawad, *Thermal management technologies of lithium-ion batteries applied for stationary energy storage systems*, 2020, [Online] Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1443146/FULLTEXT01.pdf>

Hilbig, P., Ibing, L., Streipert, B., et al., *Acetonitrile-based electrolytes for lithium-ion battery application*. Current Topics in Electrochemistry 20, 1, 2018 - [https:// doi. org/ 10. 31300/ CTEC. 20. 2018.1- 13](https://doi.org/10.31300/CTEC.20.2018.1-13).

Holoubek J., Kim K., Yin Y.J., et al., *Electrolyte design implications of ion-pairing in low-temperature Li metal batteries*, Energy Environmental Science, 15, pp. 1647–1658, 2022 - [https:// doi. org/ 10. 1039/D1EE0 3422G](https://doi.org/10.1039/D1EE03422G).

Holoubek J., Liu H.D., Wu Z.H., et al., *Tailoring electrolyte solvation for Li metal batteries cycled at ultra-low temperature*, in Nature Energy, 2021 - [https:// doi. org/ 10. 1038/ s41560- 021- 00783-z](https://doi.org/10.1038/s41560-021-00783-z).

Holoubek J., Yin Y.J., Li M.Q., et al., *Exploiting mechanistic solvation kinetics for dual-graphite batteries with high power output at extremely low temperature*, Angewandte Chemie, 58, 18892–18897, 2019 - [https:// doi. org/ 10. 1002/ anie. 20191 2167](https://doi.org/10.1002/anie.201912167).

Ji Y., Wang C.Y., *Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures*, Electrochimica Acta, 2013; 107 :664–74 .

Jow T.R., Xu K., Borodin O., et al., *Electrolytes for Lithium and Lithium-Ion Batteries*, Springer, Heidelberg, 2004 - [https:// doi. org/ 10. 1007/ 978-1- 4939- 0302-](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0302-)

Li J., Wu P., Tian H., *Researches on heating low-temperature lithium-ion power battery in electric vehicles*, in Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014, *IEEE Conference and Expo* . IEEE; 2014. pp. 1–6

Liu C., Xu D., Weng J., Zhou S., Li W., Wan Y., Jiang S., Zhou D., Wang J., Huang Q., *Phase Change Materials Application in Battery Thermal Management System: A Review*, in Materials (Basel), 2020

Liu X.W., Shen X.H., Li H., et al., *Ethylene carbonate-free propylene carbonate-based electrolytes with excellent electrochemical compatibility for Li-ion batteries through engineering electrolyte solvation structure*, *Adv. Energy Mater.* 11, 2003905, 2021 – <https://doi.org/10.1002/aenm.202003905>

Ma S., Jiang M., Tao P., Song C., Wu J., Wang J., et al., *Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: a review*, *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018, 28.6, pp. 653–666 - <https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2018.11.002>.

Nan B., Chen L., Rodrigo N.D., et al., *Enhancing Li⁺ transport in NMC811 graphite lithium-ion batteries at low temperatures by using low-polarity-solvent electrolytes*, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 61, e202205967, 2022 – <https://doi.org/10.1002/anie.202205967>.

Nugroho Agung Pambudi, Alfian Sarifudin, Ridho Alfian Firdaus, Desita Kamila Ulfa, Indra Mamad Gandidi, Rahmat Romadhon, *The immersion cooling technology: Current and future development in energy saving*, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, issue 12, 2022, pp. 9509-9527, ISSN 1110-0168

Oldiges K., Michalowsky J., Grunebaum M., et al., *Tetrahydrothiophene1-oxide as highly effective co-solvent for propylene carbonate-based electrolytes*, *J. Power Sources* 437, 226881, 2019 – <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226881>.

Perkumienė D., Pranskūnienė R., *Overtourism: Between the Right to Travel and Residents' Rights*, in *Sustainability*, vol. 11, no. 7, p. 2138, 2019

Petibon R., Harlow J., Le D.B., et al., *The use of ethyl acetate and methyl propanoate in combination with vinylene carbonate as ethylene carbonate-free solvent blends for electrolytes in Li-ion batteries*, *Electrochimica Acta* 154, pp. 227–234, 2015 – <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.12.084>.

Qin M.S., Liu M.C., Zeng Z.Q., et al., *Rejuvenating propylene carbonate-based electrolyte through nonsolvating interactions for wide-temperature Li-ions batteries*, *Adv. Energy Mater.* 12, 2201801, 2022 – <https://doi.org/10.1002/aenm.202201801>

Ren D., Feng X., Lu L., Ouyang M., Zheng S., Jianqiu L., He X., *An electrochemical-thermal coupled overcharge-to-thermal-runaway model for lithium-ion battery*, *Journal of Power Sources*, 364. pp. 328-340, 2017

Sazhin S.V., Khimchenko M.Y., Trittenchenko Y.N., et al., *Performance of Li-ion cells with new electrolytes conceived for low temperature applications*, *J. Power Sources* 87, pp. 112–117, 2000 - [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00434-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00434-6).

Shanmukaraj D., Grugeon S., Laruelle S., et al., *Hindered glymes for graphite-compatible electrolytes*, *Chemosuschem* 8, pp. 2691–2695, 2015 - <https://doi.org/10.1002/cssc.201505025>.

Smart M.C., Ratnakumar B.V., Chin K.B., et al., *Lithium-ion electrolytes containing ester cosolvents for improved low temperature performance*, *J. Electrochem. Soc.* 157, A1361, 2010 - <https://doi.org/10.1149/1.3501236>.

Smart M.C., Ratnakumar B.V., Surampudi S., et al., *Irreversible capacities of graphite in low-temperature electrolytes for lithiumion batteries*, *J. Electrochem. Soc.* 146, pp. 3963–3969, 1999 - <https://doi.org/10.1149/1.1392577>.

Smart M.C., Ratnakumar B.V., Surampudi S., *Use of organic esters as cosolvents in electrolytes for lithium-ion batteries with improved low temperature performance*, *J. Electrochem. Soc.* 149, A361, 2002 - <https://doi.org/10.1149/1.1453407>.

Świąder M., *The implementation of the concept of environmental carrying capacity into spatial management of cities: A review*, Management of Environmental Quality, vol. 29, no. 6, pp. 1059-1074, 2018

Thenuwara A.C., Shetty P.P., Kondekar N., et al., *Efficient lowtemperature cycling of lithium metal anodes by tailoring the solidelectrolyte interphase*, ACS Energy Lett. 5, pp. 2411–2420, 2020 - <https://doi.org/10.1021/acsenenergyl.0c01209>

Ueno K., Murai J., Ikeda K., et al., *Li⁺ solvation and ionic transport in lithium solvate ionic liquids diluted by molecular solvents*, J. Phys. Chem. C 120, pp. 15792–15802, 2016 - <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b11642>.

Walther G.-R., Beißner S., Burga C. A., *Trends in the Upward Shift of Alpine Plants*, in Journal of Vegetation Science, vol. 16, no. 5, pp. 541-48, 2005

Walther G.-R., Post E., Menzel A., Parmesan C., Beebee T. J., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F., *Ecological responses to recent climate change*, in Nature, pp. 389-395, 2002

Wang L.N., Menakath A., Han F.D., et al., *Identifying the components of the solid-electrolyte interphase in Li-ion batteries*, Nat. Chem. 11, pp. 789–796, 2019 - <https://doi.org/10.1038/s41557-019-0304-z>

Wang Q., Jiang I., Yu Y., Sun J., *Progress of enhancing the safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect*, Nano Energy, vol. 55, pp. 93-114, 2019

Xuning Feng, Minggao Ouyang, Xiang Liu, Languang Lu, Yong Xia, Xiangming He, *Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review.*, Energy Storage Materials, vol. 10, pp. 246-267, 2018 - <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>.

Zhang G., Cao L., Ge S., Wang C.Y., Shaffer E., Rahn C.D., *In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in Cylindrical Li-Ion Cells*, Journal of The Electrochemical Society, 2014, [Online] Available at: <http://ecec.me.psu.edu/Pubs/2014-Zhang-JES.pdf>

Wotango A., Su W.N., Haregewoin A.M., et al., *Designed synergetic effect of electrolyte additives to improve interfacial chemistry of MCMB electrode in propylene carbonate-based electrolyte for enhanced low and room temperature performance*, ACS Appl. Mater. Interfaces 10, pp. 25252–25262, 2018 - <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02185>.

Hu Xiaosong, Zheng Yusheng, Howey David A., Perez Hector, Foley Aoife, Pecht Michael, *Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives*, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 77, 2020 - <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806>

Xing L.D., Zheng X.W., Schroeder M., et al., *Deciphering the ethylene carbonate-propylene carbonate mystery in Li-ion batteries*, Acc. Chem. Res. 51, pp. 282–289, 2018 - <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00474>

Xu K., *Electrolytes and interphases in Li-ion batteries and beyond*, Chem. Rev. 114, pp. 11503–11618, 2014 - <https://doi.org/10.1021/cr500003w>.

Yamada Y., Koyama Y., Abe T., et al., *Correlation between charge-discharge behavior of graphite and solvation structure of the lithium ion in propylene carbonate-containing electrolytes*, J.Phys. Chem. C 113, pp. 8948–8953, 2009 - <https://doi.org/10.1021/jp9022458>

Yang Y., Fang Z., Yin Y., et al., *Synergy of weakly-solvated electrolyte and optimized interphase enables graphite anode charge at low temperature*, Angewandte Chemie Int. Ed., 61, e202208345, 2022 - <https://doi.org/10.1002/anie.202208345>.

Yao Y.X., Yao N., Zhou X.R., et al., *Ethylene-carbonate-free electrolytes for rechargeable Li-ion pouch cells at sub-freezing temperatures*, Adv. Mater. 34, 2206448, 2022 - <https://doi.org/10.1002/adma.202206448>.

Karaca Y., Cicek M., Tatli O., Sahin A., Pasli S., Beser M.F., Turedi S., *The potential use of unmanned aircraft systems (drones) in mountain search and rescue operations*, Am J Emerg Med., pp. 583-588, 2018

Zhang, S.S., Xu, K., Allen, J.L., et al.: Effect of propylene carbonate on the low temperature performance of Li-ion cells. *J. Power Sources* 110, 216–221 (2002). [https://doi.org/10.1016/S03787753\(02\)00272-0](https://doi.org/10.1016/S03787753(02)00272-0)

Zonouz A.F., Mosallanejad B., *Use of ethyl acetate for improving low-temperature performance of lithium-ion battery*, *Monatshefte Fur Chemie Chem. Mon.* 150, pp. 1041–1047, 2019 - <https://doi.org/10.1007/s00706-019-2360-x>.

Battery University, 2014. *Battery University*. [Online] Available at: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

Binder, 2014. *Thermoelectric cooling technology*. [Online] Available at: <http://www.binder-world.com/ext/getdownload.cfm?pub=74&lang=2>

Charged, 2014. *Charged electric vehicles magazine*. [Online] Available at: <http://chargedevs.com/features/allcell-technologies%E2%80%99-new-phase-change-thermal-management-material/>

CW, 2013. *Chevy Volt battery pack: Rugged but precise*. [Online] Available at: <http://www.compositesworld.com/articles/chevy-volt-battery-pack-rugged-but-precise>

Digikey, 2014. *Digikey*. [Online] Available at: <http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/api-technologies-1171/pdf/api-ptc-applications.pdf?redirected=1>

Eberspracher, 2014. *Eberspracher*. [Online] Available at: <http://www.eberspracher.com/products/electrical-heaters.html>

Electropaedia, 2014. *electropaedia*. [Online] Available at: <http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>

Electropaedia, 2014. *Lithium Battery Failures*. [Online] Available at: http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm

European Environment Agency. *Transport and environment report 2021, Decarbonising Road transport – the role of vehicles, fuel and transport demand*. 2022 Roland Irle. *Global EV Sales for 2022*, ev-volumes.com.

Incredibile salvataggio grazie al drone per Rick Allen, disperso e presunto morto sul Broad Peak. [Online] Available at: <https://www.montagna.tv/127162/incredibile-salvataggio-grazie-al-drone-per-rick-allen-disperso-e-presunto-morto-sul-broad-peak>.

Turchia: più di 100 soccorritori russi arrivati in Paese per assistere dopo terremoto. <https://www.agenzianova.com/a/63e1fc104fa621.32771441/4239054/2023-02-07/turchia-piu-di-100-soccorritori-russi-arrivati-in-paese-per-assistere-dopo-terremoto>.

Appendice A

Le "smart batteries" o batterie intelligenti sono batterie che includono circuiti integrati e tecnologie avanzate per monitorare e controllare diversi aspetti delle prestazioni della batteria. Queste batterie sono progettate per essere più sicure, efficienti e offrire funzionalità aggiuntive rispetto alle batterie tradizionali. Esse vengono già impiegate per alimentare droni come, ad esempio, il PX4 e Ardupilot e, laddove si volesse integrare questo sistema di gestione, esistono in commercio kit per aggiungere funzionalità di batteria intelligente alle batterie agli ioni di litio e LiPo standard.

Si riportano, di seguito, alcune delle caratteristiche comuni delle *smart batteries*:

1. Monitoraggio della Tensione:

Le smart batteries monitorano costantemente la tensione delle celle individuali e la tensione totale della batteria. Questo aiuta a evitare sovraccariche o scariche eccessive, proteggendo la batteria da danni e prolungandone la durata.

2. Bilanciamento delle Celle:

Una delle caratteristiche chiave delle smart batteries è il bilanciamento attivo delle celle. Questo processo assicura che tutte le celle abbiano la stessa carica, migliorando l'efficienza complessiva della batteria e prevenendo danni dovuti a sbilanciamenti.

3. Protezione da Sovraccarica e Sottocarica:

Le smart batteries includono circuiti di protezione integrati che impediscono alla batteria di essere sovraccarica o sottocarica. Questa funzionalità migliora la sicurezza e la durata della batteria.

4. Gestione Termica:

Alcune smart batteries includono sistemi di gestione termica per controllare la temperatura della batteria durante la carica, lo scarico e l'uso. Questo aiuta ad evitare il surriscaldamento eccessivo, che può danneggiare la batteria.

5. Comunicazione e Controllo:

Le smart batteries possono comunicare con il dispositivo che alimentano attraverso protocolli di comunicazione come SMBus, I2C, UART o Bluetooth. Questa comunicazione consente al dispositivo di monitorare lo stato della batteria in tempo reale e regolarne il funzionamento.

6. Capacità di Memorizzazione delle Informazioni:

Le smart batteries sono in grado di memorizzare e registrare dati sulle prestazioni passate della batteria, come il numero di cicli di carica/scarica, la capacità residua, la temperatura e altro ancora. Queste informazioni possono essere utilizzate per ottimizzare l'utilizzo della batteria nel tempo.

7. Indicatori LED o Display:

Molte smart batteries sono dotate di indicatori LED o display integrati che forniscono informazioni in tempo reale sulla carica residua, lo stato di carica delle celle e altre informazioni utili.

8. Funzionalità di Sicurezza Avanzate:

Le smart batteries includono varie funzionalità di sicurezza avanzate, come protezione da cortocircuiti, protezione da sovracorrente e protezione da surriscaldamento, per garantire un utilizzo sicuro.

9. Gestione dell'Autonomia:

Alcune smart batteries includono funzionalità per ottimizzare l'autonomia in base all'utilizzo, regolando automaticamente la potenza erogata in base alle esigenze del dispositivo collegato.

10. Carica Rapida e Efficiente:

Grazie alla gestione intelligente della carica, le smart batteries possono supportare cariche più rapide e efficienti, riducendo i tempi di attesa durante la ricarica.