

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

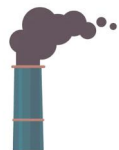
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Sistemi di gestione termica per
veicoli elettrici»***

Tutor universitario: Prof. Stefano Bortolin

Laureando: *Marco Costantini*

Padova, 14/9/2022



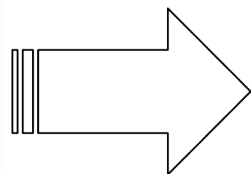
Inquinamento
ambientale



Crisi energetica



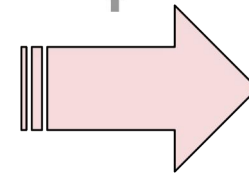
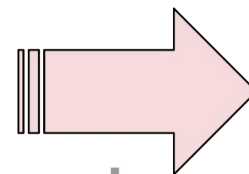
Cambiamenti
climatici



Ricerca nuova
fonte energetica

- Basso costo
- Green

- EFFICIENTE
- SICURA

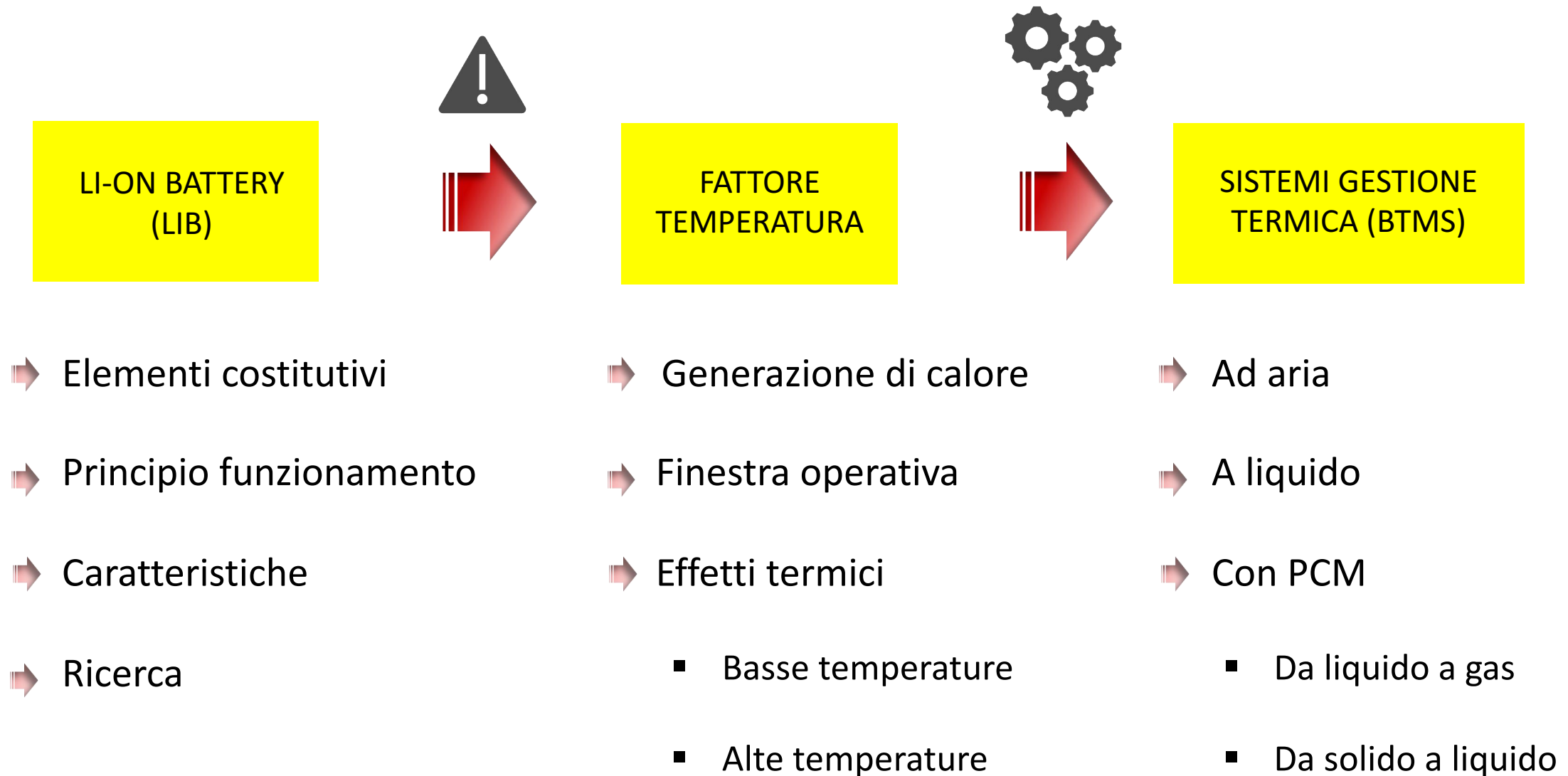


Tecnologia ioni di litio



**RIVOLUZIONE
ELETTRICA**

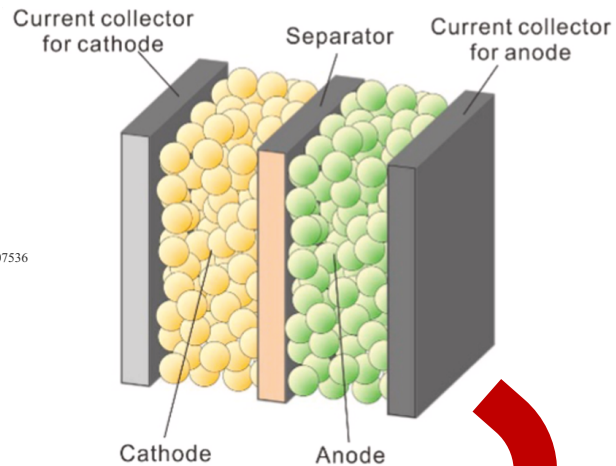
Sistemi di gestione termica



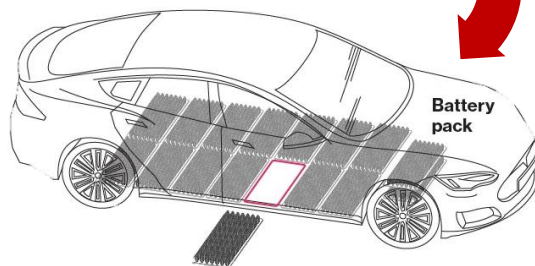
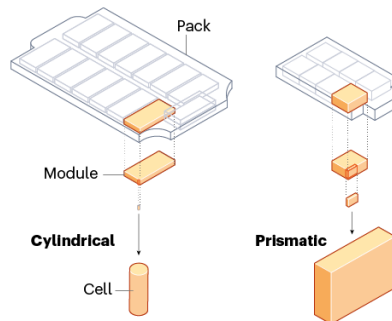
BATTERIE AGLI IONI DI LITIO (LIB)

ELEMENTI COSTITUTIVI:

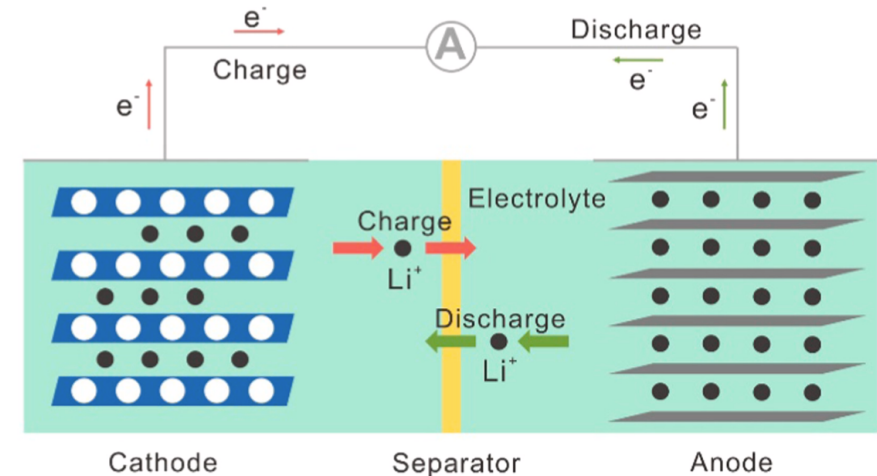
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>



LI-ON
BATTERY
(LIB)



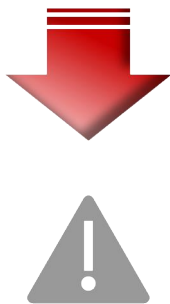
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>

CARATTERISTICHE ➡ Candidati ideali

- ✓ Densità energia elevata ➡ Estesa autonomia di guida
- ✓ Densità di potenza elevata ➡ Rapide accelerazioni
- ✓ Durata
- ✓ Lungo ciclo di vita
- ✓ Basso tasso di auto-scarica





GENERAZIONE DI CALORE

- ⇒ Resistenze interne
- ⇒ Reazioni elettrochimiche

FINESTRA OPERATIVA

⇒ 15 °C – 35 °C (range performance ottimale)

EFFETTI TERMICI

⇒ Bassa temperatura

- ↳ Influisce su proprietà elettrolita
- ↳ Resistenza al trasferimento di carica
- ↳ Placcatura al litio

⇒ Alta temperatura

- ↳ Degradazione prestazioni

- ↳ **Instabilità termica (o thermal runaway)** ⇒ Esplosione, incendio

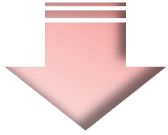
- ↳ Non uniformità temperatura ⇒ $\Delta T < 5\text{ °C}$
 - ↳ Singola cella
 - ↳ Fra celle



FATTORE
TEMPERATURA

PROBLEMI
DI
SICUREZZA





RUOLI CRUCIALI

- Mantenere **temperatura di esercizio** all'interno della **finestra operativa**
- Mantenere **distribuzione uniforme temperatura** all'interno sia della singola **cella** che del **pacco batteria**

TIPOLOGIE

BATTERY
THERMAL
MANAGEMENT
SYSTEM
(BTMS)

1) AD ARIA

- ↳ Convezione naturale
- ↳ Convezione forzata

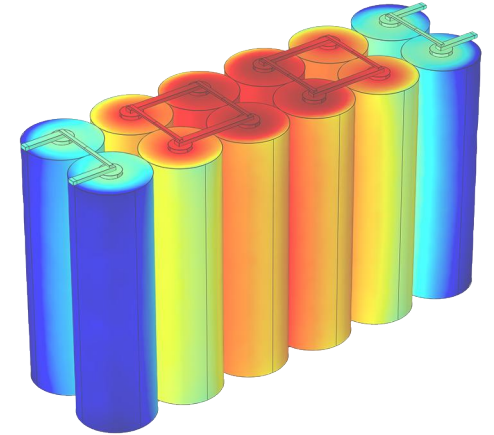
2) A LIQUIDO

Passivo

3) CON MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM – Phase Change Material)

- ↳ **Da liquido a gas (vapore)**
 - ↳ Boiling liquid battery cooling
 - ↳ Tubi di calore (Heat pipe)

- ↳ **Da solido a liquido**



1) BTMS AD ARIA

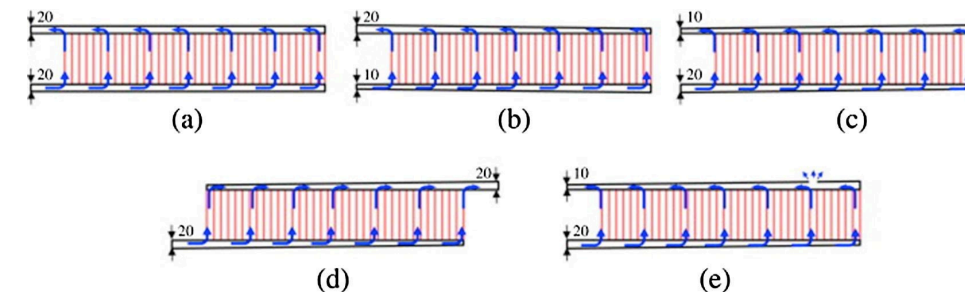
VANTAGGI: peso ridotto, configurazione semplice, basso costo e facile manutenzione

Convezione forzata (attivo)

- ⇒ **Coefficiente scambio termico convettivo** MOLTO > naturale
 - ↳ Più efficace ⇒ Maggiore efficienza raffreddamento
 - ↳ Maggiore consumo energetico
- ⇒ **Riduzione ΔT celle fino x4** (Ivanov et al.)
 - ↳ Migliore resistenza al locale surriscaldamento
 - ↳ Migliore resistenza instabilità termica
- ⇒ **Circolazione aria interna** più efficace e meno energivora rispetto esterna al pacco batteria (Bao et al.)
- ⇒ **Diversi tipi configurazioni condotti** ingresso/uscita (Park)
 - Collettore conico** (no modifica layout)
 - ↳ Diminuzione T_{max}
 - ↳ Diminuzione ΔT
 - ↳ Riduzione consumo energetico

Convezione naturale (passivo)

- ⇒ EFFICACE SOLO per batterie a BASSA DENSITÀ ENERGIA
- ⇒ Coefficiente scambio termico convettivo MOLTO < forzata
- ⇒ Attualmente poco studiata



1° 2° 3°

⇒ **Effetti diverse disposizioni celle** (Fan et al.): allineata – sfalsata – incrociata

Allineata ✓ – **Incrociata** ✗

↳ Prestazioni raffreddamento migliori

⚠ Limite superiore α velocità scarico

↳ Uniformità di temperatura migliore

↳ Riduzione efficienza energetica (fino 23%)

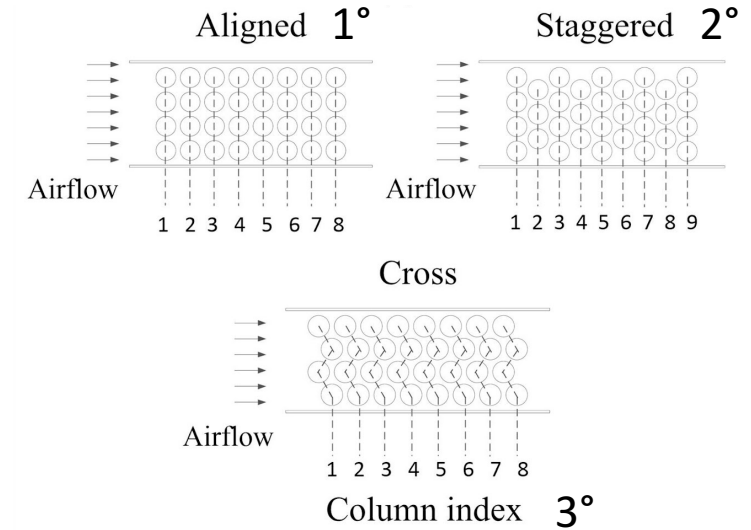
⚠ Diminuisce all'aumentare velocità ingresso aria

⇒ **Tubo di distribuzione aria** (Zou et al.)

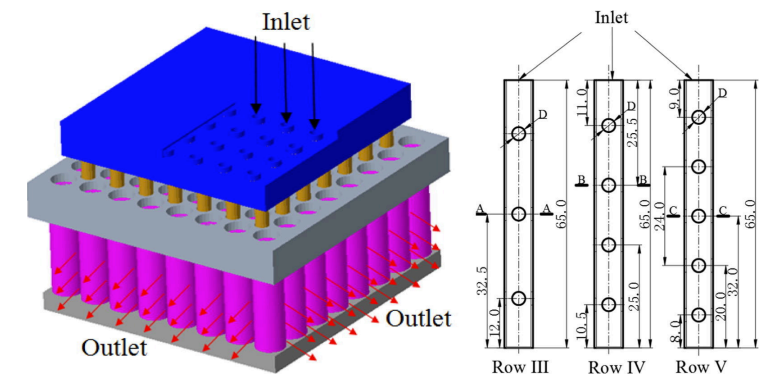
↳ Risolve problema $\Delta T_{raffreddamento}$ entrata > uscita

↳ Pressione ingresso: IMPORTANTE PARAMETRO PROGETTUALE

↳ Aumento diametro tubi o numero file fori → favorisce $\downarrow T_{max}$, ΔT uniforme



Fan Y, Bao Y, Ling C, et al. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries. Appl Therm Eng 2019; 155: 96–109.

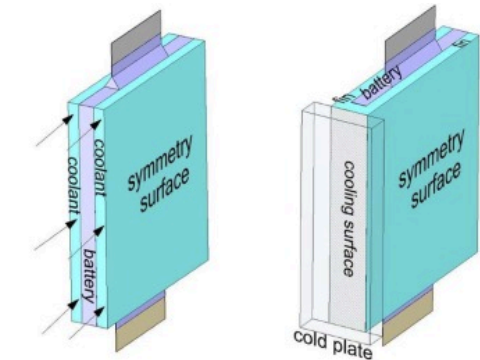


Zhou H, Zhou F, Xu L, et al. Thermal performance of cylindrical lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe. Int J Heat Mass Transfer 2019; 131: 984–998.

2) BTMS A LIQUIDO

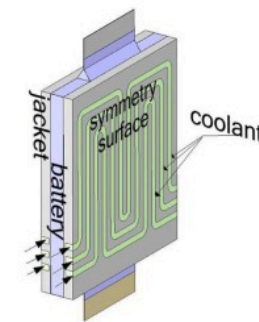
- ⇒ **Calore specifico > aria:** rimozione calore in eccesso più efficace
- ⇒ Distinzioni: diretto VS indiretto ; attivo VS passivo
- ⇒ **Confronto 4 strategie raffreddamento** (Chen et al.)

- **Aria convezione forzata**
 - ↳ Fino a 3x più energivoro (a parità T_{media} da mantenere)
- **Mediante alette metalliche (cold plate)**
 - ↳ +40% peso extra (a parità volume)
- **Liquido diretto** ⇒ scelta migliore e più pratica
 - ↳ T_{max} minore
- **Liquido indiretto**

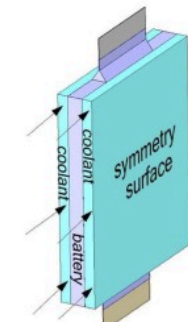


(a) Configuration of air cooling

(b) Configuration of fin cooling

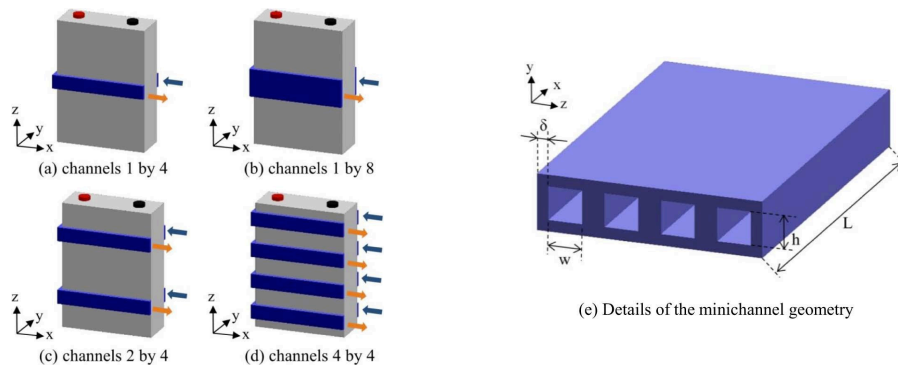


(c) Configuration of indirect liquid cooling



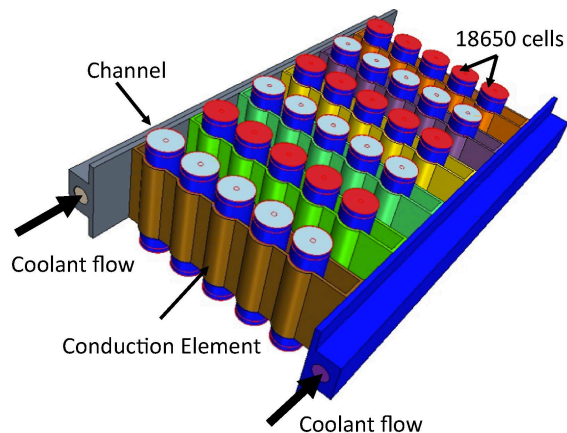
(d) Configuration of direct liquid cooling

⇒ **Nuovo design BTSM:** tubi piatti alluminio con mini-canali attorcigliati attorno celle prismatiche (Lan et al.)



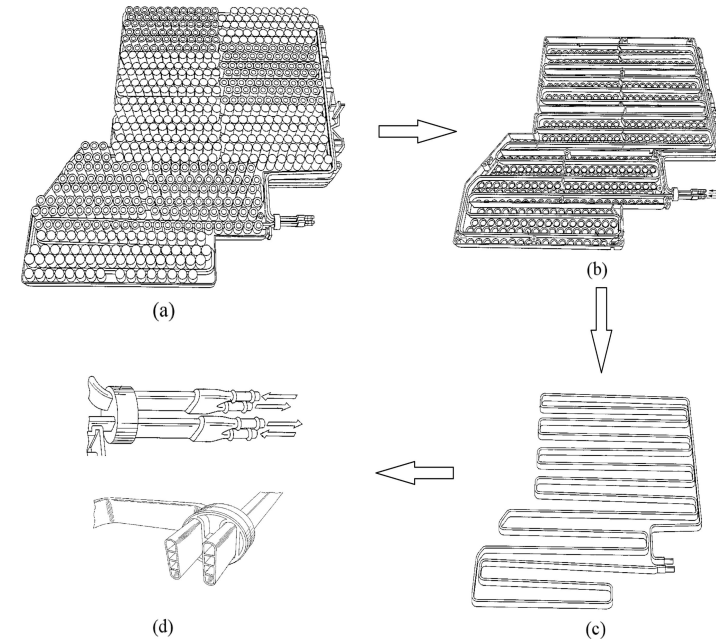
Lan C, Xu J, Qiao Y, Ma Y. Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. Appl Therm Eng 2016;101:284–92.

⇒ **Aggiunta elementi di conduzione altamente conduttivi** che avvolgono celle cilindriche (Basu et al.)



Basu S, Hariharan KS, Kolake SM, Song T, Sohn DK, Yeo T. Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system. Appl Energy 2016;181:1–13.

⇒ **BTSM impiegato da Tesla**



Adams DT, Berdichevsky G, Colson TE, Hebert A, Kohn S, Lyons D, et al. Battery pack thermal management system. US Patent 20090023056, vol. A1; 2009.

- Tubo di raffreddamento in Al rivestito con materiale dielettrico
- Piegato forma avvolge celle cilindriche 18650
- Fluido raffreddamento in circolazione: miscela acqua-glicole
- Flusso controcorrente: temperatura più uniforme

3.2) PCM (DA LIQUIDO A GAS)

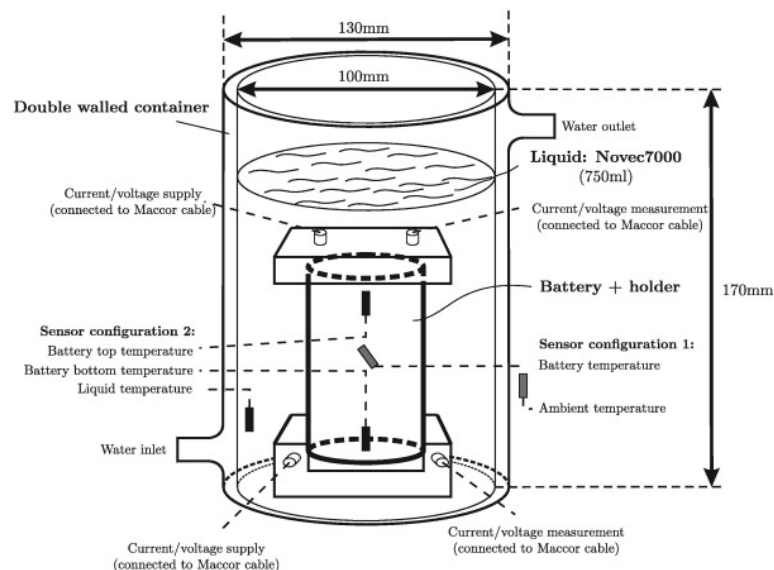
⇒ Utilizza calore latente di cambiamento di fase liquido - vapore

⇒ Può considerarsi anche un BTMS a liquido passivo

⇒ 2 tipologie

- 1) BTMS ad immersione bifase: evaporazione liquidi bassobollenti
- 2) BTMS con heat pipes (o tubi di calore)

Immersione bifase

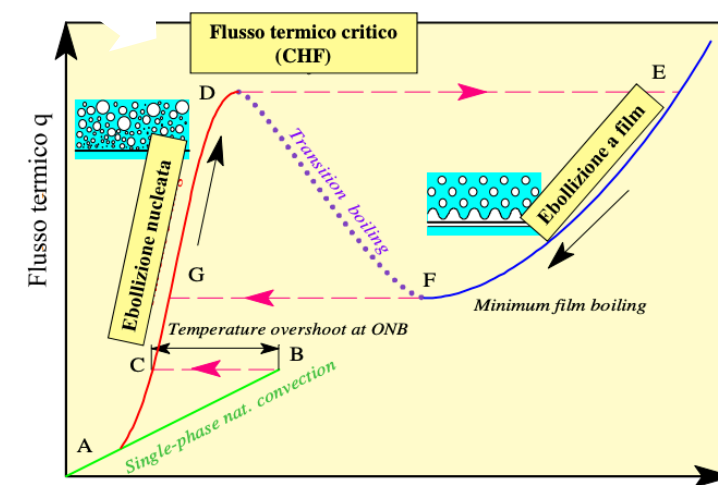


BTMS che sfrutta processo di ebollizione (Van Gils et al.)

- Fluido operativo: Novec 7000
 - Punto ebollizione 34 °C
 - Non infiammabile
 - Eccellente dielettrico
- Buone caratteristiche raffreddamento
- **Omogeneizzazione termica batteria**

Van Gils RW, Danilov D, Notten PHL, Speetjens MFM, Nijmeijer H. Battery thermal management by boiling heat-transfer. Energy Convers Manag 2014;79:9–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.006>.

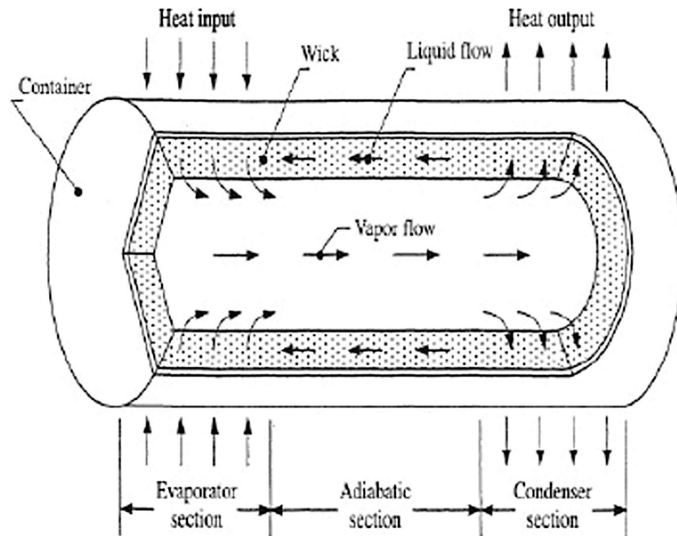
Curva di ebollizione: regimi processo ebollizione



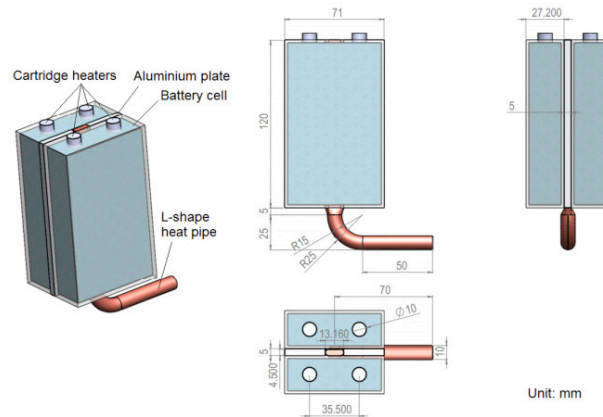
Sovratemperatura di parete $\Delta T = T_p - T_s$

W. Grassi - Ebollizione e flussi
bifase

Con heat pipes (tubi di calore)



Bandhauer TM, Garimella S. Passive, internal thermal management system for batteries using microscale liquid-vapor phase change. Appl Therm Eng 2013;61:756–69.



Heat pipes capillare

1) Zona dell'evaporatore:

assorbe calore $\rightarrow \uparrow T$ fluido operativo \rightarrow cambiamento fase

2) Zona adiabatica:

ΔT , Δp fra estremità calda/fredda \rightarrow getto vapore verso zona fredda

3) Zona del condensatore:

vapore raffredda \rightarrow condensa \rightarrow cede calore latente al tubo

Goccioline di vapore tornano alla sezione evaporatore attraverso struttura a stoppino (per gravita o effetto forze capillari)

\uparrow area di contatto $\rightarrow \uparrow$ scambio termico \rightarrow heat pipes saldati/attaccati a piatto di rame/alluminio o realizzati con sezione di evaporazione piatta

3.2) PCM (DA SOLIDO A LIQUIDO)

REQUISITI

LIMITI

REQUISITI RICHIESTI

≡ LIMITI INTRINSECI

T cambiamento di fase nel ΔT ottimale

Elevato calore specifico

Elevata conducibilità termica

Dilatazione a basso volume post camb. fase

Alto punto fusione (tipicamente $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Basso calore specifico (stato solido/liquido)

Scarsa conducibilità termica ($< 0.5\text{ W/mK}$)

Cambiamenti volume non trascurabili

SOLUZIONI

Aumentare conducibilità termica \Rightarrow Risposta lenta \Rightarrow Bassa efficienza termica

- \hookrightarrow Sospensione di riempitivi termicamente conduttivi (fibre di carbonio, grafene, nanoparticelle e nanotubi di carbonio) nei PCM;
- \hookrightarrow Incorporare PCM in mezzi porosi (schiume poliuretana o metalliche e matrice di grafite espansa)
- \hookrightarrow Fissaggio di reti metalliche, fogli di grafite o alette di raffreddamento.

Recupero calore latente \Rightarrow PCM sciolti \Rightarrow Crollo prestazioni raffreddamento ($<$ Diretto ad aria)

- \hookrightarrow Raffreddamento ad aria forzata e a liquido sono sempre incorporate nei sistemi PCM

Inefficaci per batterie grandi dimensioni e scariche notevole entità.

Necessità accurata scelta PCM e ulteriori studi per implementazione negli impieghi veicolari. Risultati non completamente soddisfacenti.



IL BTMS PERFETTO NON ESISTE!

GIOCO DI SQUADRA = BTMS COMBINATI: SINERGIA E INTEGRAZIONE PIU TIPOLOGIE DI BTSM

SVILUPPO DI NUOVI SISTEMI DI GESTIONE TERMICA O BATTERIE (es. stato solido)

Grazie per l'attenzione!