



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Controllo termico di sistemi di propulsione elettrica per la
mobilità sostenibile:**

**Modello sperimentale di un accumulatore agli
ioni di litio per bici a pedalata assistita**

*Thermal management of electric propulsion systems for
sustainable mobility:*

Experimental model of a lithium-ion accumulator for pedelec

Relatore:
Prof. Ing. **Renato Ricci**

Tesi di laurea di:
Elena Bernardi

Correlatore:
Ing. **Luca Giammichele**

Anno Accademico 2021/2022

*“Part of the journey
Is the end”*

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 SISTEMI DI GENERAZIONE DI POTENZA PER LA MOBILITA' SOSTENIBILE.....	3
1.1 SISTEMI DI ACCUMULO AGLI IONI DI LITIO	4
1.2 GESTIONE TERMICA DI SISTEMI DI ACCUMULO AGLI IONI DI LITIO.....	11
1.2.1 Raffreddamento ad aria	13
1.2.2 Raffreddamento a liquido	14
1.2.3 Gestione termica mediante PCM	17
1.2.4 Raffreddamento con Heat Pipe.....	19
2 VALUTAZIONE TERMICA DI UN PACCO BATTERIE: ANALISI SPERIMENTALE	21
2.1 SET-UP SPERIMENTALE.....	21
2.1.1 Sistema di gestione termica analizzato: Novec.....	22
2.1.2 Allestimento del pacco batterie	25
2.1.3 Taratura delle termocoppie	30
2.1.4 Sistema di gestione delle batterie per la carica e la scarica	32
2.1.5 Sistema di acquisizione	34
2.1.6 Determinazione dell'incertezza	36
2.1.7 Allestimento per prove termografiche	40
3 RISULTATI SPERIMENTALI	42
3.1.1 Misura del potenziale del pacco batterie	44
3.1.2 Misura delle temperatura superficiale delle celle	46
3.1.3 Misura della pressione all'interno del contenitore.....	52
3.1.4 Analisi termografica della distribuzione termica superficiale	54

3.2	Confronto tra modellazione numerica e risultati sperimentali	57
4	SET UP SPERIMENTALE E-BIKE	60
4.1	LATO BICICLETTA	60
4.1.1	Bicicletta elettrica	60
4.1.2	Freno magnetico	64
4.2	LATO CICLISTA	65
4.2.1	Sistema di trazione: motore Bafang.....	65
4.2.2	Sistema di controllo del motore	65
4.3	ACCOPPIAMENTO E-BIKE – MOTORE	68
4.4	SCHEMA FINALE DELL’ALLESTIMENTO	72
5	CONCLUSIONI	75
	APPENDICE A: Rette di calibrazione dei sensori	78
	APPENDICE B: Proprietà fisiche del Novec 7000.....	80
	APPENDICE C : Grafici prove sperimentali	83
	APPENDICE D: Immagini delle prove termografiche.....	89
	APPENDICE E: Dettagli componenti progettati	92
	BIBLIOGRAFIA.....	94
	RINGRAZIAMENTI.....	96

INDICE FIGURE

Figura 1 : Struttura di una batteria agli ioni di litio	5
Figura 2 : Confronto delle celle agli ioni di litio	6
Figura 3 : Bilanciamento passivo (a sinistra) e attivo (a destra)	7
Figura 4 : Rappresentazione schematica di una batteria agli ioni litio	8
Figura 5 : Sistemi di gestione termica (BTMS)	12
Figura 6 : Canale a Z per il raffreddamento con aria	13
Figura 7 : Raffreddamento ad aria con flusso alternato	14
Figura 8 : Raffreddamento a liquido con canale	15
Figura 9 : Raffreddamento a liquido con cold plate.....	15
Figura 10 : Sistemi di smaltimento del calore del fluido termovettore.....	16
Figura 11 : Confronto raffreddamento aria - liquido	16
Figura 12 : Funzionamento dei PCM con una batteria	18
Figura 13 : Principio di funzionamento di un Heat Pipe	20
Figura 14 : Allestimento per le riprese delle prove.....	24
Figura 15 : Pacco batterie immerso nel Novec 7000	24
Figura 16 : Batteria LiFePo4 ENERpower 18650	26
Figura 17 : Pacco batterie 3P3S.....	27
Figura 18 : Disposizione termocoppie sui due pacchi batterie	28
Figura 19 : Retta di calibrazione per la Termocoppia 1	30
Figura 20 : Incollaggio termocoppie.....	31
Figura 21 : Immersione delle batterie nel bagno termostatico	31
Figura 22 : Andamento della carica nelle batterie	33
Figura 23 : Allestimento prove termografiche	40
Figura 24 : Setup di misura.....	41
Figura 25 : Esempio di un programma per la scarica in Labview	41
Figura 26 : Voltaggio totale dei pacchi batterie 3P3S ai diversi C-rate.....	44
Figura 27 : Andamento TC1 ai diversi C-rate	46

Figura 28 : Ebollizione del Novec	47
Figura 29 : Andamento TC1, TC5 e TC6 con e senza Novec (3C)	48
Figura 30 : Andamento del voltaggio delle singole celle in 3C	49
Figura 31 : Confronto della temperatura del fluido con la cella centrale.....	51
Figura 32 : Confronto termocoppie a diverse altezze nel fluido (3C)	51
Figura 33 : Andamento della pressione (3C).....	53
Figura 34 : Allestimento della presa di pressione	53
Figura 35 : Grafico andamento termico con termografia (aria 3C)	55
Figura 36 : Grafico andamento termico con termografia (Novec 3C)	55
Figura 37 : Confronto modello numerico - sperimentale del caso in aria (3C).....	57
Figura 38 : Confronto modello numerico - sperimentale del voltaggio totale	58
Figura 39 : Confronto modello numerico - sperimentale caso Novec (3C)	59
Figura 40 : E-bike con motore anteriore	63
Figura 41: E-bike con motore posteriore	63
Figura 42 : E-bike con motore centrale.....	63
Figura 43 : Freno magnetico della Elite.....	64
Figura 44 : Esempio di segnale PWM	66
Figura 45 : Test sistema di controllo del motore	67
Figura 46 : Set-up lato ciclista	67
Figura 47 : Accoppiamento e-bike - motore	71
Figura 48 : Supporto sensore di velocità.....	71
Figura 49 : Schema riassuntivo del set-up per l'e-bike	73
Figura 50 : Set-up finale dell'e-bike.....	74
Figura 51 : Retta di calibrazione del sensore di corrente	78
Figura 52 : Sensore di corrente IT 65-S	78
Figura 53 : Retta di calibrazione del sensore pressione.....	79
Figura 54 : Sensore di pressione differenziale GEMS 5266	79
Figura 55 : Conducibilità termica del Novec 7000	80
Figura 56 : Densità del Novec 7000.....	81
Figura 57 : Calore specifico del Novec 7000	81

Figura 58 : Andamento voltaggio delle singole celle 3C	83
Figura 59 : Andamento della temperatura lungo una stessa batteria in 3C.....	84
Figura 60 : Andamento di tutte le TC sulle batterie in aria (3C)	85
Figura 61 : Andamento di tutte le TC sulle batterie Novec (3C)	85
Figura 62 : Andamento di tutte le TC sulle batterie in aria (2C)	86
Figura 63 : Andamento di tutte le TC sulle batterie Novec (2C)	86
Figura 64 : Andamento di tutte le TC sulle batterie in aria (1C)	87
Figura 65 : Andamento di tutte le TC sulle batterie Novec (1C)	87
Figura 66 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (aria 2C)	88
Figura 67 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (Novec 2C)	88
Figura 68 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (aria 1C)	88
Figura 69 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (Novec 1C)	88
Figura 70 : Confronto immagini termografiche aria (1C, 2C, 3C).....	90
Figura 71 : Confronto immagini termografiche Novec (1C, 2C, 3C).....	91
Figura 72 : Disegno quotato dell'albero lato bicicletta	92
Figura 73 : Disegno quotato dell'albero lato ciclista	92
Figura 74 : Dettaglio albero lato ciclista.....	93
Figura 75 : Accoppiamento lato ciclista	93

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 : Proprietà fisiche del Novec 7000 a 25 °C	23
Tabella 2 : Caratteristiche della batteria LiFePo4 18650 ENERpower	26
Tabella 3 : Calcolo incertezze dei sensori	39
Tabella 4 : C-rate di scarica	42
Tabella 5 : Volume di Novec utilizzato	45
Tabella 6 : Confronto della differenza di temperatura a fine scarica della TC1 ...	50
Tabella 7 : Parametri ambientali per prove termografiche	54
Tabella 8 : Estremi della scala nel caso aria	89
Tabella 9 : Estremi della scala nel caso Novec	89

INTRODUZIONE

In un periodo nel quale il risparmio energetico e l'inquinamento hanno un ruolo fondamentale, la necessità di sviluppare tecnologie in grado di ridurre le emissioni di CO₂ e il consumo di materie prime è di prioritaria importanza.

Dalle analisi svolte nelle principali città globali si è evidenziata una crescente pressione sulle infrastrutture di trasporto, dovuta ad un costante aumento della popolazione. [1]

Alla luce di ciò, nell'ultimo decennio, ci si è focalizzati sullo sviluppo di sistemi di propulsione elettrica che garantiscano, soprattutto in termini di autonomia, prestazioni tali da soddisfare un'ampia serie di esigenze.

È da precisare che l'elettrificazione dei trasporti, che rappresenta un punto fondamentale per la transizione ecologica ed energetica, non riguarda unicamente il trasporto su terra ma comprende anche quello in mare e in aria. Degni di nota, in questi settori, sono lo "Spirit of Innovation", che detiene attualmente il titolo di aereo elettrico più veloce al mondo, e la "Yangtze River Three Gorges 1", ovvero la più grande nave da crociera a zero emissioni.

Con l'affermarsi delle green mobility, si è venuta a delineare una nuova esigenza relativa all'ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi di accumulo elettrochimico. Tra questi, i più adottati sono quelli agli ioni di litio (Li-ion), comunemente noti come "batterie agli ioni di litio", per via delle loro ottime caratteristiche, tra cui elevata densità di potenza, basso peso e ridotto self-discharge (circa il 5% in 24h). Nonostante i notevoli vantaggi, queste batterie presentano alcune problematiche legate principalmente agli importanti fenomeni di riscaldamento in fase di utilizzo [2].

L'obiettivo che si pone questo lavoro di tesi è di valutare l'utilizzo di un fluido in cambiamento di fase, per la gestione termica di un pacco batterie agli ioni di litio e, successivamente, di estendere tale applicazione al caso di una bicicletta a pedalata assistita.

Lo studio è stato svolto a seguito di un precedente lavoro di tesi, in cui era stata valutata l'efficienza del medesimo sistema di raffreddamento per una singola cella, ed è parte di una ricerca più ampia che riguarda il controllo termico di diversi sistemi di propulsione elettrica per la mobilità sostenibile.

1 SISTEMI DI GENERAZIONE DI POTENZA PER LA MOBILITA' SOSTENIBILE

Ad oggi, i sistemi di trasporto sono responsabili di circa il 28% del consumo totale di energia nella maggior parte del mondo e rappresentano un quarto delle emissioni di gas serra (GHG) dell'Unione europea (Commissione europea, 2019). Basti pensare che nel 2016 negli Stati Uniti, il settore dei trasporti ha superato il settore energetico come fonte primaria di emissioni di gas serra (Bleviss, 2020) [3]. Pertanto, il settore della mobilità è senza dubbio l'area di intervento chiave per raggiungere l'obiettivo dell'UE di ridurre le emissioni gas serra di almeno il 40% entro il 2030 rispetto al 1990 [4].

Negli ultimi anni, infatti, si è delineata sempre più l'esigenza di ridurre notevolmente le emissioni climalteranti che non solo stanno determinando un aumento della temperatura terrestre, con conseguenti cambiamenti climatici, ma comportano anche una crescita nella diagnosi di malattie respiratorie e cardiovascolari. Va inoltre sottolineato che una transizione verso veicoli a trazione elettrica (mobilità verde) comporta anche una riduzione dell'inquinamento acustico che, ad oggi, rappresenta uno dei rischi principali per la salute e il benessere quotidiano di ognuno di noi.

dovuto al traffico che, ad oggi, rappresenta il secondo più grande impatto ambientale sulla salute [5].

Di fronte a questa sfida di sostenibilità globale nasce la necessità di ottimizzare non solo i sistemi di potenza per la mobilità sostenibile ma anche le tecnologie di rifornimento, in modo da ridurre le tempistiche di ricarica e implementare l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili. A queste esigenze si aggiungono poi altre problematiche, che limitano la diffusione su larga scala della green mobility, come gli elevati costi, non sempre accessibile a tutti, le basse autonomie e la difficoltà, soprattutto in alcune regioni, di accedere a zone di rifornimento. Infatti,

nonostante i numerosi progressi dell'ultimo decennio, che hanno portato allo sviluppo di batterie e motori elettrici sempre più efficienti e ad economie di scala sempre più favorevoli ai componenti base della mobilità elettrica, è necessaria una costante ricerca finalizzata al perfezionamento dei vari aspetti della mobilità elettrica.

La gran parte degli studi, incluso questo, si focalizza sul perfezionamento delle prestazioni del sistema di accumulo elettrochimico in modo che questo riesca a far fronte alle diverse esigenze degli utilizzatori. Un sistema di batterie, infatti, non si limita a supportare unicamente la trazione del veicolo elettrico ma deve anche garantire lo stoccaggio, il funzionamento dell'elettronica portatile e le applicazioni di accumulo di energia. Pertanto, negli ultimi anni, le ricerche sono state indirizzate verso lo sviluppo di nuovi materiali, che garantiscano prestazioni migliori in termini di potenza, e verso sistemi di gestione termica delle batterie. Per il momento, le batterie agli ioni di litio risultano predominanti nel settore della green mobility, sia per l'alta densità di energia che per l'elevato numero di cicli di carica e scarica e per il basso livello di auto-scarica in condizioni di riposo [6].

1.1 SISTEMI DI ACCUMULO AGLI IONI DI LITIO

Un sistema di accumulo dell'energia elettrica, o accumulatore elettrico, è un dispositivo in grado d'immagazzinare energia durante la fase di carica, di conservarla per un tempo più o meno lungo e di restituirla più o meno integralmente quando viene richiesta. In sostanza, l'accumulatore elettrico consente di separare nel tempo la generazione dell'energia elettrica dal suo utilizzo. Va sottolineato che tutti i processi di conversione dell'energia sono complessi e comportano perdite che vengono valutate mediante il rendimento energetico dell'accumulatore.

Tra le diverse tipologie di sistemi di accumulo, classificati sulla base del tipo di energia immagazzinata, quelli di maggior interesse sono di tipo elettrochimico.

Questi accumulatori elettrici, noti comunemente come “batterie ricaricabili”, utilizzano la proprietà che hanno certe coppie chimiche di accumulare energia modificando la loro struttura molecolare in modo reversibile. Tra tutte le possibili combinazioni chimiche la più utilizzata, soprattutto per la sua elevata capacità specifica e per il ridotto self-discharge, è quella agli ioni di litio (Li-Ion).

Le batterie così realizzate presentano un catodo (elettrodo positivo) in ossido di metallo e un anodo (elettrodo negativo) in grafite, che hanno il compito di ospitare gli ioni di Litio. Ai due elettrodi vengono affiancati dei collettori di corrente (alluminio per il catodo e rame per l’anodo) in modo da favorire il moto degli elettroni dalla cella al circuito, evitando che avvengano reazioni indesiderate agli elettrodi. Tra anodo e catodo, inoltre, è presente un separatore, che consente il trasporto degli ioni e impedisce il passaggio diretto degli elettroni da un polo all’altro. L’intera batteria è poi immersa nell’elettrolita, cioè in una soluzione salina non acquosa che favorisce il movimento degli ioni di Litio da un elettrodo all’altro.

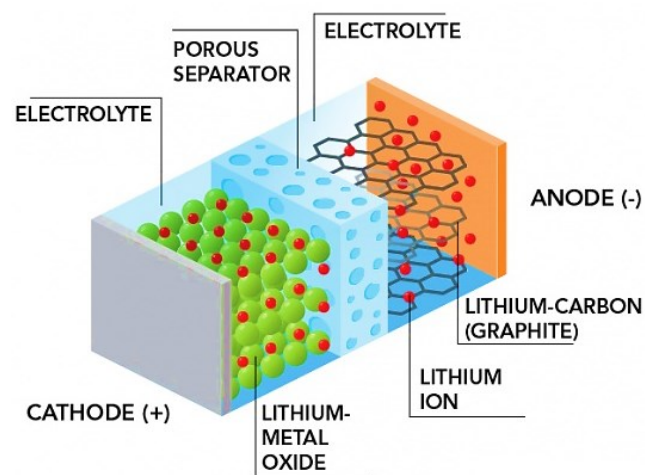


Figura 1 : Struttura di una batteria agli ioni di litio

I sistemi di accumulo agli ioni di litio si differenziano anche in base al fattore di forma della cella della batteria (moneta, cilindrico, prismatico e sacchetto) che influisce notevolmente sulle prestazioni termiche e sui design di imballaggio dei sistemi di batterie.

Un confronto, in termini di forma, materiali e parametri chiave delle prestazioni delle diverse tipologie di celle Li-Ion (densità di energia, costo/kWh e prestazioni termiche) è presentato nella Figura 2.

Nella mobilità elettrica si utilizzano principalmente le celle cilindriche che, oltre ad avere una densità di energia superiore, presentano un migliore trasferimento di calore soprattutto grazie a una temperatura della cella più uniforme, a un rapporto superficie/volume più elevato e a spazi intrinseci tra le celle maggiori. Le celle a moneta, prismatiche o a sacchetto sono, invece, molto utilizzate nelle applicazioni elettroniche per via dei minori vincoli di imballaggio [6].

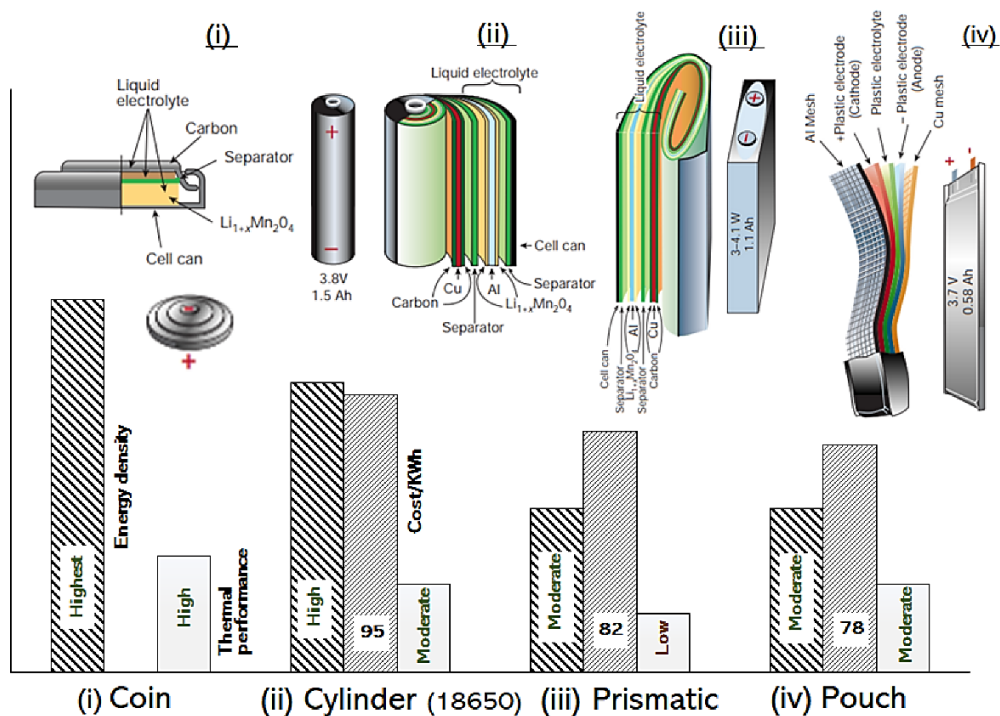


Figura 2 : Confronto delle celle agli ioni di litio

Per realizzare un pacco batterie le singole celle vengono collegate in serie, in modo da ottenere un modulo di voltaggio maggiore rispetto al singolo elemento, e poi in parallelo, per aumentare la capacità totale. È fondamentale che il sistema finale sia provvisto di un BMS (Battery Management System) ovvero di una scheda elettronica che ha lo scopo di monitorare e bilanciare la carica delle singole celle del pacco. Il bilanciamento effettuato da questo componente, che garantisce un prolungamento del ciclo di vita delle batterie, può essere di due tipi:

1. Bilanciamento passivo, dove le celle con un eccesso di carica dissipano calore utilizzando delle apposite resistenze, affinché tutte le batterie del pacco raggiungano uno stato di carica (SoC) simile. Questa tipologia di bilanciamento è semplice ed economica; tuttavia, risulta lenta, genera calore indesiderato e riduce la capacità residua di tutte le celle a quella con lo stato di carica più basso.
2. Bilanciamento attivo, dove la carica viene ridistribuita tra le varie celle durante i cicli di carica e scarica. In questo modo, non solo viene prolungata l'autonomia ma si riducono anche i tempi di ricarica.

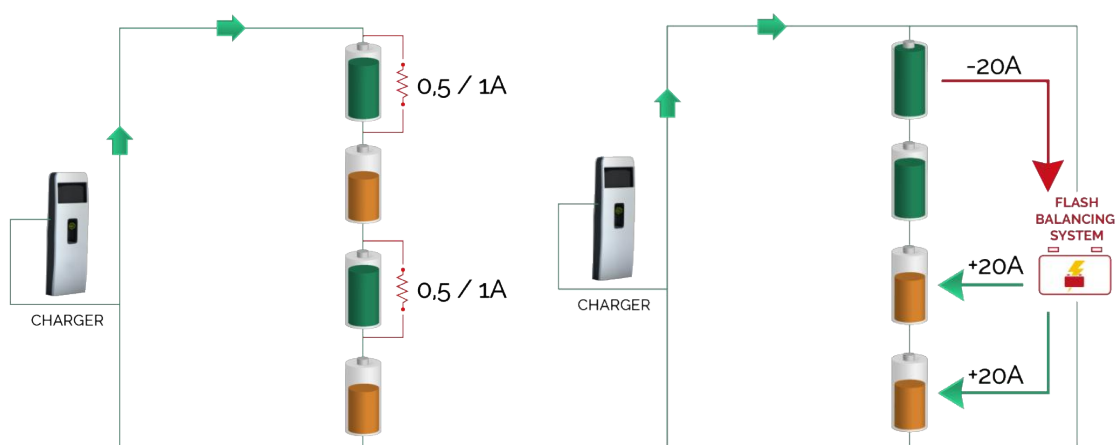


Figura 3 : Bilanciamento passivo (a sinistra) e attivo (a destra)

Il funzionamento delle batterie agli ioni di Litio si basa su delle reazioni elettrochimiche di riduzione e ossidazione (redox), che convertono l'energia chimica in energia elettrica. In particolare, nel caso di batterie Li-ion secondarie, come quelle da noi utilizzate, queste reazioni risultano reversibili, il che significa che è possibile anche la conversione di energia elettrica in energia chimica e quindi la ricarica [7].

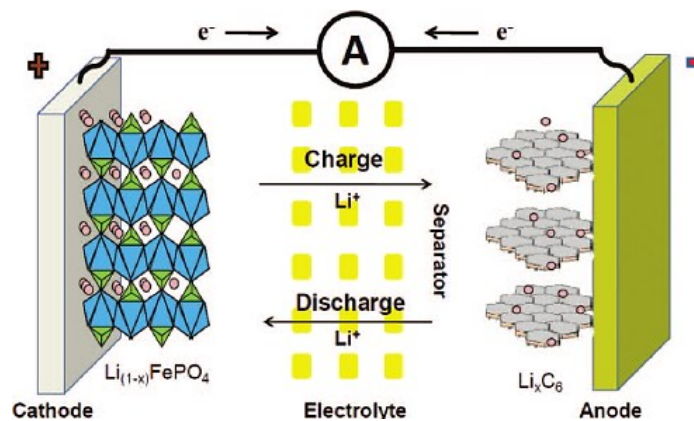


Figura 4 : Rappresentazione schematica di una batteria agli ioni litio

Come è chiaramente riportato nella Figura 4, nella fase di carica gli ioni positivi di Litio si spostano dal catodo all'anodo, portando così ad una migrazione degli elettrodi e quindi all'ossidazione del catodo. Durante la scarica, invece, gli ioni e gli elettroni seguono il percorso inverso, fornendo così corrente all'utilizzatore. È importante evidenziare che queste reazioni elettrochimiche, di riduzione e ossidazione, non sono prive di dissipazioni interne. Le batterie, infatti, presentano delle inefficienze interne che comportano delle perdite soprattutto sotto forma di calore. Considerando che l'intervallo ottimale di temperatura delle celle agli ioni di litio è compreso tra 25 e 40 °C, risulta necessario, soprattutto nel caso di un pacco batterie, sviluppare un sistema di raffreddamento uniforme in modo da evitare condizioni di lavoro estreme. Infatti, il funzionamento prolungato al di fuori del range termico consigliato, può determinare fenomeni di surriscaldamento e di instabilità termica (Thermal runaway) a cui seguono un deterioramento delle batterie e, nei casi gravi, esplosioni.

Per la progettazione di un impianto di raffreddamento risulta necessario valutare, dapprima, la potenza termica da dissipare e, quindi, la distribuzione della temperatura nelle celle nelle diverse condizioni di funzionamento. Nella letteratura sono due i modelli principalmente utilizzati per valutare la produzione di calore in una batteria: il modello termico, o a parametri concentrati, e il modello elettrochimico.

Il primo risulta molto più immediato e studia la batteria come una scatola chiusa in grado di produrre calore. La temperatura della batteria viene assunta uniforme lungo la stessa e la variazione termica è determinata a partire dalle reazioni, dalle variazioni di capacità termica del sistema, dai cambiamenti di fase, dal lavoro elettrico e dal trasferimento di calore in ambiente.

Il modello termico, quindi, descrive la generazione di calore in una cella tramite un'equazione semplificata, ottenuta partendo dallo studio completo della batteria eseguito da Bernardi [8]:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{rev} = I \cdot (V - U_{OC}) + I \cdot T \cdot \frac{\partial U_{OC}}{\partial T} \quad (1)$$

dove I è la corrente di scarica, V è il potenziale della batteria sotto carico, U_{OC} è il potenziale in assenza di carico (a circuito aperto) e T è la temperatura della cella in Kelvin.

Scendendo più nel dettaglio si ha che: il primo termine dell'equazione rappresenta il calore irreversibile per via delle perdite ohmiche e quindi della resistenza interna della cella; il secondo termine, invece, rappresenta il calore entropico reversibile. Per quanto riguarda la componente irreversibile, il termine tra parentesi può essere determinato attraverso il metodo delle scariche pulsate intermittenti o mediante la valutazione dell'impedenza elettrochimica. Moltiplicando quanto ottenuto per la corrente I , che attraversa la batteria, si ottiene il calore di

polarizzazione. La corrente di funzionamento è stata fissata come negativa durante la scarica, di conseguenza il contributo irreversibile è sempre positivo.

Il termine reversibile è legato, invece, alle variazioni del coefficiente entropico ($\partial U_{OC}/\partial T$) nella reazione elettrochimica e varia significativamente con lo stato di carica (SoC) e con la composizione chimica della batteria. Questo contributo può essere negativo o positivo; durante il processo di scarica un valore negativo sta ad indicare che il calore reversibile è esotermico e quindi si registra un aumento di temperatura della cella, mentre un valore positivo fornisce un calore reversibile è endotermico [2].

Va sottolineato però che a velocità di carica e scarica elevate, la generazione di calore irreversibile è di molto superiore alla generazione di calore entropico reversibile. Pertanto, in tali condizioni, il contributo entropico non è sempre considerato. Infatti, il termine dovuto all'effetto Joule con la corrente secondo la seguente espressione:

$$V - U_{OC} = I^2 \cdot R_{elettrica} \quad (2)$$

Il contributo entropico, invece, aumenta linearmente con la corrente. Di conseguenza, l'effetto netto della generazione di calore entropico reversibile potrebbe essere trascurabile dopo un ciclo completo di carica e scarica [6].

Il modello elettrochimico, invece, permette un approccio più rigoroso ma necessita di una conoscenza approfondita dei parametri relativi alla composizione degli elettrodi e dell'elettrolita della cella. In questo caso, infatti, si tiene conto dei fenomeni chimici reali all'interno della batteria. Questo comporta l'utilizzo di numerose equazioni differenziali non lineari, la cui risoluzione richiede un peso computazionale notevole. Pertanto, i modelli elettrochimici non sono utilizzati per applicazioni real-time di monitoraggio delle batterie; ma piuttosto sono impiegati soprattutto in simulazioni il cui fine sia quello di andare a migliorare la progettazione della cella a livello di geometrie e materiali impiegati [9].

1.2 GESTIONE TERMICA DI SISTEMI DI ACCUMULO AGLI IONI DI LITIO

Come è stato già sottolineato nel paragrafo precedente, le prestazioni e la durata dei sistemi di accumulo agli ioni di litio dipendono fortemente dalle condizioni termiche di funzionamento. Pertanto, affinché il pacco batterie lavori nel range di temperature ottimali (20 – 40°C) e quindi abbia il maggior numero di cicli di carica e scarica, è fondamentale elaborare un sistema di gestione termica della batteria, o Battery Thermal Management System (BTMS), efficiente.

Un altro aspetto fondamentale, che influenza il deterioramento e la perdita di prestazioni delle batterie, è la disuniformità delle temperature dei vari moduli all'interno del pacco, in tali condizioni infatti si avrà che ogni modulo verrà scaricato in modo diverso ad ogni ciclo, portando ad un peggioramento delle prestazioni dell'intero sistema.

Infine, un mancato controllo della temperatura durante la scarica può comportare l'instaurarsi di un'instabilità termica (Thermal Runaway), ovvero l'avvio di una reazione a catena inarrestabile che porta ad un rilascio repentino dell'energia immagazzinata nella batteria, con un conseguente aumento del calore generato. Si ha così una degradazione rapida e irreversibile del modulo che, nelle situazioni peggiori, può innescare anche un'esplosione [10].

Attualmente esistono diversi sistemi di raffreddamento, più o meno efficienti, che vengono classificati principalmente in funzione del mezzo con il quale si asporta calore (aria, liquido o phase change material). In alternativa, le tecniche di gestione termica vengono divise tra sistemi attivi e sistemi passivi. I primi comprendono tutti quei metodi che richiedono energia per il funzionamento, come ad esempio il raffreddamento con aria in convezione forzata o con liquido (Figura 11). Questi risultano i più utilizzati nella mobilità elettrica e possono essere a diretto contatto con le celle, che risultano quindi immerse nel flusso, o a contatto indiretto, come avviene ad esempio nella Tesla.

Gli studi dimostrano che in questo secondo caso si ha una perdita di efficienza, di circa quattro volte, nel trasferimento del calore, dovuta principalmente alla resistenza di contatto tra la tubazione che contiene il fluido di raffreddamento e la batteria.

I sistemi passivi, invece, non richiedono alcun consumo elettrico in quanto si basano sul cambiamento di fase e, seppur ancora in fase di sviluppo, sono i più promettenti. Tra questi si distinguono i materiali in cambiamento di fase (PCM) e i Heat pipe [11].

Per incrementare ulteriormente l'efficienza dei sistemi di raffreddamento, e sfruttare sia i vantaggi dei sistemi attivi che di quelli passivi, sono stati realizzati i sistemi ibridi che combinano entrambe le tecnologie. I più comuni sono quelli che abbinano i PCM con l'aria in convezione forzata o con le Heat pipe [12].

Di seguito si vanno ad illustrare, più nel dettaglio, i principali sistemi di gestione termica delle batterie agli ioni di litio.

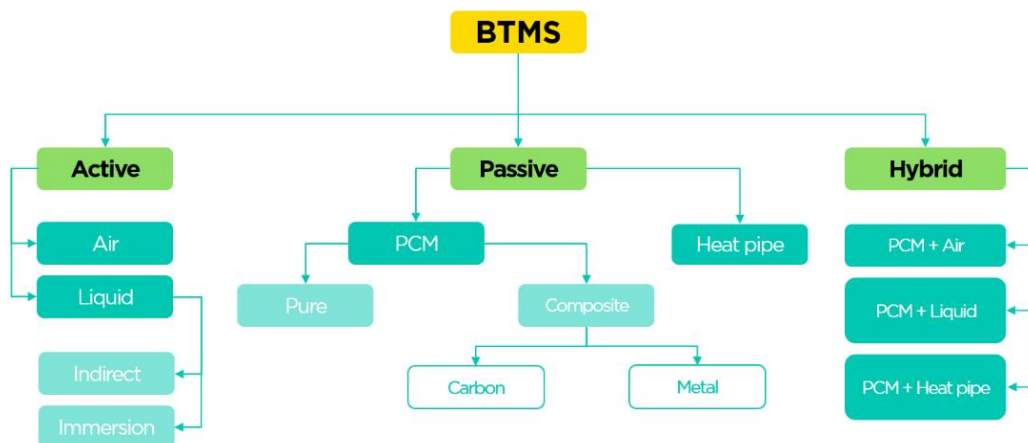


Figura 5 : Sistemi di gestione termica (BTMS)

1.2.1 Raffreddamento ad aria

Tra le diverse strategie di raffreddamento quella più diffusa, sia per la semplicità che per la convenienza economica, sfrutta l'aria, in convezione naturale o forzata, come fluido termovettore. Il funzionamento di questo sistema è influenzato da diversi parametri come la temperatura in ingresso del fluido, le condizioni ambientali, l'umidità dell'aria e la superficie di scambio termico.

È importante sottolineare che nel caso della convezione naturale si ha un coefficiente di scambio termico convettivo di circa $5-10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mentre per la convezione forzata è notevolmente più alto ($50-300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Inoltre, a causa delle proprietà termofisiche dell'aria, come bassa capacità e conducibilità termica, è necessario garantire un'elevata portata del fluido per ottenere un raffreddamento accettabile del pacco batterie. Tutto ciò si traduce in elevati consumi da parte del ventilatore, che permette la convezione forzata, e in un aumento del distanziamento tra le batterie.

Negli ultimi anni, i ricercatori hanno sviluppato diverse configurazioni del canale di raffreddamento, in modo da ottimizzare il passaggio dell'aria all'interno del pacco ed evitare la presenza di flussi bloccati che creano ristagni. Infatti, l'utilizzo di canali a Z o ad U permette la riduzione della distribuzione disomogenea della temperatura, garantendo così condizioni termiche più uniformi [13].

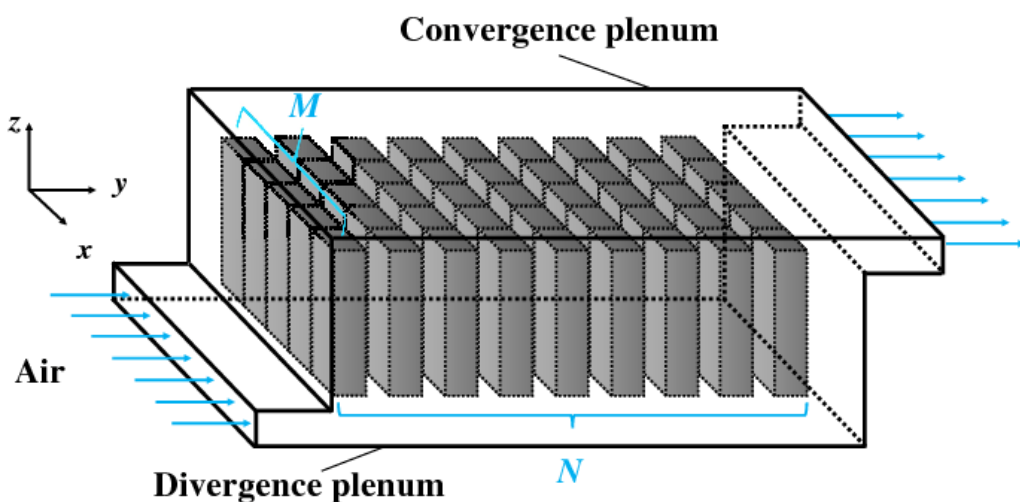


Figura 6 : Canale a Z per il raffreddamento con aria

Un altro sistema, che viene utilizzato per il raffreddamento con aria in convezione forzata, prevede l'utilizzo di un flusso alternato con il quale si distrugge periodicamente lo strato limite termico. Infatti, andando ad alternare il punto di ingresso e di uscita dell'aria (Figura 7) si garantisce una distribuzione più omogenea del calore. Con questa configurazione solo le celle al centro avranno uno sviluppo significativo dello strato limite, che rimane comunque inferiore al caso del flusso unidirezionale [6].

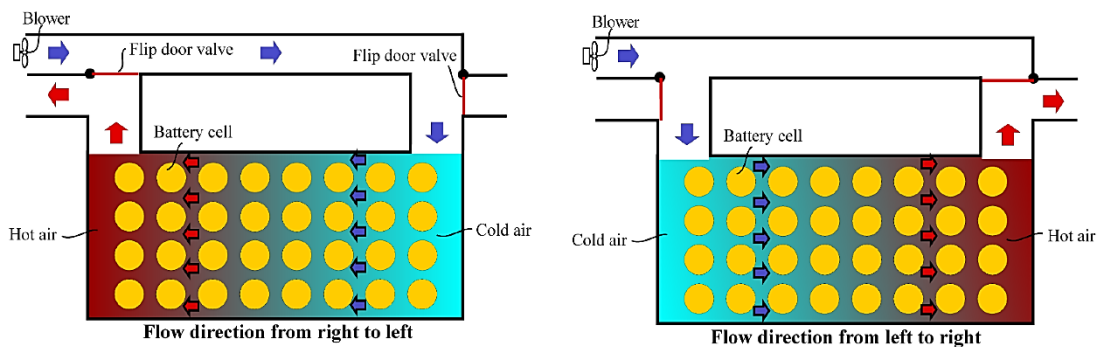


Figura 7 : Raffreddamento ad aria con flusso alternato

1.2.2 Raffreddamento a liquido

Il raffreddamento a liquido consente un miglior controllo termico, a parità di scambiatore di calore, rispetto al raffreddamento ad aria e per questo è più adatto a veicoli di potenza maggiore. Il fluido più comunemente utilizzato in questa applicazione è una miscela di acqua e glicole etilenico. Pur avendo una capacità termica significativamente maggiore, questo sistema non è esente da svantaggi che sono per lo più legati all'aumento di peso e alla complessità costruttiva. Pertanto, si opta per questa soluzione solamente quando le prestazioni termiche richieste nelle applicazioni giustificano l'incremento della complessità, come nel caso di grandi veicoli elettrici.

Il BTMS a base liquida può essere a contatto diretto o a contatto indiretto. Nel primo caso il processo di trasferimento del calore dipende dalla conduzione e dalla convezione sulla superficie delle batterie. In questo caso è fondamentale che il fluido termovettore non determini fenomeni corrosivi, che presenti buone

proprietà dielettriche e che abbia bassa capacità di reazione con il materiale della cella. Ad esempio, il refrigerante a base di olio ha un buon comportamento e fornisce un coefficiente migliore di scambio termico rispetto all'acqua, ma la sua elevata viscosità aumenta significativamente la caduta di pressione. Nel caso indiretto, invece, questo problema non sussiste in quanto non c'è nessun contatto tra la superficie della batteria e il refrigerante. In questo caso, i fluidi termovettori possono scorrere attraverso delle tubazioni in PVC disposte all'interno del pacco (Figura 8) oppure all'interno di una cold plate posta a contatto con le celle (Figura 9). Il BTMS a base liquida può essere ulteriormente migliorato andando ad utilizzare metalli liquidi o nanofluidi. Questi ultimi, in particolare, sono una nuova classe di fluidi termovettori e sono ottenuti disperdendo e stabilizzando delle nanoparticelle, con dimensioni tipiche dell'ordine di 10 nm, in tradizionali fluidi termovettori. Così facendo si ottengono dei liquidi con una conducibilità termica molto più elevata e con proprietà meccaniche, ottiche, elettriche e magnetiche uniche [14].

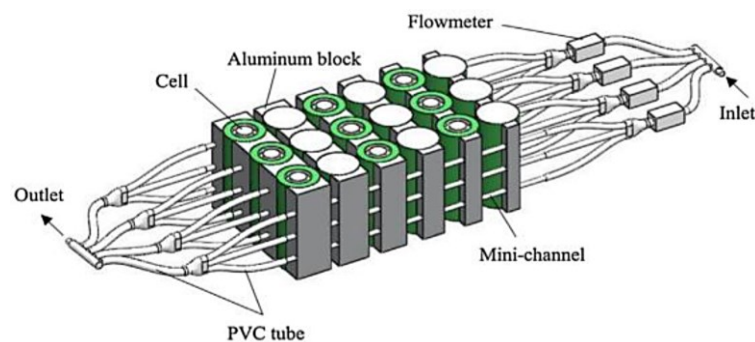


Figura 8 : Raffreddamento a liquido con canale

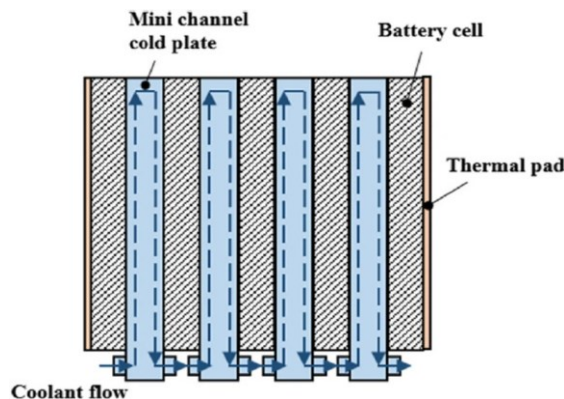


Figura 9 : Raffreddamento a liquido con cold plate

Sia nel caso diretto che nel caso indiretto è necessario un sistema di smaltimento del calore immagazzinato nel fluido termovettore. Solitamente si ricorre al raffreddamento con aria in convezione forzata o con chiller (Figura 10), soprattutto nel caso di sistemi che sviluppano un'elevata potenza termica.

In conclusione, un sistema di raffreddamento a liquido realizza un trasporto del calore più veloce, rispetto al BTMS con aria, permette la realizzazione di pacchi batterie più compatti e garantisce una maggiore uniformità termica. Tuttavia, è richiesta una particolare attenzione nella progettazione, soprattutto al fine di evitare perdite di fluido che possono provocare incidenti, ed è necessario un sistema di pompaggio che grava sul costo finale [6].

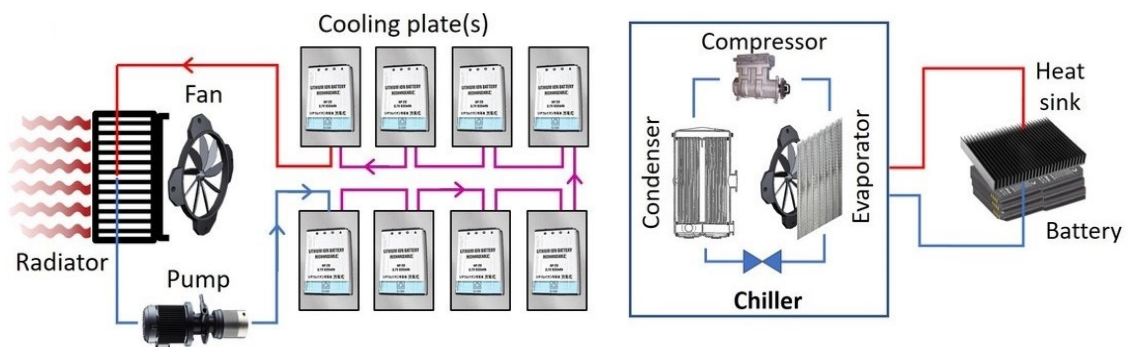


Figura 10 : Sistemi di smaltimento del calore del fluido termovettore

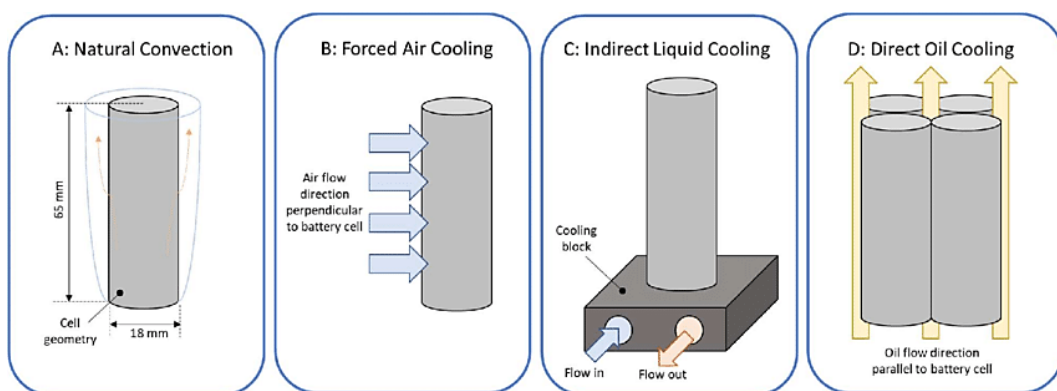


Figura 11 : Confronto raffreddamento aria - liquido

1.2.3 Gestione termica mediante PCM

I sistemi di raffreddamento finora affrontati, seppur ottimizzati, presentano alcuni svantaggi come elevati ingombri, complessità costruttiva ed elevato consumo di energia per il funzionamento. Pertanto, nell'ultimo decennio, la ricerca si è concentrata sullo sviluppo di BTMS passivi, in cui il raffreddamento non comporta un aumento dei consumi da parte di dispositivi aggiuntivi. Tra questi si è distinto il sistema di gestione termica basato sull'utilizzo di materiali in cambiamento di fase, o phase change materials (PCM), che permettono l'assorbimento di un'elevata quantità di calore e il contenimento dei picchi di potenza termica. Nello specifico si può avere fusione, nel caso di un PCM solido, o ebollizione, nel caso di un liquido. In entrambe le situazioni, durante il passaggio di stato, la temperatura resta costante e il sistema assorbe un'elevata quantità di calore latente. Come è evidente anche dalla Figura 12, e come verrà affrontato meglio in seguito, l'utilizzo di questo sistema di raffreddamento consente di contenere l'incremento di temperatura del pacco batterie [15].

Nonostante i notevoli vantaggi, la maggior parte dei materiali in cambiamento di fase presenta una conduttività termica inferiore ai materiali metallici. Negli anni, per cercare di ovviare a questo problema, sono state sperimentate diverse soluzioni. Eftekhari et al., ad esempio, utilizzavano la cera di paraffina come rete metallica riempita di PCM per aumentare la conducibilità termica. Seeniraj et al., invece, hanno aggiunto delle particelle metalliche ad alta conduttività, come rame o alluminio, nel PCM per migliorare le prestazioni di accumulo di calore [16].

Talvolta, per ottimizzare le prestazioni del sistema di gestione termica si combina l'utilizzo di sistemi di raffreddamento attivi con i phase change materials.

Raffreddamento ad immersione diretta in un liquido basso bollente

Negli ultimi anni, la ricerca si è concentrata sui Phase change materials liquidi in quanto prevedono notevoli vantaggi grazie alla possibilità di effettuare un raffreddamento ad immersione diretta nel fluido. Questo, oltre ad aumentare notevolmente la superficie di scambio termico, elimina la resistenza di contatto, favorendo così un incremento sia della capacità di raffreddamento che della velocità di scambio termico.

Di fondamentale importanza, affinché il fluido basso bollente svolga a pieno la sua funzione, è la temperatura di cambiamento di fase che deve essere compatibile con le temperature di utilizzo del pacco batterie. Per questo studio, ad esempio, è stato selezionato un fluido ingegneristico (Novec 7000) che va in ebollizione a circa 34°C. Altrettanto rilevante è la non conducibilità elettrica e la non infiammabilità, che rendono il sistema più sicuro per quanto riguarda cortocircuiti ed esplosioni rispetto alla maggior parte di PCM solidi che sono invece molto infiammabili.

Ad oggi, questo sistema di raffreddamento è utilizzato in alcuni data center, dove i componenti elettronici sono direttamente immersi nel liquido. Qui il calore degli elementi del sistema mette in ebollizione il fluido, producendo così vapore che si condensa su uno scambiatore (condensatore) all'interno del serbatoio. In questo modo si ha un trasferimento della potenza termica all'esterno del data center.

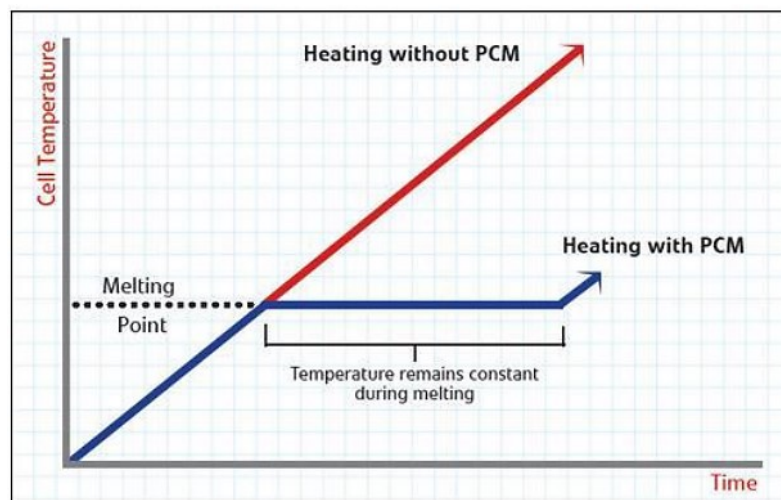


Figura 12 : Funzionamento dei PCM con una batteria

1.2.4 Raffreddamento con Heat Pipe

Gli Heat Pipe (HP), sono BTMS passivi che permettono di veicolare il calore quando non è possibile raffreddare localmente un componente. Questi dispositivi, come anche i PCM, lavorano in cambiamento di fase e, grazie ad una continua evaporazione e condensazione, permettono il trasporto e la dissipazione della potenza termica.

Un HP può essere suddiviso in tre zone: l'evaporatore, il tratto adiabatico e il condensatore (Figura 13). La prima zona è l'estremità a contatto con il componente da raffreddare, in questo caso la cella, che gli fornisce calore permettendo l'evaporazione del liquido all'interno del Heat Pipe. Il fluido, cambiando di fase, si espande aumentando la pressione e promuovendo così un moto attraverso la zona adiabatica. Sul lato opposto è presente, invece, il condensatore, solitamente collegato ad un componente di raffreddamento, che permette la dissipazione del calore e il passaggio da vapore a liquido. Successivamente il fluido ritorna verso la sezione di evaporazione, attraverso la struttura porosa (Wick) presente nel tubo, per effetto capillare.

Un notevole vantaggio, derivante dall'utilizzo delle Heat Pipe, è la bassa resistenza termica che, unita all'elevata capacità di trasferimento del calore, permette una buona gestione termica della batteria e della prevenzione del fenomeno del runaway termico. Di conseguenza, questa soluzione risulta un'efficiente alternativa per celle ad alta densità di potenza e per applicazioni su piccola scala che richiedono un'elevata precisione. Nonostante ciò, ad oggi, l'utilizzo di Heat Pipe per il raffreddamento di pacchi batterie è stato trattato solamente in letteratura [7].

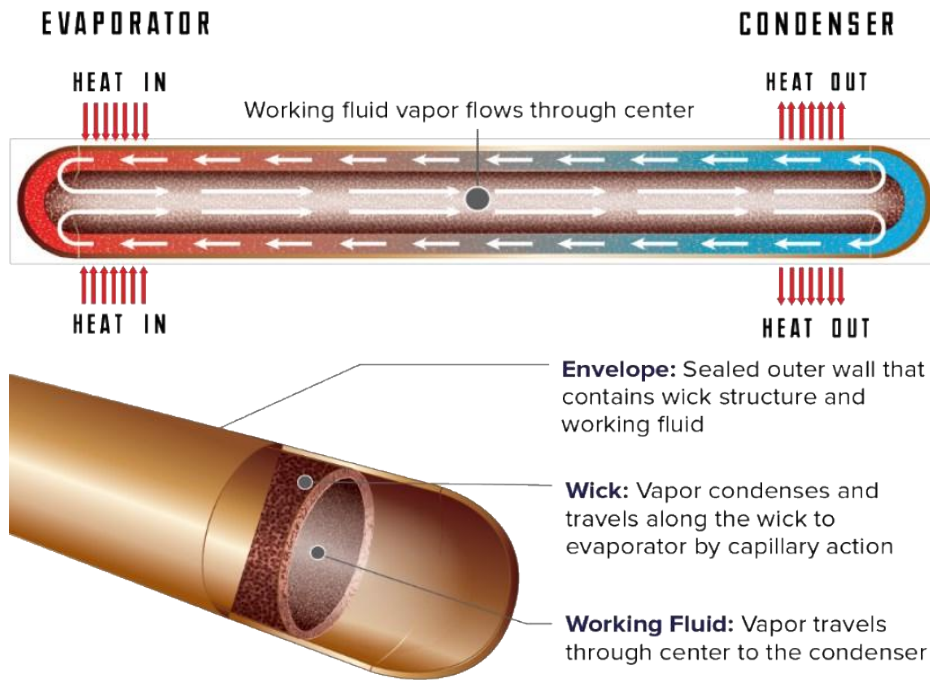


Figura 13 : Principio di funzionamento di un Heat Pipe

2 VALUTAZIONE TERMICA DI UN PACCO BATTERIE: ANALISI SPERIMENTALE

Il raffreddamento ad immersione diretta risulta, ad oggi, il sistema di gestione termica, per pacchi batterie, più promettente. Alla luce di ciò, si è scelto di valutare le differenze prestazionali del Novec 7000, cioè un liquido dielettrico basso bollente, rispetto al comune raffreddamento ad aria.

Vista la complessità dell'analisi si è scelto, dapprima, di testare due pacchi batterie equivalenti di dimensioni ridotte rispetto all'effettivo sistema di accumulo di una e-bike.

2.1 SET-UP SPERIMENTALE

Per l'allestimento del primo set-up sperimentale sono stati realizzati e testati, nelle stesse condizioni, due pacchi batterie identici. In tal modo, è stato possibile confrontare i risultati ottenuti nel caso di un sistema di raffreddamento ad immersione diretta, in un liquido dielettrico basso bollente, con il caso in cui è presente semplice aria all'interno del contenitore.

Durante le prove sono state acquisite le seguenti grandezze:

- Voltaggio delle singole celle
- Andamento della corrente
- Pressione del contenitore
- Temperatura superficiale delle batterie
- Temperatura del fluido di immersione
- Parametri ambientali (temperatura e umidità)

2.1.1 Sistema di gestione termica analizzato: Novec

In questo lavoro si è scelto di valutare le prestazioni nella gestione termica di un fluido basso-bollente ingegneristico. Tra i diversi presenti in commercio si è scelto il Novec 7000 che, oltre ad avere una temperatura di ebollizione (34 °C) compatibile con quella di utilizzo del pacco batterie agli ioni di litio, non è infiammabile ed è capace di operare in un range termico molto ampio (-120 °C – 165 °C). Fondamentale, nella scelta di questo liquido, sono state anche le sue ottime proprietà dielettriche (costante dielettrica di 7,4 e rigidità dielettrica 40 KV), che lo rendono un buon isolante elettrico, adatto dunque a rimanere in contatto con batterie, cavi e connettori che hanno una tensione di lavoro inferiore ai 4V (*Tabella 1*).

Altre caratteristiche principali, riportate nella scheda tecnica del prodotto, sono la non tossicità, la buona stabilità termica e la buona compatibilità con la maggior parte dei materiali metallici, plastici ed elastomerici [17]. Dal punto di vista visivo il liquido risulta trasparente e presenta un'elevatissima volatilità; infatti, ha un residuo non volatile inferiore alle 25 ppm.

Per maggiore chiarezza in appendice a pagina 79 sono riportati gli andamenti di densità, conducibilità termica e calore specifico in funzione della temperatura.

Ad oggi il Novec è molto utilizzato per svariate applicazioni in campo industriale e farmaceutico, per il raffreddamento dei supercomputer e di materiale elettronico militare e anche in campo medico.

È importante sottolineare che, nonostante la grande diffusione e le ottime prestazioni del Novec, i fluidi basso bollenti presentano delle problematiche principalmente legate alla bassa conduttività termica. Per ovviare a questo problema, i ricercatori stanno sperimentando l'aggiunta di vari tipi di materiali, come fogli di rame, oppure l'utilizzo di sistemi di raffreddamento ibridi che combinano i fluidi in cambiamento di fase con Heat Pipe o dissipatori di calore [18].

Proprietà	Unità	3M™ Novec 7000
Punto di ebollizione	°C	34
Punto di congelamento	°C	-122
Peso molecolare	g/mol	200
Temperatura critica	°C	165
Pressione critica	Mpa	2.48
Pressione di vapore	kPa	65
Calore latente di vaporizzazione	kJ/kg	142
Densità	Kg/m ³	1400
Coefficiente di espansione	K ⁻¹	0,0022
Calore specifico	J Kg ⁻¹ K ⁻¹	1300
Conducibilità termica	W m ⁻¹ K ⁻¹	0,075
Costante dielettrica	-	7,4

Tabella 1 : Proprietà fisiche del Novec 7000 a 25 °C

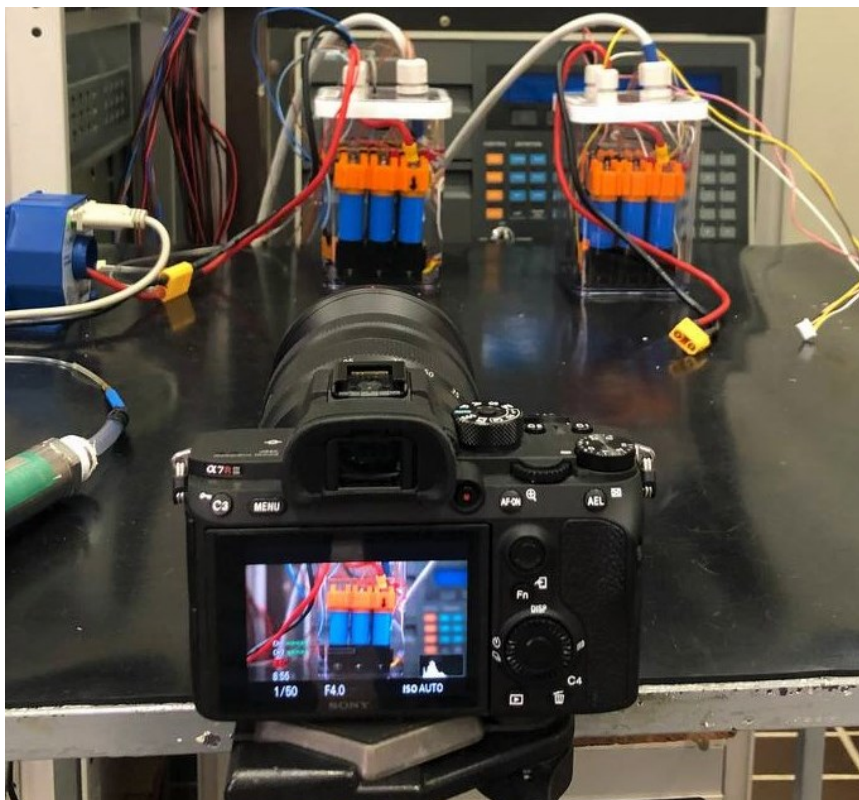


Figura 14 : Allestimento per le riprese delle prove

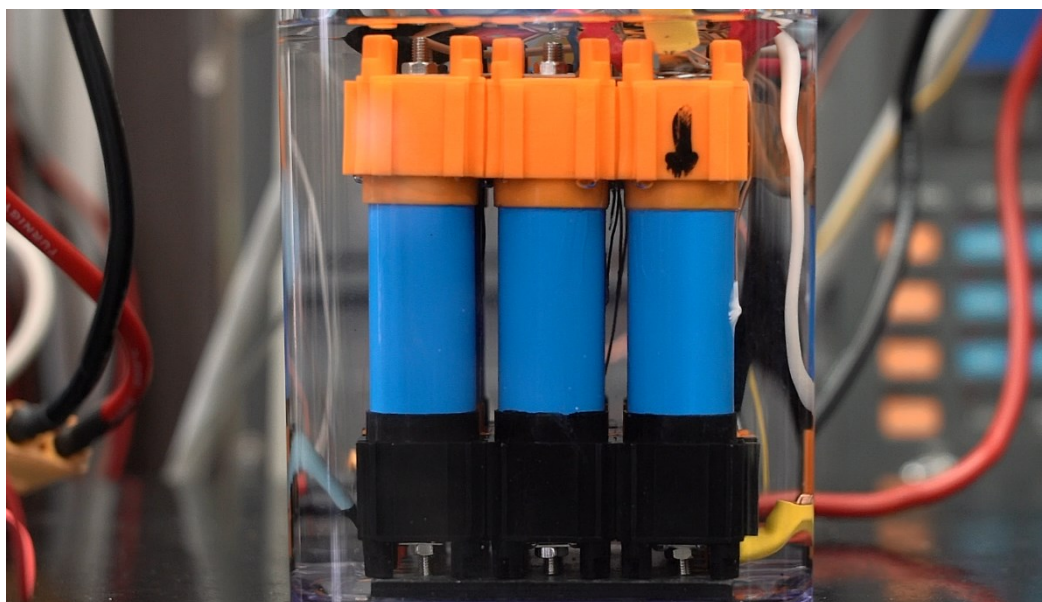


Figura 15 : Pacco batterie immerso nel Novec 7000

2.1.2 Allestimento del pacco batterie

Il sistema di accumulo, utilizzato per le prove, è stato realizzato con delle batterie cilindriche agli ioni di litio LiFePo4 (litio – ferro – fosfato) della ENERpower, modello HTCFR18650 (Figura 16). Si è scelto di utilizzare queste specifiche celle perché già state caratterizzate elettricamente e termicamente da un precedente lavoro di tesi, ciò permette un'analisi più completa e approfondita dei fenomeni studiati.

Le singole batterie utilizzate presentano una capacità di 1800 mAh e un voltaggio nominale di 3,2 V. Dalla scheda tecnica (*Tabella 2*), inoltre, si osserva che la massima corrente continua di scarica è di 5,4 A, per ogni elemento, che corrisponde a 3C. Il C-rate, infatti, dipende dalla corrente, rappresenta la potenza richiesta alla batteria e, di conseguenza, indica la velocità con cui una batteria viene scaricata. Se, ad esempio, si applica una corrente di 0,9 A si ha 05C e quindi la cella si scarica nel doppio del tempo rispetto al caso 1C, nel quale si ha 1,8 A.

$$C_{rate} = \frac{Capacità}{Corrente} \quad (3)$$

Un altro dato importante, fornito sempre dalla scheda tecnica, è il voltaggio di cut-off (2,5 V) a cui bisogna interrompere la scarica onde evitare un danneggiamento della batteria. Per quanto riguarda, invece, il range termico di funzionamento durante la scarica va da – 20 °C a 60 °C, mentre per la carica da 0 °C a 55 °C. È fondamentale che la batteria rispetti queste condizioni operative per evitare problematiche quali malfunzionamenti, deterioramento o esplosioni [19].



Figura 16 : Batteria LiFePo4 ENERpower 18650

No.	Parametri		Standard
1	Capacità standard		1800 mAh
2	Range della capacità		1700 – 1850 mAh
3	Vtaggio nominale		3,2 V
4	Condizione di carica	Vtaggio di cut-off	3,65 ± 0,05 V
		Corrente di cut-off	0,01 C
5	Corrente massima di carica		1,8 A
6	Vtaggio di cut-off in scarica		2,5 V
7	Corrente di scarica standard		0,9 A
8	Corrente di scarica veloce		1,8 A
9	Massima corrente di scarica		5,4 A
10	Temperature di lavoro	Carica	0 – 55 °C
		Scarica	20 – 60 °C
11	Temperatura di conservazione		-20 – 45 °C
12	Peso della batteria		42 g

Tabella 2 : Caratteristiche della batteria LiFePo4 18650 ENERpower

Il pacco batterie realizzato con questi elementi è del tipo 3P3S, cioè presenta 3 celle in parallelo e 3 celle in serie per un totale di 9 batterie (Figura 17). Il sistema finale ha, quindi, una capacità di 5,4 Ah, vale a dire che per scaricare l'intero pacco in 1C si dovrà applicare una corrente di 5,4 A. I collegamenti tra le batterie, funzionali per l'assemblamento del pacco, sono stati realizzati mediante l'utilizzo di appositi cappucci e barrette di nickel. Avendo più celle in serie è necessario l'utilizzo di un sistema di gestione delle batterie (BMS) che garantisca, soprattutto in fase di carica, un bilanciamento del sistema.

Per effettuare le prove sono stati realizzati due pacchi identici e sono stati disposti in due contenitori di plexiglas, in modo da permettere le condizioni di aria in convezione naturale e di immersione nel liquido basso bollente.

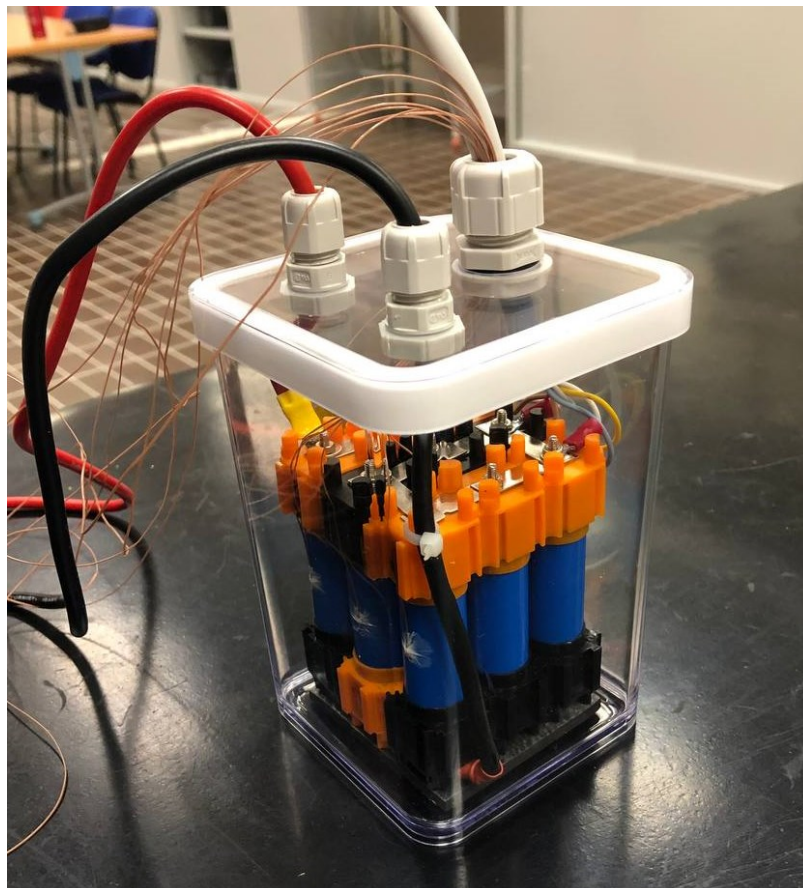


Figura 17 : Pacco batterie 3P3S

Per la valutazione degli andamenti dei voltaggi, delle celle in parallelo, sono stati installati dei cavi di segnale su ogni modulo. L'andamento della corrente, invece, è stato quantificato con un sensore closed-loop che sfrutta l'effetto Hall. Si è scelto poi di utilizzare una presa di pressione per il pacco contenente il Novec in modo da poter valutare eventuali fenomeni di sovrappressione durante l'ebollizione. Per quanto riguarda la misurazione della temperatura del fluido e della superficie delle batterie, sono state utilizzate delle termocoppie (TC) di tipo T in rame e costantana, che garantiscono misure affidabili fino a 500°C con un errore sulla misura di $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Noto che da un'analisi svolta, in un precedente lavoro di tesi, si era riscontrato un disturbo elettrico dovuto alla non perfetta dielettricità del Novec, le estremità delle termocoppie sono state rivestite con una resina isolante. Si è poi passati all'incollaggio delle stesse sulla superficie delle batterie con un adesivo bicomponente altamente conduttivo (Figura 20).

La disposizione delle termocoppie segue il seguente schema:

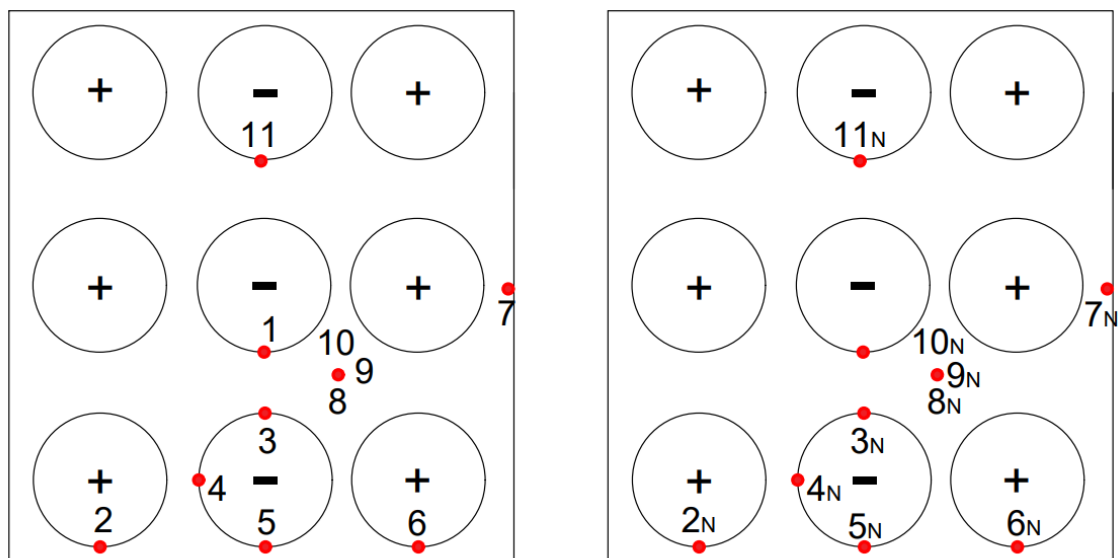


Figura 18 : Disposizione termocoppie sui due pacchi batterie

Nello specifico le termocoppie 8 – 9 – 10 sono disposte sulla stessa verticale (la 10 è la più bassa, la 8 è intermedia e la 9 è la più alta) e permettono di valutare il gradiente termico in altezza all'interno del pacco. La TC 7, invece, è posta sulla parete del contenitore e permette di valutare l'andamento termico del fluido esterno al pacco. Si è scelto, poi, di installare 3 termocoppie (3 – 4 – 5) lungo la semicirconferenza di una singola batteria in modo da osservare possibili disuniformità termiche lungo la superficie della stessa. I rimanenti sensori di temperatura sono stati disposti in modo da avere almeno una TC per ogni serie (2 – 5 – 6) e una per ogni parallelo (5 – 1 – 11), così da poter effettuare un'analisi completa del pacco batterie.

Una volta terminata questa prima fase, sono stati effettuati i collegamenti al punto di zero che mantiene, con una certa precisione, a 0 °C il giunto freddo delle termocoppie. Questo macchinario sfrutta un sistema refrigerante basato sull'effetto Peltier, con potenza di 20 W, a contatto con un contenitore d'acqua deionizzata in condizioni bifasiche, predisposta all'alloggiamento dei giunti freddi. Il sistema ha una precisione dell'ordine di 0,1 °C e consente di avere tutte le termocoppie riferite alla stessa temperatura.

2.1.3 Taratura delle termocoppie

Una volta svolte queste prime operazioni si è passato alla taratura, che è stata svolta immergendo le batterie in un bagno termostatico contenente acqua distillata (Figura 21). Il fluido è stato poi portato a tre diverse temperature (10°C, 20°C e 40°C) in modo da acquisire i valori medi e le deviazioni standard delle termocoppie. Per misurare la temperatura del bagno è stata immersa una termoresistenza (RTD), collegata ad un sistema di acquisizione della Agilent, il cui errore di misurazione è di un ordine di grandezza inferiore ($\pm 0,05^\circ\text{C}$ contro $\pm 0,5^\circ\text{C}$) rispetto alle TC stesse.

Una volta acquisiti i segnali di tensione ai diversi livelli di temperatura, è stata realizzata, mediante un apposito file Excel, una retta di calibrazione per ogni termocoppia di ognuno dei due pacchi. Queste sono state poi utilizzate per le prove sperimentali al fine di ridurre l'errore di misura .

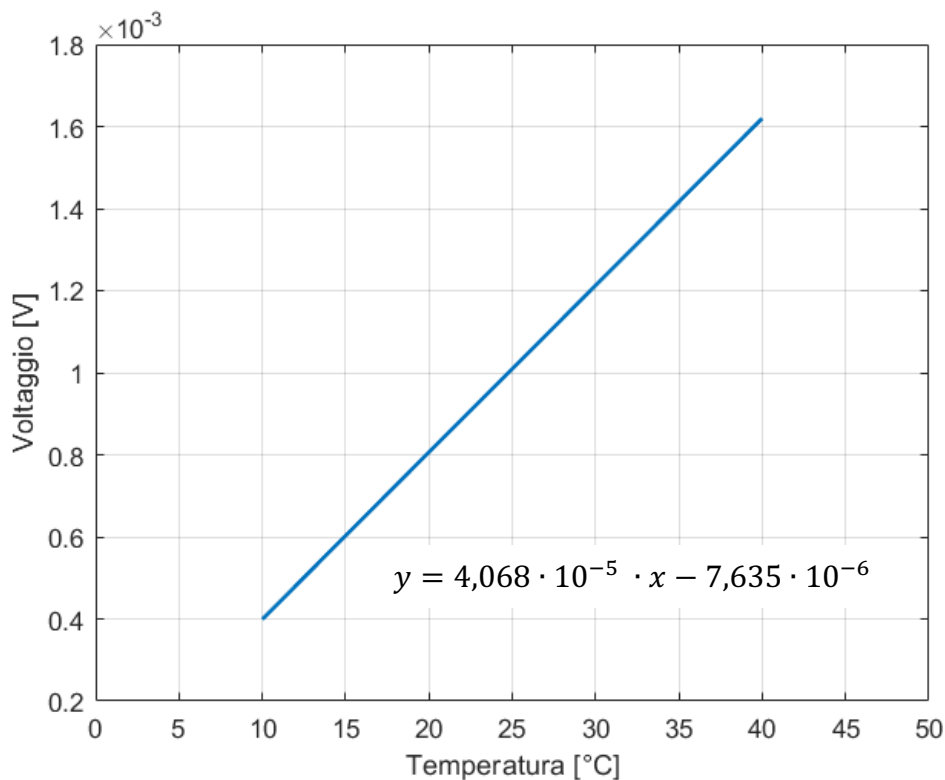


Figura 19 : Retta di calibrazione per la Termocoppia 1

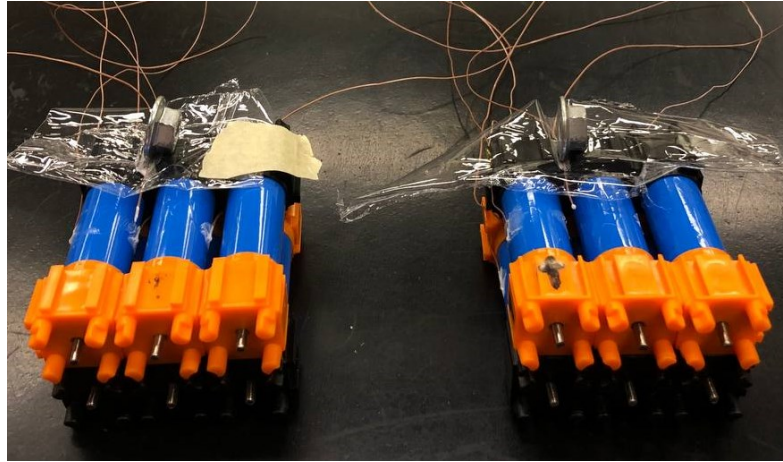


Figura 20 : Incollaggio termocoppie



Figura 21 : Immersione delle batterie nel bagno termostatico

2.1.4 Sistema di gestione delle batterie per la carica e la scarica

Per quanto riguarda la strumentazione per la gestione delle batterie si utilizzano un carico elettronico per la scarica e un caricatore per la ricarica. Il primo è prodotto dalla National Instruments, serie RMX, e presenta diverse configurazioni di utilizzo:

1. Corrente costante (CC)
2. Voltaggio costante (CV)
3. Resistenza costante (CR)
4. Potenza costante (CP)
5. Sequenze (utilizza una serie di sequenze predeterminate dall'utente per simulare un carico ben definito)

Per le prove è stato utilizzato il modello 4005, della serie RMX, che presenta un range di potenza di 33 – 350 W. L'acquisizione è stata effettuata direttamente con la scheda NI 6289 che presenta una risoluzione di 0,076 mV.

Avendo un pacco batterie 3P3S, in cui ogni batteria ha una capacità di 1,8 Ah, le scariche in corrente continua (CC) sono state effettuate a 5,4 A nel caso 1C, 10,8A (2C) e 16,2 A (3C).

Per quanto riguarda la carica, inizialmente è stato utilizzato un caricatore della serie RMX, modello 4125, che può lavorare in corrente costante (0 – 58,8 A) e voltaggio costante (0 – 84 V) a seconda di come vengono settati il voltaggio e la corrente di output.

Tuttavia, a seguito delle prime prove, è stato riscontrato un non corretto bilanciamento tra i moduli in serie del pacco batterie che ha determinato un'usura eccessiva di alcune celle e ha ridotto notevolmente la durata della scarica. Si è resa, quindi, necessaria l'adozione di un caricatore alternativo della Turnigy che prevede un BMS integrato. Quest'ultimo, come già detto nel paragrafo 1.1, ha lo

scopo di monitorare e bilanciare la carica delle singole celle del pacco, in modo da migliorare le prestazioni e prolungare il ciclo di vita delle batterie.

La carica del pacco è stata effettuata in due fasi (Figura 22): una prima fase in corrente costante a 2,7 A, in modo da rispettare il C-rate di 0,5 raccomandato dal costruttore delle celle, fino al raggiungimento di 3,65 V; e successivamente una seconda fase a voltaggio costante fino al raggiungimento della corrente di cut-off di 0,018 A.

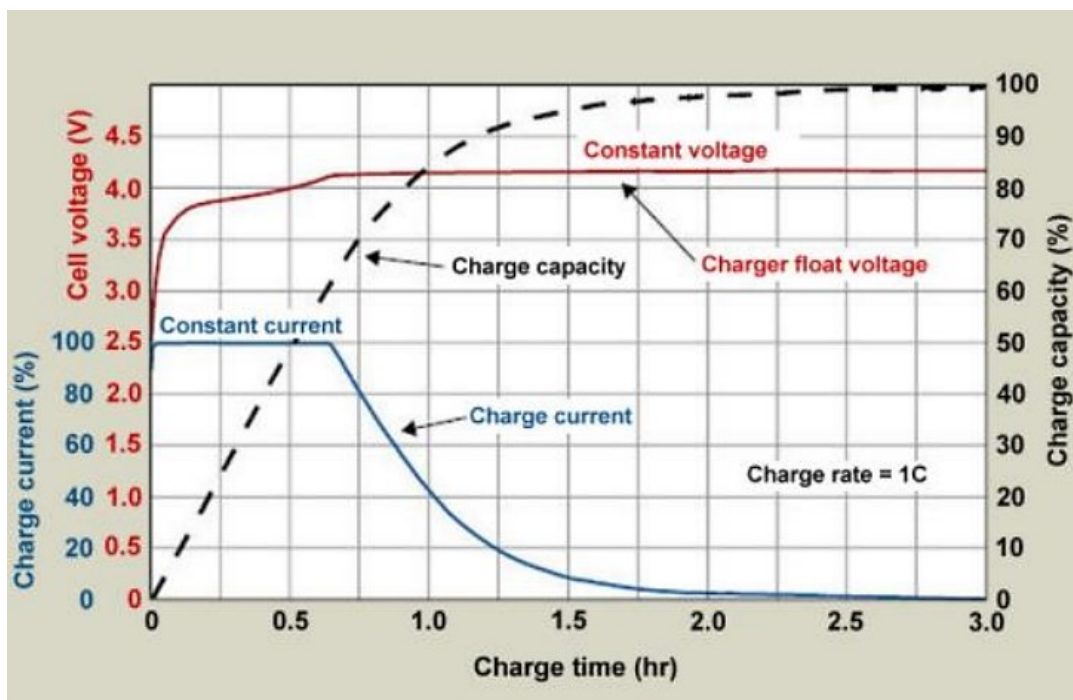


Figura 22 : Andamento della carica nelle batterie

2.1.5 Sistema di acquisizione

Una volta affrontata la taratura delle termocoppie si è passati al sistema di acquisizione dei vari segnali di interesse.

Oltre ai segnali di voltaggio dei singoli moduli dei due pacchi e alle temperature si è deciso di valutare anche l'oscillazione della corrente, della pressione e i parametri ambientali. Per la prima si è utilizzato il sensore IT 65-S, in grado di misurare correnti fino a 60 A con un'incertezza di $\pm 0,02$ A, il cui funzionamento è basato sull'effetto Hall. Si è quindi fatto passare il cavo, collegato al polo positivo totale del pacco batterie, al centro del sensore; il quale mediante la variazione del campo magnetico è in grado di determinare il flusso di corrente che lo attraversa. L'informazione ottenuta dalla misurazione viene convertita, tramite un trasduttore, in un segnale in voltaggio per permettere l'acquisizione da parte della scheda della National Instruments. Successivamente, tramite il programma realizzato su Labview, si riconverte il segnale in Ampere utilizzando un'opportuna retta di calibrazione.

Per le misurazioni di pressione, invece, è stato utilizzato un sensore di pressione differenziale GEMS, serie 5266, che presenta un range di misura di ± 500 [Pa] ed un errore corrispondente allo 0,5 % del fondo scala. Il sensore è alimentato a 24V, e fornisce un'uscita in voltaggio variabile tra 0 e 10 V. Anche in questo caso è stata utilizzata una retta di calibrazione in modo da garantire una conversione del segnale in voltaggio in uno di pressione.

Per completezza in appendice a pagina 78 sono riportati gli andamenti delle rette di calibrazione del sensore di corrente e di pressione.

Infine, si è deciso di misurare i parametri ambientali, cioè temperatura ambiente e umidità, tramite il sensore HX93BD. In questo modo sono state valutate le condizioni di partenza, in cui le batterie sono in equilibrio con l'ambiente. La strumentazione utilizzata in questo caso permette la valutazione della temperatura con un'incertezza di $\pm 0,6$ °C, se si rimane in un range tra 0 e 50 °C, e dell'umidità relativa a con un'incertezza di $\pm 2,5\%$. Anche in questo caso il segnale in uscita è in Volt (0 – 10 V).

È fondamentale, infatti, che i segnali in uscita dai vari sensori siano in Volt in modo da poter essere acquisiti tramite delle schede della National Instruments. In particolare, il DAQ che viene utilizzato per i parametri ambientali e per i voltaggi delle batterie è il NI 6289, che è in grado di acquisire segnali tra 0 e 10 V con un'incertezza di $\pm 0,25$ mV e una risoluzione di 0,076 mV. È presente poi il NI SCXI-1303 che viene utilizzato per i segnali delle termocoppie. Entrambe le schede sono posizionate all'interno del pc NI PXI-1050.

Per effettuare le prove e per monitorare l'andamento dei vari parametri sono stati utilizzati dei programmi, appositamente realizzati sul software Labview. Tali programmi, ad esempio, permettono di impostare la corrente di scarica e carica, il voltaggio di input e output, il voltaggio minimo della batteria che porta all'interruzione della scarica (2,5 V) e tante altre variabili (*Figura 25*). Al termine della prova il programma trascrive i dati, acquisiti ad 10 Hz, in un file di testo. Successivamente è stata effettuata la media ogni 10 acquisizioni in modo da ridurre il numero di dati ad 1 al secondo.

Tutte le prove effettuate con il Novec 7000 sono state riprese, tramite una fotocamera ad alta definizione, in modo da poter osservare il comportamento del fluido e l'evolversi dell'ebollizione ai diversi C-rate (*Figura 14*).

2.1.6 Determinazione dell'incertezza

Un aspetto fondamentale, quando si effettuano misurazioni sperimentali, è la determinazione dell'incertezza dei dati acquisiti. Questo ci permette, infatti, di valutare l'affidabilità dei valori ottenuti e il range di errore. Pertanto, ogni dato sperimentale, come anche ogni sensore, è accompagnato da una banda di incertezza valutata secondo la procedura indicata nella norma UNI CEI ENV 13005 "Guida all'espressione dell'incertezza di misura" [20]. In tale norma viene stabilito che l'incertezza deve essere valutata componendo opportunamente i seguenti due termini:

- Incertezza di categoria A
- Incertezza di categoria B

La prima, definita anche randomica perché legata ad errori casuali, è determinabile attraverso l'analisi statistica dei risultati. Il risultato di misura sarà, quindi, costituito dalla media sperimentale di un numero N di campioni. Nel caso in esame, ad esempio, è stata fatta la media ogni dieci campioni, in modo da avere un dato ogni secondo invece che ogni decimo di secondo. Noto che le singole osservazioni q_k differiscono tra loro, a causa di variazioni casuali delle grandezze d'influenza, è necessario, per il calcolo dell'incertezza di categoria A, l'utilizzo dello scarto quadratico medio (o deviazione standard). Questo fornisce una stima della variabilità dei dati ottenuti ed è pari alla radice quadrata della varianza ($s^2(q_k)$ o σ^2) che è data da:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (4)$$

Ne segue che l'incertezza di categoria A si ottiene dal rapporto tra la deviazione standard (σ), moltiplicata per il valore dell'incertezza estesa (k), e la radice quadrata del numero di campioni.

$$U_A = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

L'incertezza estesa permette di aumentare il livello di confidenza (o livello di fiducia), cioè il grado di affidabilità che il valore ottenuto si trovi nell'intervallo determinato dall'incertezza. Nello specifico per questo lavoro è stato utilizzato un valore di k pari a due che corrisponde ad un livello di confidenza del 95 %.

Il termine U_A è valutato solo a posteriori, e cioè solo dopo l'acquisizione dei dati sperimentali.

L'incertezza di categoria B, invece, è solitamente fornita dal costruttore del sensore ed è valutabile tramite informazioni disponibili a priori come:

- Dati di misurazione precedenti;
- Conoscenza generale del comportamento e delle proprietà dei materiali;
- Specifiche tecniche del costruttore;
- Dati forniti in certificati di taratura;
- Incertezze assegnate a valori di riferimento presi da manuali;
- Strumenti di interesse.

Va sottolineato che le informazioni a disposizione per la valutazione dell'incertezza di categoria B richiedono una capacità di interpretazione basata sull'esperienza, ed una competenza che si acquisisce solamente con la pratica. Nonostante ciò,

tale incertezza è molto utile perché, non dipendendo da eventi casuali, può essere ridotta tramite un'opportuna taratura. Nei test svolti, ad esempio, l'incertezza di categoria B delle termocoppie è stata abbassata, da $\pm 0,5$ °C a $\pm 0,05$ °C, attraverso la taratura.

Inoltre, a differenza della categoria A, non richiede un elevato numero di campioni e può essere valutata a priori.

La norma prescrive di combinare le incertezze delle varie categorie con una relazione del tipo:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (6)$$

In tal modo si ottiene un'incertezza globale U della misurazione.

Nel caso in cui si valuta una grandezza composta, cioè data dall'unione di più grandezze, ognuna delle quali presenta una propria incertezza, è necessario calcolare l'incertezza composta, considerando l'intera catena di misura.

Le misure sperimentali eseguite nel corso della tesi sono state corredate di banda di incertezza valutata come appena descritto. In particolare, la componente U_A è stata calcolata con i valori di deviazione standard ottenuti partendo dai dati acquisiti. La componente U_B è stata calcolata, invece, attraverso le specifiche fornite dalle case produttrici degli strumenti, come percentuale del fondo scala. Inoltre, va sottolineato che l'incertezza delle singole grandezze, che andranno successivamente a formare l'incertezza composta U, sono state considerate con un intervallo di confidenza del 95%.

Nota l'equazione (5) per il calcolo dell'incertezza di categoria A e l'equazione (6) per l'incertezza totale, si riportano in Tabella 3 le incertezze per i diversi sensori utilizzati. Si noti che U_A è stata calcolata su un numero di campioni N pari a 10 e con un'incertezza estesa k pari a 2. Inoltre, l'incertezza di categoria B della corrente è data dalla somma dell'incertezza del sensore ($\pm 0,02$ A) e del carico elettronico ($\pm 0,05$ A nel caso di una corrente maggiore di 7 A). Quest'ultimo, infatti, presenta un certo errore nell'impostare il corretto valore della corrente.

	Deviazione standard	U_A	U_B	U_{tot}	Fondo scala
<i>Corrente [A]</i>	0,017	$\pm 0,011$	$\pm 0,054$	$\pm 0,055$	60 A
<i>Termocoppie [°C]</i>	0,048	$\pm 0,3$	$\pm 0,058$	$\pm 0,065$	500 °C
<i>Voltaggio [mV]</i>	0,052	$\pm 0,327$	$\pm 0,25$	$\pm 0,411$	10 V
<i>Pressione [Pa]</i>	0,472	$\pm 0,298$	$\pm 2,5$	$\pm 2,517$	500 Pa

Tabella 3 : Calcolo incertezze dei sensori

2.1.7 Allestimento per prove termografiche

Per valutare la distribuzione superficiale della temperatura, del contenitore del pacco batterie, si è ricorsi all'utilizzo della termografia a infrarossi. Questa, infatti permette una scansione rapida delle aree di misurazione senza la necessità di un contatto diretto.

La termocamera utilizzata è una FLIR SC-3000 con un focal plane array da 320x240, sensori fotonici, lente con un campo visivo di 20° x 15° e una minima distanza focale di 0,3 m. La sensibilità termica, invece, è di 20 mK a 30 °C con un'incertezza di misura di $\pm 1\%$ sulla temperatura misurata [21].

La termocamera viene utilizzata con un apposito software che permette sia l'acquisizione che la rielaborazione dei dati al termine delle prove. Di fondamentale importanza è la messa a fuoco, che deve fornire una nitidezza di immagine sufficiente a permettere un'analisi veritiera. Inoltre, è necessario inserire i dati relativi all'emissività del materiale (per il plexiglas 0,86), alle condizioni ambientali (temperatura ambiente e umidità) e alla distanza superficie-termocamera (0,5 m).



Figura 23 : Allestimento prove termografiche

Si riporta, infine, l'allestimento finale del banco prova, utilizzato per le sperimentazioni ed una schermata del programma Labview.

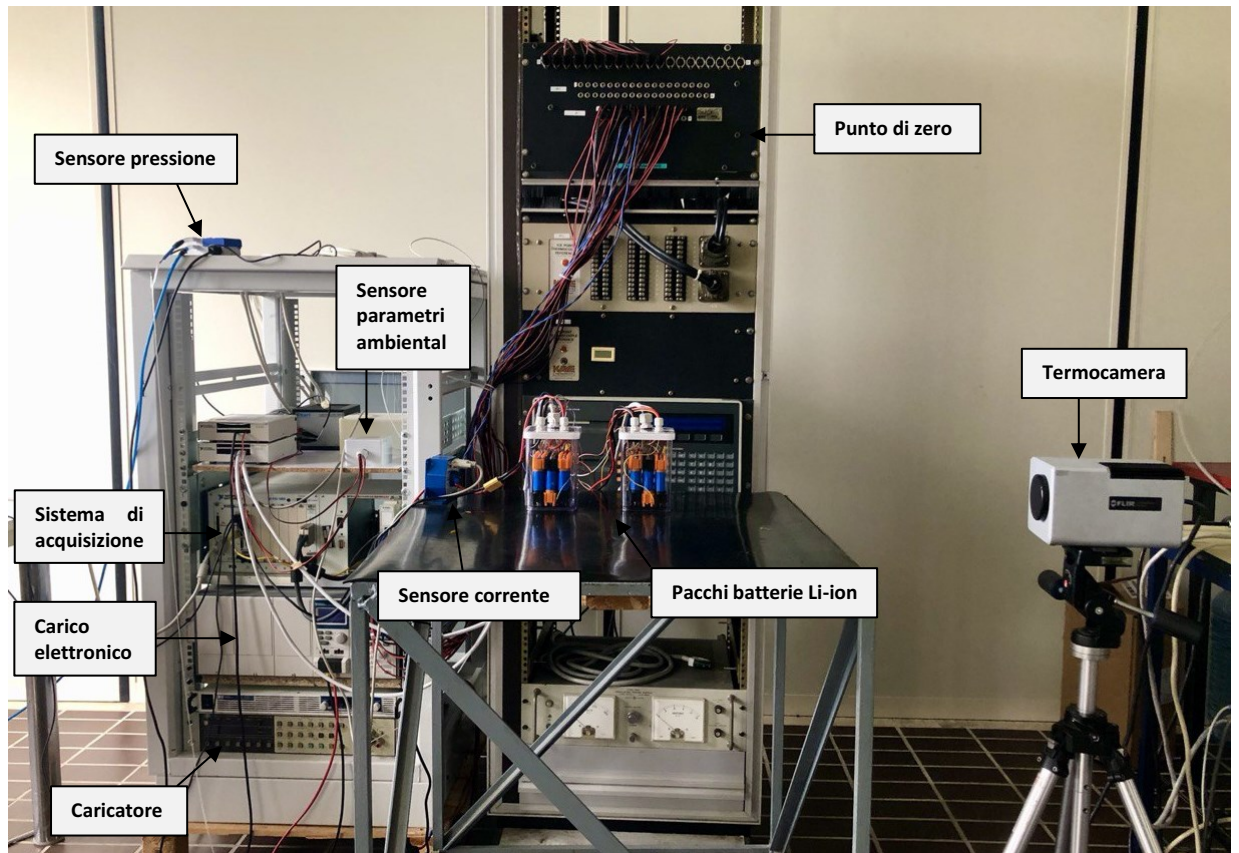


Figura 24 : Setup di misura

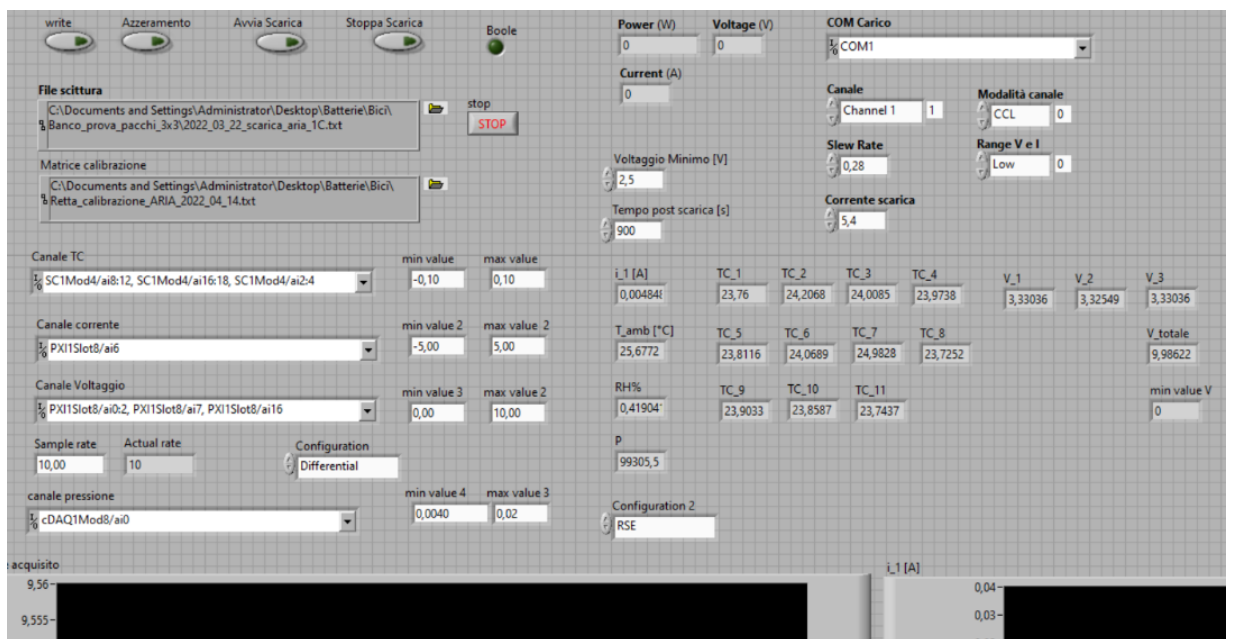


Figura 25 : Esempio di un programma per la scarica in Labview

3 RISULTATI SPERIMENTALI

L'obiettivo delle analisi sperimentali svolte è quello di valutare le differenze prestazionali tra raffreddamento con aria in convezione naturale e con liquido basso-bollente. Le prove sono state svolte su due pacchi batterie 3P3S identici e nelle stesse condizioni in modo da ottenere risultati confrontabili.

Per valutare la temperatura dei pacchi batterie e del fluido in analisi sono state installate 11 termocoppie (TC) per ogni pacco, secondo lo schema di Figura 18. Questa figura riporta anche la posizione del positivo totale (+), in corrispondenza della batteria con la termocoppia 2, dove si ha un voltaggio nominale di 9,9 V e il negativo totale (-), sulla cella che presenta la TC 6.

Per quanto riguarda, invece, l'acquisizione dei segnali di voltaggio sono stati posizionati tre sensori sulle batterie frontali, riportanti le termocoppie 2, 5 e 6. In questo modo è stato possibile raccogliere i dati di voltaggio di ogni parallelo.

La corrente è stata acquisita attraverso il sensore di corrente IT 65-S, ad effetto Hall, posto sul cavo del positivo totale uscente dal contenitore; mentre per la pressione è stata realizzata un'apposita presa di pressione sul coperchio.

Le prove sono state eseguite a scarica costante, monitorando ogni pacco batterie con 11 termocoppie, un acquisitore di corrente, un acquisitore di voltaggio e una presa di pressione.

I test a scarica costante sono stati svolti con tre correnti differenti e, quindi, a tre C-rate differenti:

Corrente di scarica	C-rate	Tempo di scarica
5,4 A	1	60 minuti
10,8 A	2	30 minuti
16,2 A	3	20 minuti

Tabella 4 : C-rate di scarica

Come già riportato nel paragrafo 2.1.5, per la gestione della scarica è stato utilizzato un programma appositamente realizzato in Labview (*Figura 25*). In questo modo è stato possibile imporre l'interruzione automatica della scarica, quando una delle celle raggiungeva il voltaggio minimo dato dal costruttore (2,5V).

Il programma in Labview permette anche il salvataggio, su di un file di testo, di tutte le grandezze acquisite. I file ottenuti dalle prove, sono stati poi importati sotto forma di matrice e rielaborati con Matlab. Nello specifico è stata fatta la media ogni 10 dati, in modo da ridurre le dimensioni della matrice ed avere un dato al secondo. Inoltre, i dati di temperatura sono stati rielaborati in modo da ottenere, per ogni termocoppia, la differenza di temperatura tra quella acquisita e quella iniziale; in modo da potersi svincolare dalla temperatura ambiente.

La temperatura di partenza delle batterie, come quella dell'ambiente esterno, è stata impostata mediante l'utilizzo di sistemi di condizionamento dell'aria, in modo da avere una condizione iniziale che differisce al massimo di 2 °C nelle diverse prove.

3.1.1 Misura del potenziale del pacco batterie

Dapprima si va ad analizzare l'andamento del voltaggio totale, dei pacchi batterie, ai diversi C-rate di scarica. Infatti, come noto anche dalla letteratura, il potenziale fornisce delle importanti informazioni e giustifica alcuni fenomeni termici riscontrati.

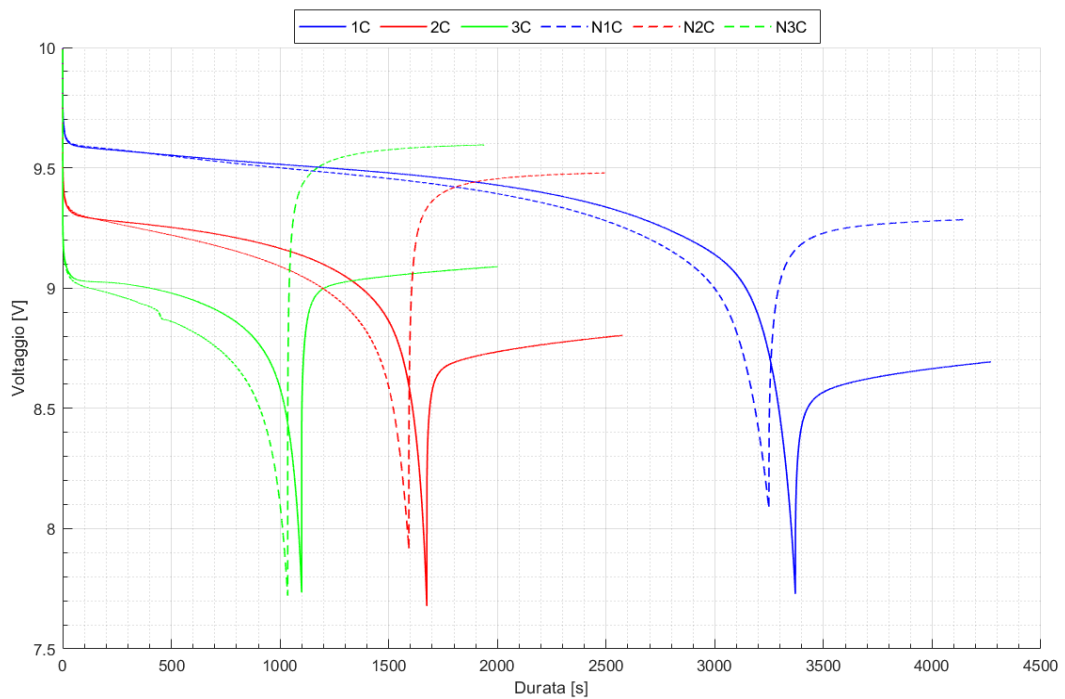


Figura 26 : Voltaggio totale dei pacchi batterie 3P3S ai diversi C-rate

Nello specifico, dal confronto degli andamenti del voltaggio totale con e senza Novec 7000, si riscontra una differenza nella caduta di voltaggio. Nei casi con il liquido basso bollente (linee tratteggiate), infatti, si raggiunge la fine scarica circa un minuto prima e ad un voltaggio che va aumentando con l'aumentare del C-rate. Essendo riportato il voltaggio totale, il punto di minimo di ogni curva, e cioè il punto in cui viene arrestata la scarica, dipende dall'andamento del voltaggio dei singoli moduli del pacco. Infatti, come si può vedere nella Figura 26, la cella centrale (V_2) tende a raggiungere prima il valore minimo di 2,5 V determinando l'interruzione della prova.

Una volta terminata la scarica si ha una fase di rilassamento delle batterie, durante la quale il voltaggio aumenta nuovamente. Nello specifico si può osservare che nel caso Novec la tensione a circuito aperto (OCV, Open Circuit Voltage) sale notevolmente di più. Questo è indice di una maggiore carica residua all'interno di questo pacco, dovuta all'interruzione anticipata della scarica. Pertanto, la carica delle batterie del pacco immerso nel Novec risulta meno utilizzata durante le prove.

In un precedente lavoro, svolto su di un'unica batteria, si era riscontrato un miglioramento di questo fenomeno riducendo la quantità di Novec. Era stata, quindi, ipotizzata una possibile dispersione di correnti parassite all'interno del Novec 7000 che, pur avendo un buon coefficiente dielettrico, non risulta completamente isolante. A sostegno di ciò, era stato evidenziato come la quantità di fluido eccessiva, rispetto alle dimensioni della singola cella, potesse favorire tali fenomeni elettrici.

Per verificare quanto precedentemente affermato è stato deciso, per i test sul pacco batterie, di immergere completamente il sistema ma di utilizzare un volume di Novec per batteria notevolmente inferiore ($50,8 \text{ cm}^3$ invece di $218,8 \text{ cm}^3$). Confrontando i risultati ottenuti dalle prove effettuate sull'intero pacco batterie con quelle sulla singola cella, si riscontra un aumento del tempo di scarica con l'utilizzo di meno fluido. Nello specifico, la durata della scarica in 3C di una singola cella, immersa in un'elevata quantità di Novec, è di circa 950 secondi, mentre nel caso dell'intero pacco 3P3S, immerso in una quantità ridotta dello stesso fluido, si ha una durata di 1035 secondi.

	Ingombro totale celle	Volume Novec totale	Volume Novec per ogni cella
Singola cella	$43,7 \text{ cm}^3$	$218,8 \text{ cm}^3$	$218,8 \text{ cm}^3$
Pacco 3P3S	$393,2 \text{ cm}^3$	$457,3 \text{ cm}^3$	$50,8 \text{ cm}^3$

Tabella 5 : Volume di Novec utilizzato

3.1.2 Misura delle temperatura superficiale delle celle

Si passa ora all'analisi degli andamenti delle temperature nelle diverse prove. Come già detto, sono state svolte diverse prove a C-rate differenti in modo da raggiungere livelli termici via via più elevati.

Tra le 11 termocoppie installate su ogni pacco batterie, di cui 7 sulle batterie e 4 nel fluido, la più sollecitata termicamente risulta la 1, che si posiziona sulla cella centrale. Questa, infatti, subisce importanti fenomeni di irraggiamento da parte delle batterie circostanti.

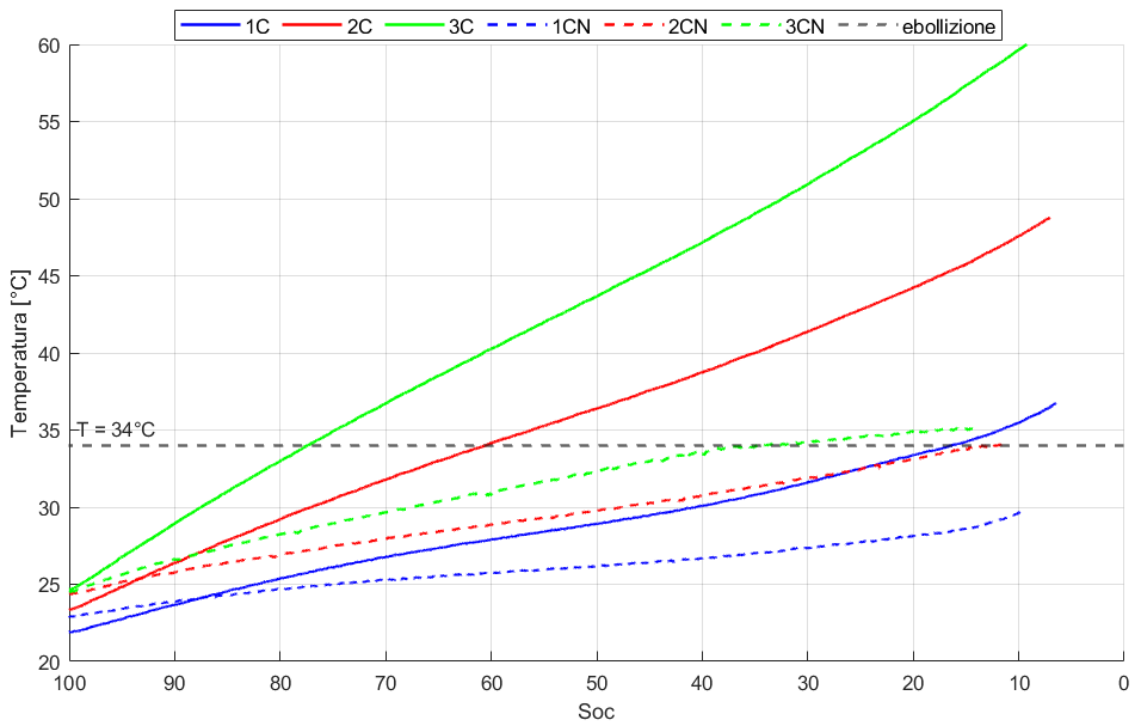


Figura 27 : Andamento TC1 ai diversi C-rate

Come si può osservare dal grafico sopra (Figura 27), nel pacco ad aria si riscontrano notevoli aumenti della temperatura, misurata dalla TC1, al variare degli C-rate. Tali incrementi non sono, però, riscontrabili nel pacco immerso nel Novec, dove il fluido basso bollente assorbe calore riducendo i picchi di temperatura. In particolare, quando si raggiunge un livello termico di circa 34 °C il Novec inizia ad andare in ebollizione determinando un elevato assorbimento di calore latente.

Durante il cambiamento di fase, la temperatura all'interno del pacco resta per lo più costante, riducendo così di molto i fenomeni termici.

Un'altra osservazione necessaria riguarda l'andamento delle curve ai diversi C-rate. Nel caso ad aria (linee continue), infatti, pur avendo stesso andamento le curve si distaccano notevolmente l'una dall'altra all'aumentare della corrente di scarica. Nell'altro caso (linee tratteggiate), invece, si riscontrano andamenti differenti ai diversi C-rate ma più vicini tra loro. In particolare, le linee blu e rosse, riferite alla scarica in 1C e in 2C, sono simili nei due pacchi seppur con differenti pendenze. Al C-rate di scarica massimo, invece, si ha un cambio di pendenza nel caso Novec dovuto al passaggio di stato del fluido basso bollente, che contiene notevolmente l'aumento di temperatura.

Si riporta di seguito un'immagine (Figura 28), acquisita durante la prova in 3C, dell'ebollizione del fluido.

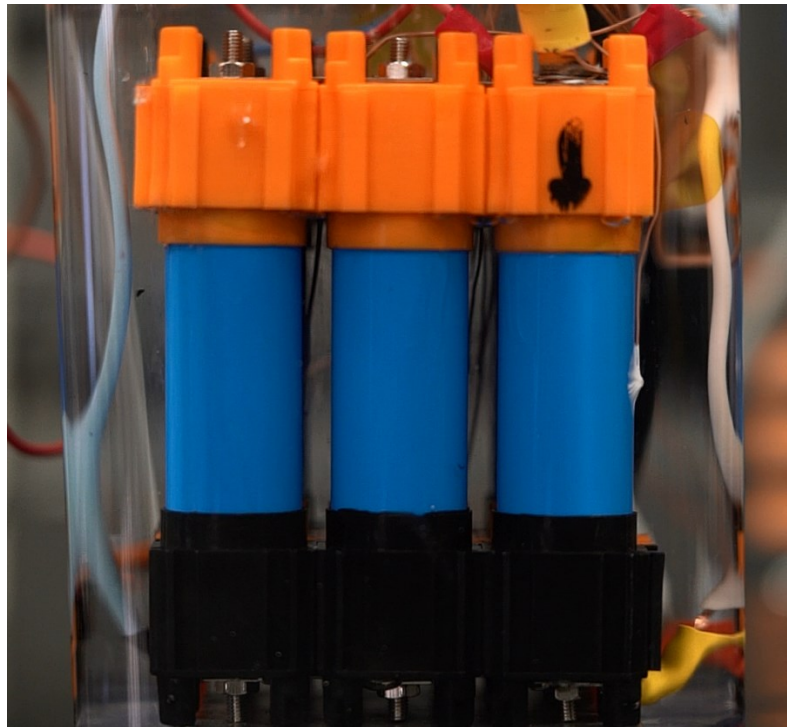


Figura 28 : Ebollizione del Novec

Per permettere la valutazione di una possibile disuniformità termica, lungo la circonferenza di una batteria, sono state installati tre TC (3 – 4 - 5) alla stessa altezza ma su lati diversi. Tuttavia, dall'analisi non è stata possibile riscontrare una differenza termica tale da far pensare ad un riscaldamento disomogeneo della cella stessa. Per completezza, gli andamenti delle tre termocoppie, durante una scarica in 3C, vengono riportate in appendice a pagina 83.

Per effettuare un'analisi completa del pacco è stata installata una termocoppia per ogni modulo in serie, sulle stesse batterie dove viene effettuata la misura di voltaggio, e una termocoppia su ogni batteria della cella centrale. Tuttavia, a seguito delle prove effettuate, sono state riscontrate delle condizioni assimilabili tra le diverse termocoppie; questo ha permesso la selezione di un numero ridotto delle stesse, al fine di rendere l'analisi più chiara e concisa. Pertanto, si riportano di seguito i grafici delle sole termocoppie 1 – 5 – 6 in 3C, mentre gli andamenti completi di tutte le TC sono consultabili in appendice a pagina 83.

Le curve vengono riportate in funzione della differenza di temperatura, la quale è stata ottenuta sottraendo, punto per punto, la temperatura iniziale delle termocoppie al fine di svincolare le misurazioni dalle condizioni iniziali.

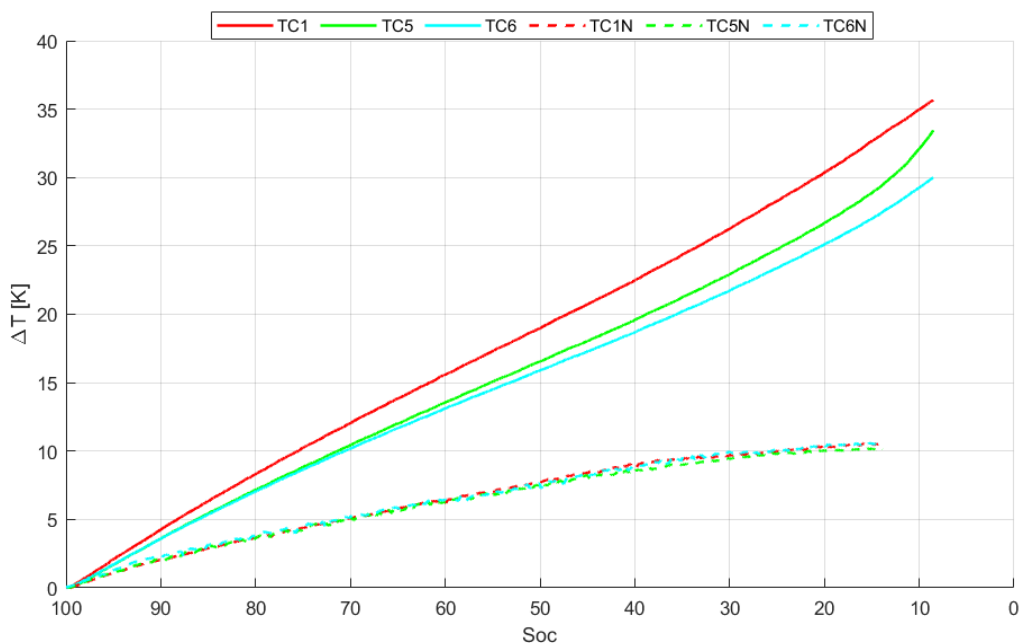


Figura 29 : Andamento TC1, TC5 e TC6 con e senza Novec (3C)

Come si osserva chiaramente dalla Figura 29 le termocoppie nel caso in aria (linee continue) raggiungono temperature molto più elevate rispetto al caso Novec (linee tratteggiate) dove l'andamento ha una crescita che diminuisce nelle ultime fasi della scarica. Come già detto, questo fenomeno è strettamente connesso all'assorbimento di calore dovuto al cambiamento di fase. Inoltre, la temperatura sul pacco Novec risulta molto più uniforme; infatti, le curve risultano quasi sovrapposte a differenza dell'altro caso.

Si può inoltre notare che nell'ultima fase della scarica la TC5 (linea verde) nel caso aria subisce un brusco aumento di temperatura. Questo fenomeno è dovuto all'andamento del voltaggio della cella corrispondente, cioè la centrale (linea blu). Infatti, come è evidente dal grafico seguente, il voltaggio della cella su cui è montata la TC5 raggiunge prima il limite inferiore di 2,5V.

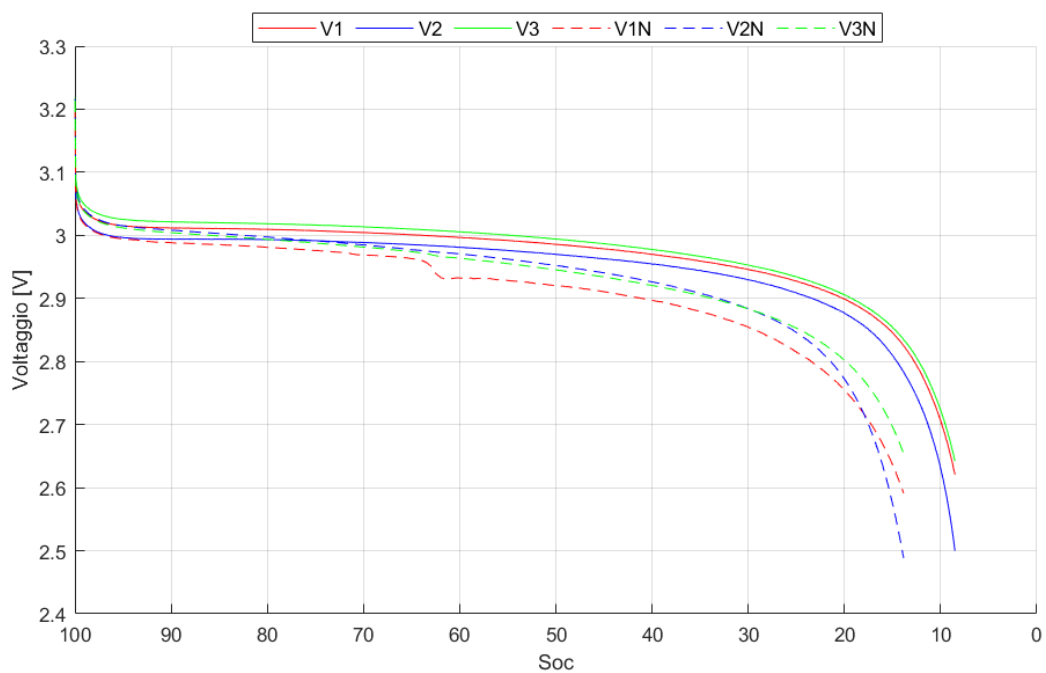


Figura 30 : Andamento del voltaggio delle singole celle in 3C

Andando a confrontare i valori di differenza di temperatura ottenuti a fine scarica, dalla termocoppia 1, si osserva una notevole riduzione del salto termico dall'utilizzo del liquido basso bollente. Tale riduzione va incrementandosi con l'aumentare del C-rate di scarica (Tabella 6).

ΔT a fine scarica	Aria	Novec	Differenza percentuale
1C	14,86 K	9,88 K	-33,5 %
2C	25,31 K	9,7 K	-61,7 %
3C	35,76 K	10,47 K	-70,7 %

Tabella 6 : Confronto della differenza di temperatura a fine scarica della TC1

Un altro confronto, necessario per evidenziare ulteriori vantaggi ottenuti dall'utilizzo del Novec, è quello dell'andamento della termocoppia 7, posta sulla parete del contenitore, con la termocoppia 1, situata sulla cella maggiormente sollecitata. Infatti, come si osserva dalla Figura 31, nel caso in aria (linee continue) si riscontra una notevole differenza, circa 23 °C a fine scarica, tra le due TC. Si ha quindi una notevole disuniformità termica tra l'interno del pacco batterie e il volume circostante. Nel caso con fluido basso bollente (linee tratteggiate), invece, si evidenzia un andamento simile tra le due TC e una differenza di temperatura che non supera mai i 2 °C. Ne consegue che il Novec, oltre a mantenere le temperature ad un livello notevolmente più basso, permette di uniformare il profilo termico di tutto il fluido all'interno del volume chiuso.

Per permettere, inoltre, la valutazione di un possibile gradiente termico lungo l'altezza, sono state installate tre TC immerse nel fluido sulla stessa verticale. Anche in questo caso si evidenzia una disuniformità termica nel caso in aria; nello specifico si ha una temperatura più elevata nella zona centrale, dovuta probabilmente all'irraggiamento maggiore delle batterie. Da notare, inoltre, i continui picchi di minimo delle curve del Novec (linee tratteggiate), dovuti al movimento delle bolle che si creano nell'ebollizione. I picchi si intensificano in frequenza verso la fine della scarica per via della maggior quantità di liquido che viene coinvolta nel cambiamento di fase. L'intensificarsi della reazione di ebollizione consente di tenere sotto controllo il processo di produzione del calore, che aumenta con la riduzione dello SoC del pacco batterie, stabilizzando la temperatura intorno ai 34 °C.

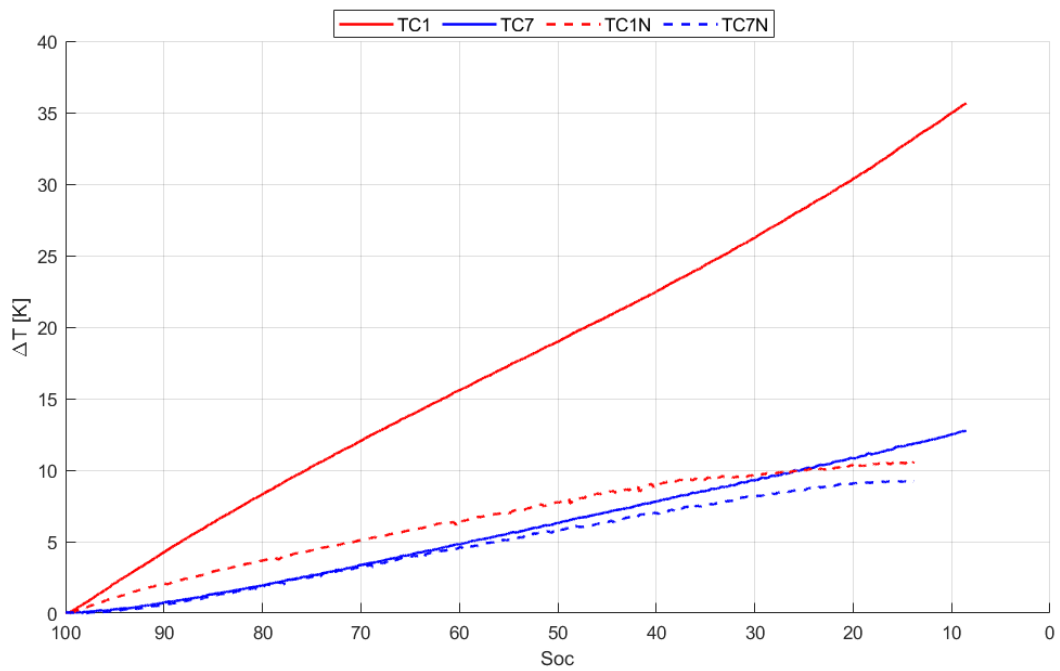


Figura 31 : Confronto della temperatura del fluido con la cella centrale

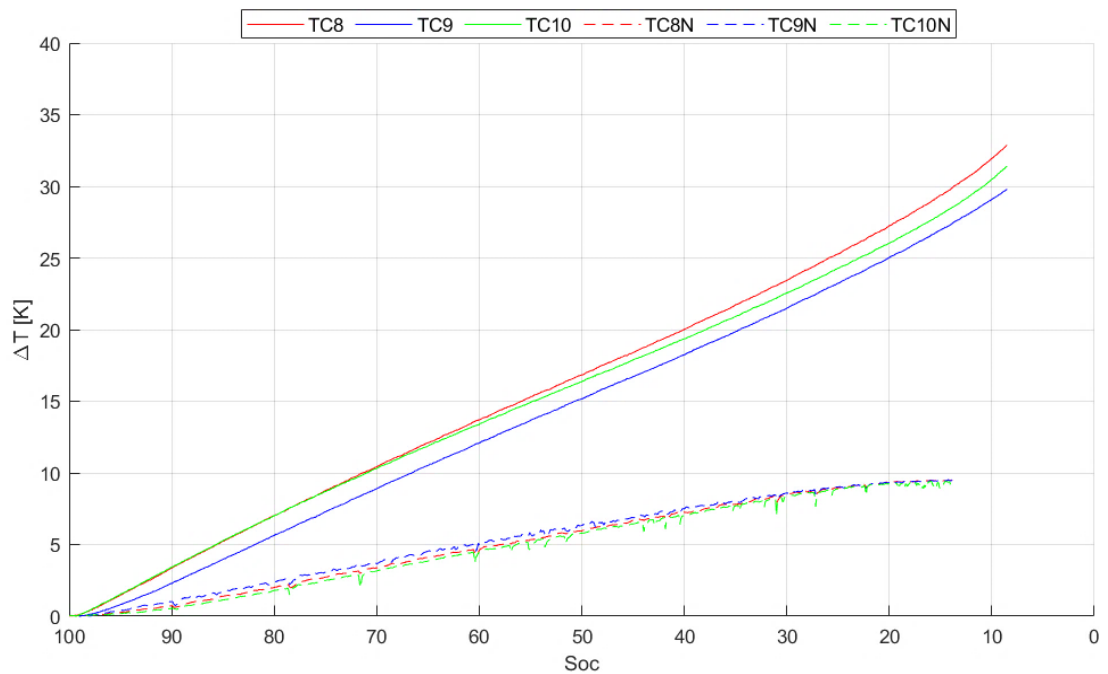


Figura 32 : Confronto termocoppie a diverse altezze nel fluido (3C)

3.1.3 Misura della pressione all'interno del contenitore

Essendoci un cambiamento di fase, del liquido basso bollette, è stata ritenuta necessaria la valutazione delle possibili variazioni di pressione. È stata, quindi, installata una presa di pressione sul coperchio del contenitore contenente il Novec(Figura 34).

Andando ad osservare l'andamento di pressione(Figura 33), ottenuto durante la scarica in 3C, si evidenzia un notevole aumento di pressione soprattutto quando il fluido inizia ad andare in ebollizione. Purtroppo, non è stato possibile effettuare la misurazione fino al termine della scarica in quanto il Novec, che condensa sul coperchio del contenitore, tende ad entrare all'interno della presa di pressione e a risalire il tubicino in plastica fino al sensore. La prova è stata, quindi, interrotta ad uno SoC di circa il 21%. Da notare, inoltre, i continui picchi di pressione che aumentano di frequenza verso la fine della scarica. È stato verificato, anche tramite osservazione diretta del fenomeno, che tali andamenti sono dovuti alla condensazione sul coperchio e all'ingresso di liquido nel tubicino di pressione.

Nonostante le problematiche riscontrate si è evidenziata una variazione di pressione non trascurabile. Si propone, quindi, di modificare la posizione della presa di pressione, collocandola ad esempio sulla superficie laterale del contenitore, dove non si è verificata alcuna condensa. Tutto ciò al fine di effettuare una valutazione più dettagliata e approfondita del fenomeno.

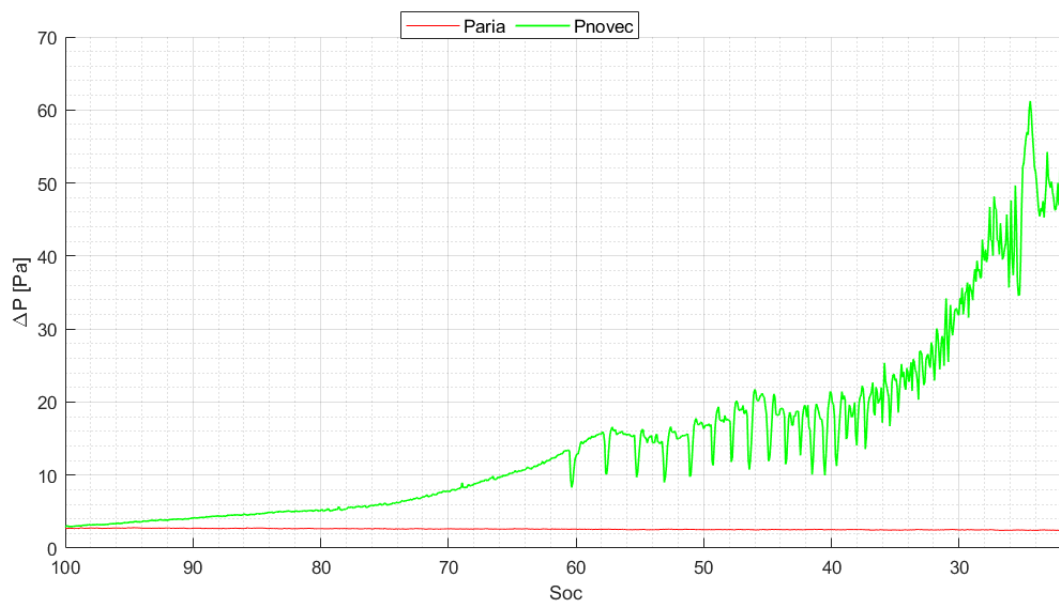


Figura 33 : Andamento della pressione (3C)

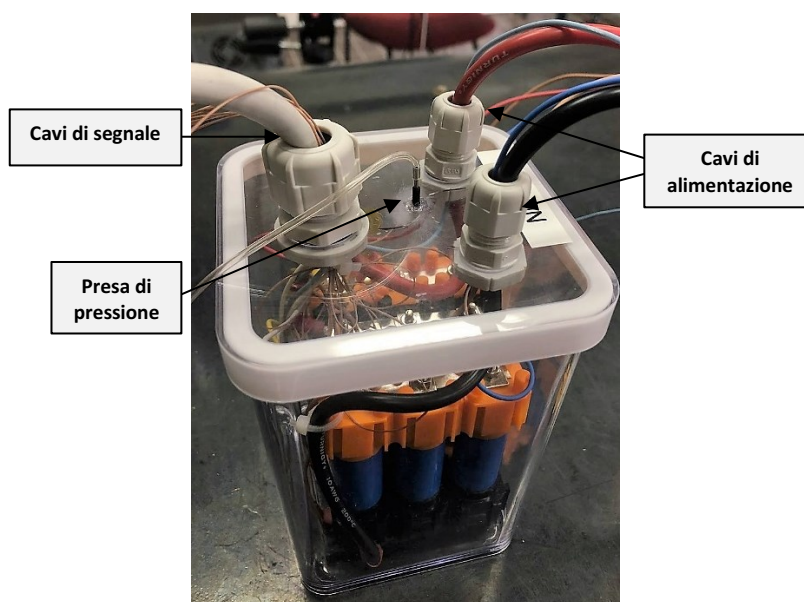


Figura 34 : Allestimento della presa di pressione

3.1.4 Analisi termografica della distribuzione termica superficiale

Per valutare la distribuzione termica sulla superficie del contenitore ed avere, quindi, un'informazione aggiuntiva sulla potenza generata, si è scelto di effettuare un'analisi termografica.

Nello specifico, è stata utilizzata una termocamera della FLIR, modello SC-3000, per effettuare misurazioni termografiche, sui due pacchi batterie, durante la scarica, a diversi C-rate (1C, 2C e 3C). Di fondamentale importanza, affinché le misurazioni risultino affidabili, è l'impostazione dei parametri riportati in *Tabella 7*. Questi sono stati opportunamente misurati e trascritti prima di ogni test; tuttavia, per semplicità vengono qui riportati i soli valori medi.

Emissività del plexiglass	0,86
Temperatura ambiente	26 °C
Umidità ambiente	40 %
Distanza	0,5 m

Tabella 7 : Parametri ambientali per prove termografiche

Una volta terminate le prove i dati, acquisiti mediante l'apposito programma della FLIR, sono stati analizzati ed esportati in Matlab. Un passaggio fondamentale è stato quello di sottrarre, ai dati ottenuti istante per istante, la condizione iniziale. Tutto ciò al fine di lavorare in sottrazione, così da svincolare l'informazione termica dalla condizione iniziale ed eliminare anche possibili disturbi di sottofondo. I dati sono stati poi esportati in Matlab, come matrice di dimensione pari alla risoluzione della termocamera (240x320). Noto che ogni elemento della matrice fornisce l'informazione termica di un dato pixel dell'immagine; sono stati selezionati gli elementi di una retta che attraversa orizzontalmente il pacco, in tal modo è stato possibile graficare l'andamento termico lungo tale linea. Di seguito sono riportati tali andamenti, a quattro SoC scelti, nel caso in aria e nel caso nel Novec ad un C-rate di 3C.

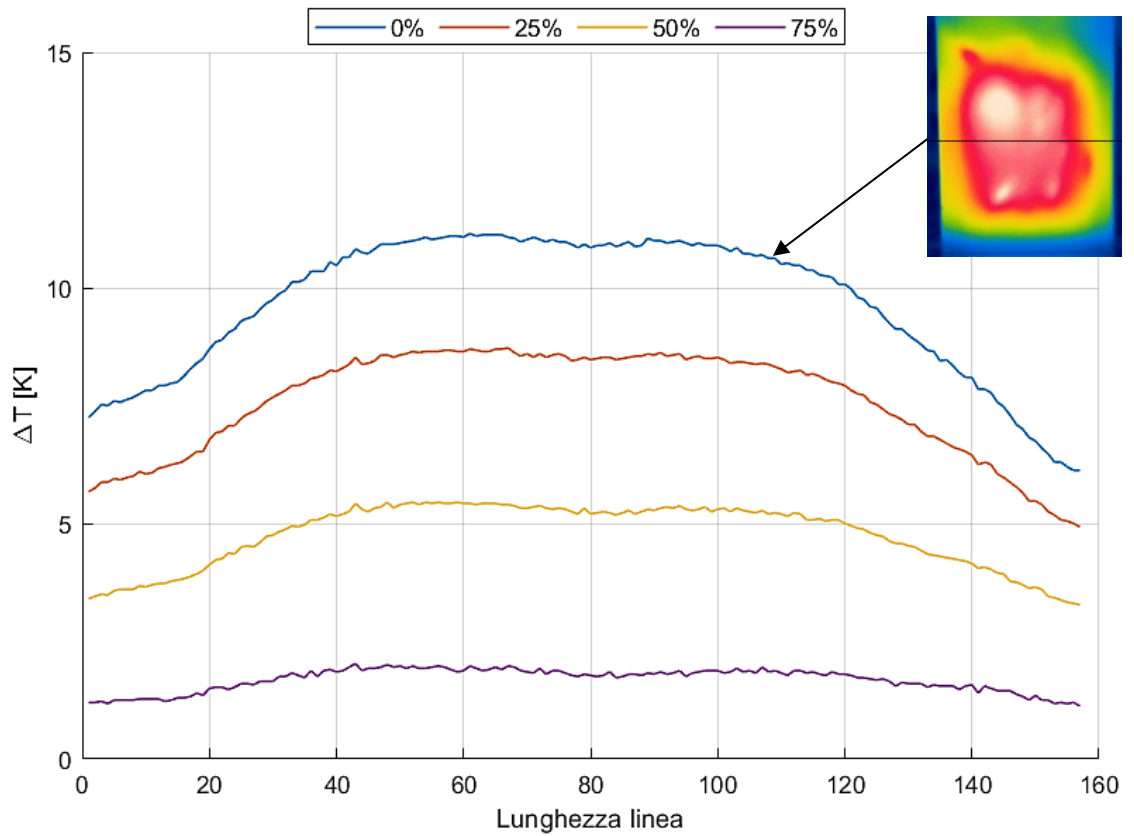


Figura 35 : Grafico andamento termico con termografia (aria 3C)

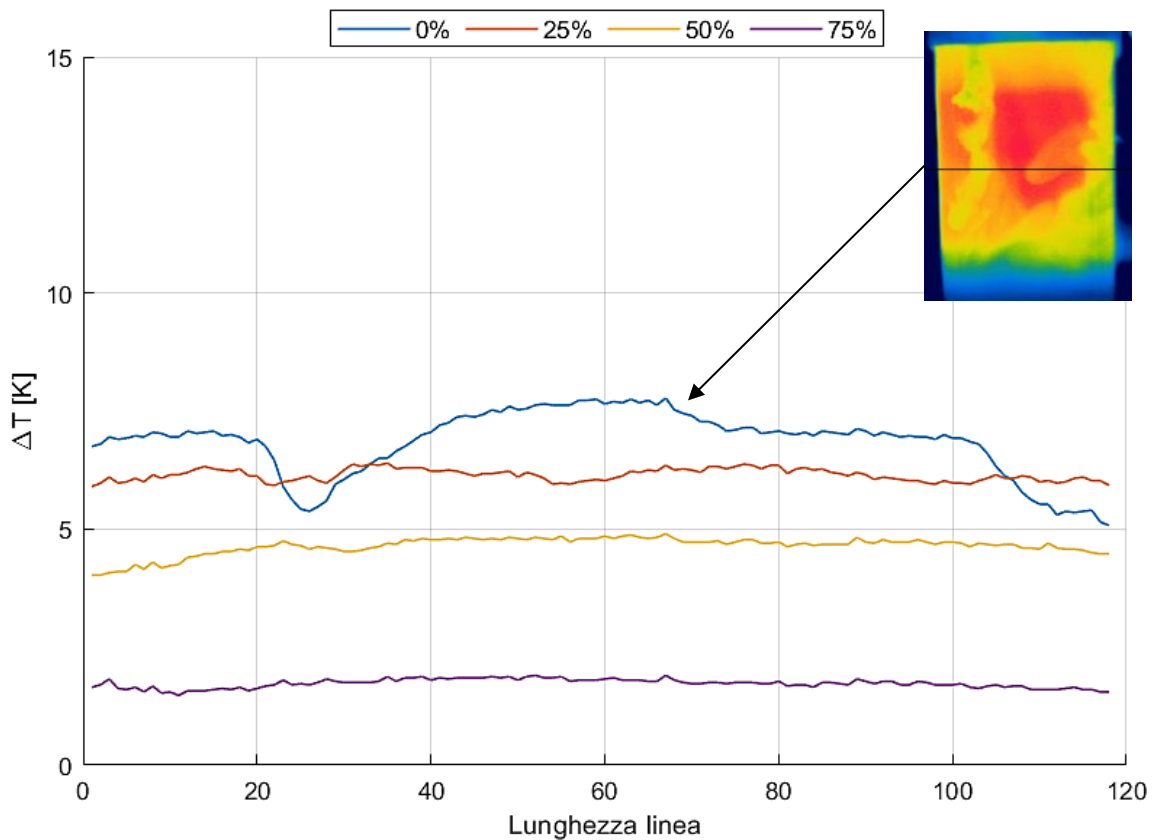


Figura 36 : Grafico andamento termico con termografia (Novec 3C)

Le quattro curve riportate nei grafici precedenti (Figura 35 e Figura 36) rappresentano l'andamento termico lungo la stessa retta (linea nera sull'immagine termografica) a diversi SoC, l'immagine termografica, invece, è relativa alla condizione finale di fine scarica ed è funzionale a spiegare i picchi presenti nel caso Novec. Andando, infatti, ad osservare la curva relativa al SoC dello 0 % (linea blu) si evidenziano due picchi che corrispondono ai fenomeni di disturbo presenti sull'immagine termografica. È stato ipotizzato che tale fenomeno sia dovuto ad un trafilamento di Novec, sottoforma di gas, in quanto inizia a manifestarsi con l'inizio dell'ebollizione. Tuttavia, per affermare con certezza quanto detto, sono necessarie ulteriori verifiche come l'utilizzo di un fondo nero durante le misurazioni termografiche, in modo da eliminare possibili disturbi, l'installazione di una seconda termocamera con cui poter effettuare un'ulteriore misurazione da un'altra prospettiva e l'utilizzo di un isolante al fine di rendere ermetico il coperchio.

Da un confronto dei grafici nel caso aria e nel caso Novec si evidenzia una maggiore uniformità termica lungo la superficie del contenitore di quest'ultimo e delle temperature più basse. Quanto osservato è fedele alle misurazioni effettuate con le termocoppie, durante la stessa prova sperimentale, e conferma, quindi, l'affidabilità dei risultati ottenuti.

Per completezza si riportano nell'Appendice D, a pagina 89, tutte le immagini acquisite nei due casi ai diversi C-rate e ai quattro intervalli di SoC, riportanti anche nei grafici precedenti. Tali immagini forniscono un riscontro diretto e veloce della differenza nella diffusione di calore nelle diverse prove.

3.2 CONFRONTO TRA MODELLAZIONE NUMERICA E RISULTATI SPERIMENTALI

Di notevole interesse è il confronto dei risultati sperimentali con i dati ottenuti dalla modellazione numerica.

Dal confronto del caso del pacco batterie immerso nel fluido aria (Figura 37) si riscontra un andamento per lo più simile tra sperimentale e numerico, con una differenza di circa 3 °C a fine scarica. Tale discrepanza però è giustificata dall'andamento del voltaggio. Andando, infatti, ad indagare quest'ultimo (Figura 38) si osserva che fino ad un SoC del 30% l'andamento del voltaggio ottenuto col numerico segue l'andamento sperimentale. Nell'ultima fase della scarica, invece, la curva subisce un distacco notevole dovuto al modello numerico che non approssima adeguatamente la caduta finale di voltaggio.

Un altro aspetto degno di nota è l'uniformità delle temperature misurate nel caso numerico; le TC, infatti, risultano quasi sovrapposte durante tutta la scarica. Ciò potrebbe essere dovuto ad un'approssimazione nel modello numerico, che non considera il calore scambiato per irraggiamento tra le celle. Si propone, quindi, un approfondimento del modello numerico al fine di verificare tale aspetto.

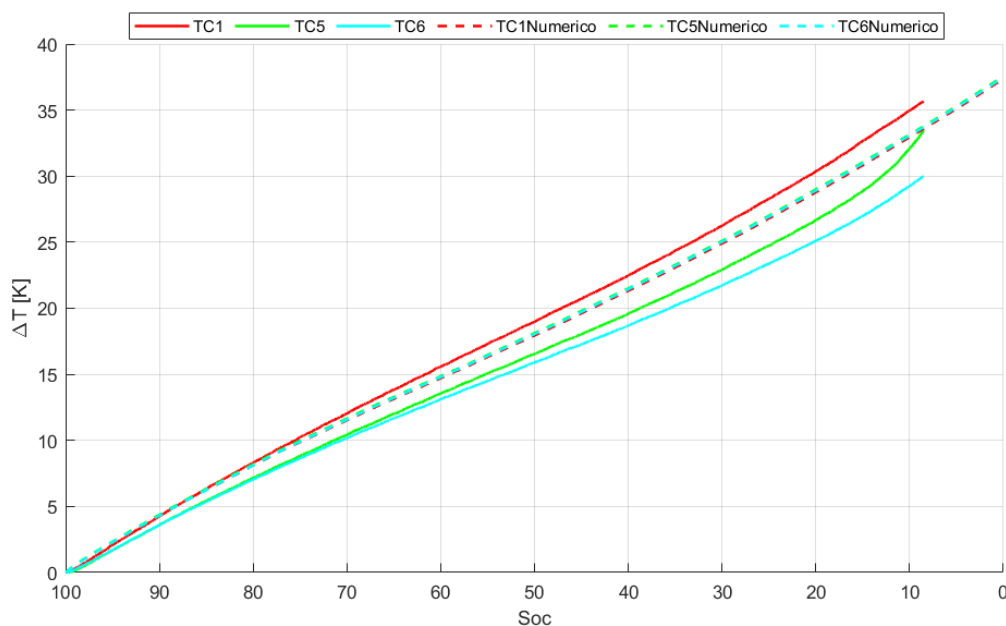


Figura 37 : Confronto modello numerico - sperimentale del caso in aria (3C)

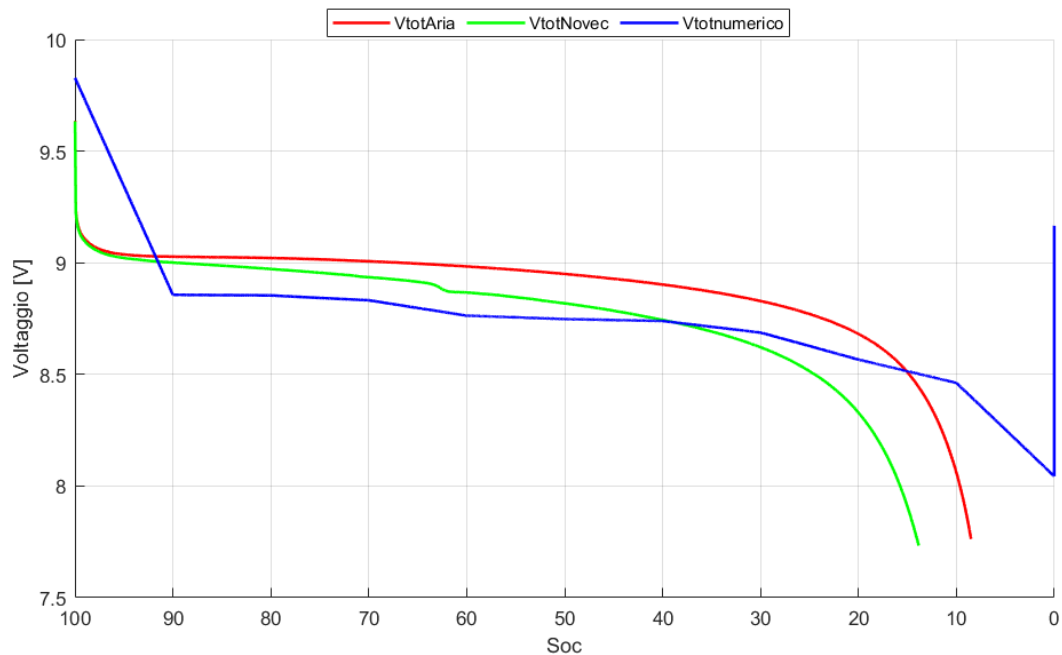


Figura 38 : Confronto modello numerico - sperimentale del voltaggio totale

Per quanto riguardano, invece, le prove effettuate sul pacco Novec si riscontrano differenze notevoli nell'ultima fase di scarica (Figura 39). Infatti, durante le prove sperimentali (linee continue), ad un SoC del 40%, il pacco batterie arriva ad una temperatura di circa 34 °C determinando, così, l'inizio del cambiamento di fase del Novec e quindi, una variazione nella pendenza delle curve di temperatura. Queste, come già visto in precedenza, tendono ad appiattirsi per via dell'ebollizione del fluido che assorbe calore latente e mantiene, così, la temperatura quasi costante. Nel modello numerico (linee tratteggiate), invece, la temperatura continua ad aumentare fino alla fine della scarica. Ne segue che il modello di ebollizione non è in grado di simulare correttamente il fenomeno reale. Da uno studio approfondito si osserva, infatti, che la simulazione considera solamente l'assorbimento di calore latente locale, ma non è in grado di tener conto delle bolle dovute al passaggio di fase. In altre parole, durante la prova viene simulato il solo cambiamento di percentuale di gas e di liquido presenti nel contenitore, mentre viene trascurato lo scambio termico convettivo, dovuto al moto delle bolle che salgono. Tutto ciò

determina un andamento termico più elevato rispetto al caso sperimentale e una non ottimale simulazione del fenomeno di ebollizione del fluido basso bollente. Un possibile miglioramento del modello numerico, che permetta di simulare correttamente tutti i fenomeni connessi al cambiamento di fase del Novec, potrà portare ad un confronto più dettagliato.

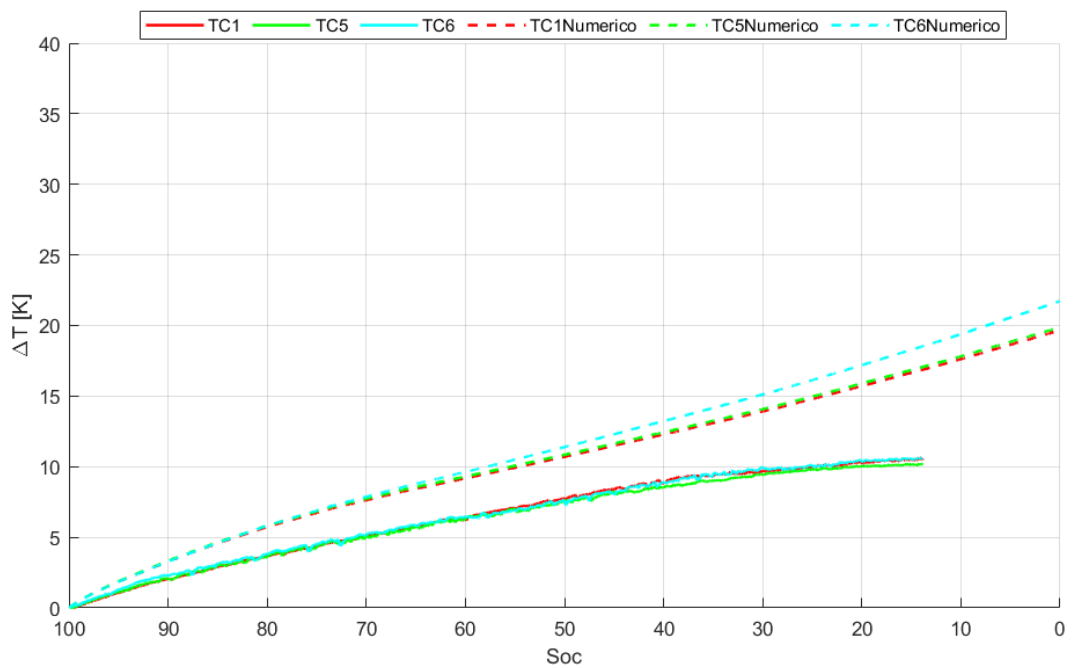


Figura 39 : Confronto modello numerico - sperimentale caso Novec (3C)

4 SET UP SPERIMENTALE E-BIKE

Lo studio finora affrontato, per la valutazione di un sistema di raffreddamento alternativo per un pacco batterie agli ioni di litio, può trovare diverse applicazioni. Tale progetto, infatti, è parte di una ricerca più ampia che riguarda il controllo termico di diversi sistemi di propulsione elettrica per la mobilità sostenibile.

Tra le possibili applicazioni si è scelto, in questo lavoro, di valutare l'utilizzo di un fluido in cambiamento di fase (Novec 7000) per il raffreddamento di un sistema di accumulo di una bicicletta a pedalata assistita.

Il banco prova, allestito per i test sperimentali, può essere suddiviso in due parti, il lato bicicletta, il cui pacco batterie è oggetto di studio, e il lato ciclista, costituito da un motore che simula la pedalata.

4.1 LATO BICICLETTA

Questa prima parte del banco prova è costituita da un freno magnetico che permette la simulazioni di diversi percorsi, da un sistema di controllo e da una bicicletta a pedalata assistita.

4.1.1 Bicicletta elettrica

Una "e-Bike", nota anche come EPAC (Electric Power-Assisted Cycle), bicicletta booster o bicicletta elettrica, è una bicicletta con un motore elettrico integrato e con batterie ricaricabili che assiste la potenza fornita dal ciclista attraverso la pedalata [1]. È importante prestare attenzione alla differenza tra e-bike che assistono la propulsione del ciclista (pedelec) ed e-bike che forniscono un'accelerazione anche in assenza di pedalata (ciclomotori). In questo trattazione si considera unicamente la prima tipologia, che rappresenta anche la più diffusa.

Le e-bike variano da biciclette personalizzate di fascia alta (circa 7000 €) a componenti aggiuntivi, come pacco batterie e motore, che permettono di convertire una bicicletta convenzionale in una assistita (circa 800 € per il sistema completo). Ovviamente il prezzo varia in funzione di molti aspetti, tra cui la potenza del motore, il materiale con cui è realizzato il telaio e la capacità del pacco batterie che determina la durata della ricarica.

Un'ulteriore classificazione può essere fatta in base alla posizione del motore che può essere anteriore, posteriore o centrale.

Nel primo caso (Figura 40) il motore è posto al centro della ruota anteriore e tende a trainare il ciclista in avanti. Questa soluzione presenta sicuramente notevoli vantaggi, sia per l'installazione e la manutenzione del motore sia per quanto riguarda la distribuzione del peso e dello sforzo totale. Tuttavia, per questa applicazione la potenza del motore è limitata (massimo 350 W) dalla solidità della forcella anteriore e si riscontra un maggiore slittamento in caso di forti pendenze.

Nel caso, invece, di una e-bike con motore posteriore (Figura 41) si ha una guida più reattiva dovuta alla trasmissione direttamente collegata alla ruota dietro. Di contro, il sistema risulta più complesso rispetto agli altri due casi e richiede una manutenzione più frequente.

Infine, si possono avere biciclette elettriche con motore centrale (Figura 42). Queste sono attualmente le più diffuse al mondo sia per le ottime prestazioni sia per il miglior bilanciamento. In questo caso, il motore è direttamente connesso ai pedali garantendo così un utilizzo più efficiente della potenza del motore. Inoltre, quest'ultimo risulta molto meno esposto all'ambiente esterno e di conseguenza si usura molto di meno. L'unico svantaggio, in questo caso, è dato dalla complessità progettuale che rende le e-bike con motore centrale più costose delle precedenti soluzioni.

Per questo studio è stata scelta una pedelec con motore centrale, sia perché è la tipologia più diffusa sia perché solitamente lavora con potenze più elevate che determinano un riscaldamento maggiore del pacco batterie. Nello specifico è stata

testata una bicicletta Trek, modello Powerfly 4 (Figura 42), con una batteria Bosch da 625Wh e 36V e un motore, modello Performance Line CX, che eroga un coppia massima di 85 Nm.

La bicicletta presenta un sensore di velocità sulla ruota posteriore, questo risulta necessario nelle e-bike per il corretto funzionamento del motore. Infatti, vista la grande diffusione di biciclette a pedalata assistita, è stata emanata una legge che regola l'alimentazione del motore elettrico. A seguito di ciò, è stata fissata una velocità massima (25 km/h) oltre la quale l'assistenza del propulsore elettrico va progressivamente diminuendo, fino ad arrestarsi del tutto.

Per la gestione e l'analisi delle prestazioni della e-bike è stato utilizzato un ciclocomputer della Bosch, modello Nyon, che permette non solo la regolazione delle impostazioni della bici e l'acquisizione dei dati, ma anche la connessione completa al software eBike Connect. Questo, oltre a fornire la possibilità di impostare il percorso e il livello di assistenza del motore, permette l'esportazione come file di testo (.tcx) di tutti i dati acquisiti con la frequenza di 10 Hz. Tra le informazioni disponibili troviamo: velocità, distanza percorsa, posizione geografica, cadenza, potenza di assistenza fornita dal motore e potenza prodotta dal ciclista.

Come sistema di accumulo di energia la Trek prevede una batteria Bosch orizzontale, modello PowerTube 625, agli ioni di litio con una capacità di 16,7 Ah ed una tensione di 36 V. All'interno della scocca del pacco batterie sono situate le singole celle, opportunamente collegate tra loro, con voltaggio nominale di 3,6 V. Il tutto è collegato al sistema di gestione delle batterie (BMS) che interagisce con la bicicletta tramite 4 cavi, 2 cavi di alimentazione e 2 cavi "CAN" che permettono la trasmissione dei dati in uscita al BMS.



Figura 40 : E-bike con motore anteriore



Figura 41: E-bike con motore posteriore



Figura 42 : E-bike con motore centrale

4.1.2 Freno magnetico

Per permettere la simulazione di diversi percorsi e rendere, quindi, realistiche e ripetibili le prove sperimentali sulle prestazioni del pacco batterie, si utilizza un freno magnetico della ditta Elite, modello Direto XR (Figura 43). Questo, oltre a permettere la riproduzione di pendenze fino al 14 % con una potenza fino a 1400 W, è dotato di un misuratore di potenza integrato OTS (Optical Torque Sensor) che permette di misurare direttamente la potenza in uscita con una precisione del +/- 1,5%. Tutti i dati acquisiti, tra cui velocità e cadenza di pedalata, sono esportabili come file Excel (.csv) tramite il software My E-Training. Quest'ultimo permette la gestione completa del rullo e quindi anche scelta degli intervalli di potenza richiesta.

Per permettere l'installazione del freno magnetico, è stato necessario rimuovere la ruota posteriore della bici e di conseguenza si è perso il sensore velocità necessario al corretto funzionamento della e-bike. Pertanto, è stato progettato un supporto per il sensore e per il suo magnete che permettesse il corretto funzionamento del sistema. In particolare, per l'installazione del magnete è stato realizzato un pezzo, opportunamente sagomato, tramite stampaggio 3D (Figura 48).



Figura 43 : Freno magnetico della Elite

4.2 LATO CICLISTA

Questa seconda parte del banco prova ha l'obiettivo di movimentare la bicicletta andando a simulare la pedalata di un ciclista, tutto ciò al fine di rendere le prove ripetibili e realistiche. Il lato ciclista è costituito principalmente da un sistema di trazione e dal suo sistema di controllo.

4.2.1 Sistema di trazione: motore Bafang

Per la trazione è stato scelto un motore elettrico brushless a corrente continua ideato per la conversione di una bicicletta tradizionale in una e-bike. Nello specifico si utilizza un motore Bafang, modello BBS02B, con una tensione di 36 V, una potenza nominale di 500 W e una coppia massima di 110 Nm.

Per permettere il collegamento del controllo elettronico della stabilità, o Electronic Stability Control (ESC), è stata rimossa la scheda di controllo del motore. Questo elemento è fondamentale per il controllo della velocità del motore e per ridurre la perdita di trazione. È stato scelto, quindi, un ESC della FlyFun, modello HV130A OPTO VS, che consente di avere una corrente continua di 130 A.

Si è scelto di alimentare il sistema di trazione con la batteria prevista dal kit del Bafang. Questa è collegata al motore mediante un ESC e presenta una tensione di 36 V e una capacità di 15,6 Ah.

4.2.2 Sistema di controllo del motore

Per il controllo e la gestione del motore Bafang è stato scelto di utilizzare un segnale PWM (Pulse Width Modulation), che permette la modulazione di un segnale ad impulso. Un motore elettrico, infatti, lavora con un segnale digitale che può avere solo due valori, uno nullo (0 V) e l'altro massimo (5 V). Pertanto, per rendere la velocità del motore modulabile si ricorre all'utilizzo del segnale PWM che è caratterizzato da una frequenza fissa e dal duty cycle variabile. Quest'ultimo è dato dal rapporto tra il tempo in cui l'onda quadra assume valore massimo (5V)

e il periodo T dato dall'inverso della frequenza. In altre parole, si ha un'onda quadra che alterna stati attivi, in cui viene fornita tensione al motore, a stati passivi in cui la tensione è nulla, il tutto in un periodo T costante che dipende dalla frequenza (Figura 44). Se, ad esempio, si ha un duty cycle del 25% si ha che per il 25% del periodo viene erogata la tensione di 5 V e per il rimanente 75% la tensione è nulla. Se questa onda quadra viene ripetuta per più periodi il motore avrà una velocità costante pari circa al 25% della velocità massima sviluppabile. Se, invece, si fa aumentare gradualmente il duty cycle si ottiene un'accelerazione fluida e senza scatti.

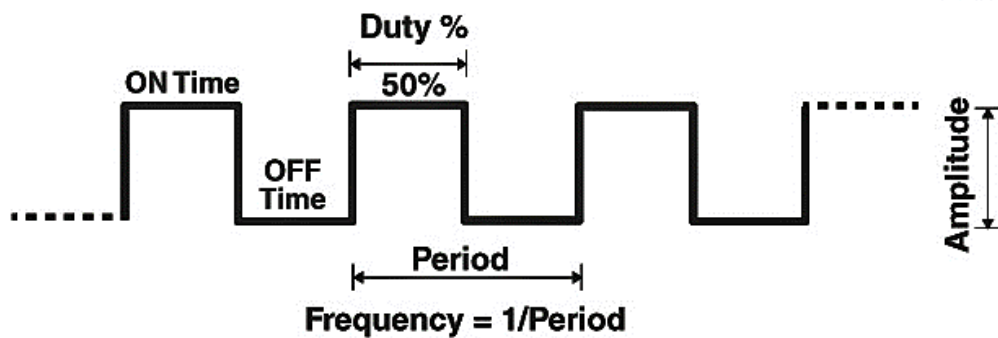


Figura 44 : Esempio di segnale PWM

Per la generazione del PWM è stato utilizzato dapprima un radiocomando per droni. Questo, attraverso una ricevente connessa all'ESC e alimentata individualmente, permette una movimentazione fluida del motore. Successivamente è stato creato un programma in Labview che permette la generazione di un segnale PWM e, con l'aiuto di un oscilloscopio, è stato regolato in modo da fornire un andamento analogo a quello del radiocomando. È stata poi verificata l'effettiva corrispondenza in velocità e in corrente, ai diversi intervalli di duty cycle, tra controllo con radiocomando e gestione con programma Labview, con un misuratore di velocità laser e una pinza amperometrica. Dal confronto è emersa una corrispondenza fedele tra i due sistemi.

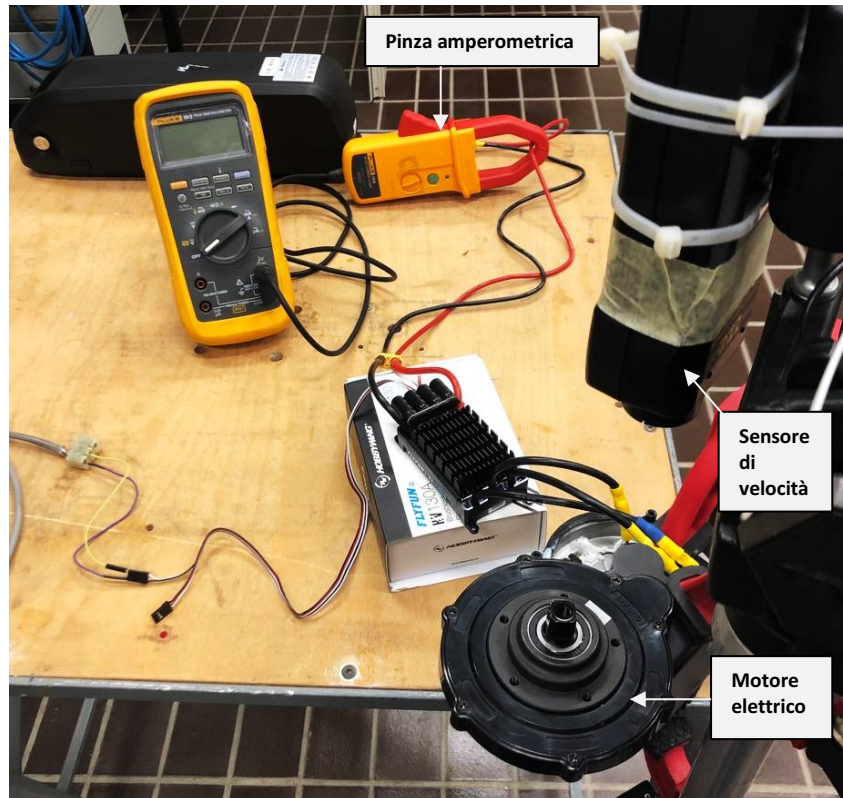


Figura 45 : Test sistema di controllo del motore

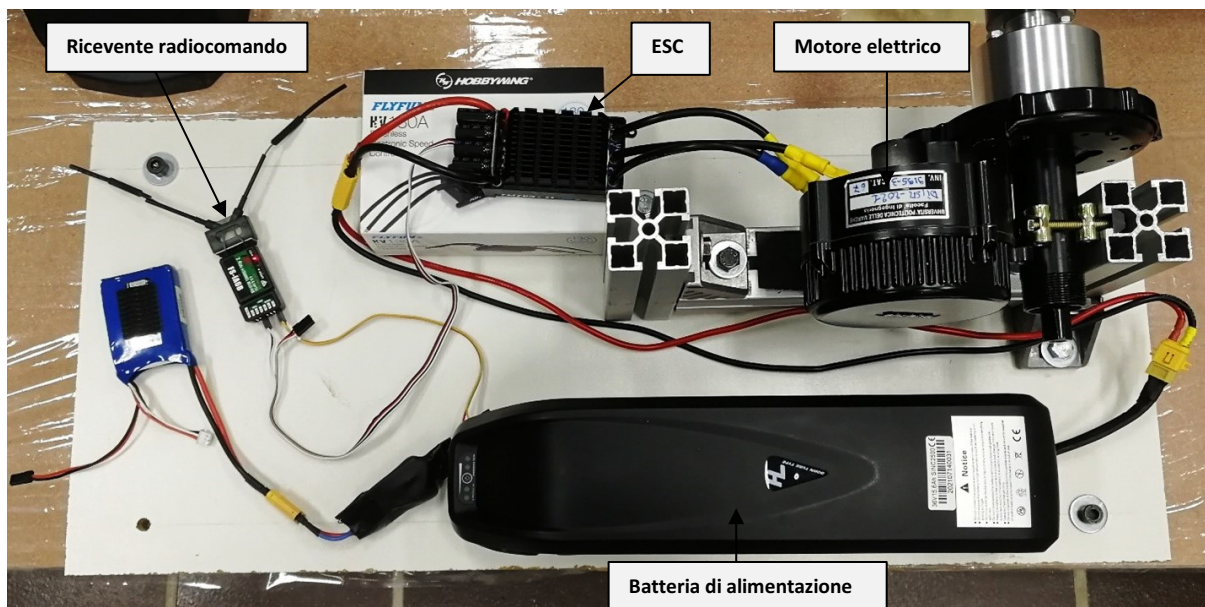


Figura 46 : Set-up lato ciclista

4.3 ACCOPPIAMENTO E-BIKE – MOTORE

Per l'accoppiamento tra le due parti del banco prova è stata necessaria una progettazione su misura di alcuni componenti che sono poi stati opportunamente realizzati.

Per il lato bicicletta è stato pensato un albero (Figura 72) che si accoppia con la e-bike attraverso la filettatura presente sulla pedivella. È stata quindi realizzata un'estremità con diametro (15 mm) e filettatura (M15 passo 1) tali da garantire l'inserimento del vano vite della pedivella. Per distribuire al meglio il carico sulla pedivella ed evitare di sforzare eccessivamente la filettatura durante la rotazione, è stata pensata l'installazione di una piattina che collega l'albero all'estremità su cui viene montato il pedale. Questo elemento presenta 4 fori simmetrici per viti M5 che consentono l'unione con l'albero passante e, sul lato opposto, un foro che permette il collegamento con la pedivella tramite il foro presente per il pedale (Figura 47).

Per la scelta della tipologia e del numero di viti, per l'accoppiamento albero – piastrina, è stata necessaria una verifica meccanica della distribuzione del carico. Dapprima, muovendosi l'albero unicamente di moto rotatorio, è stata verificata la resistenza a taglio di ogni vite:

$$R_{\text{taglio}} = 0,6 \cdot f_{tb} \cdot \frac{A_{res}}{Y} \quad (7)$$

f_{tb} è la resistenza a rottura del materiale della vite, in questo caso è stata scelta un vite di classe 8,8 e di conseguenza f_{tb} equivale a 800 N/mm²;

A_{res} è l'area resistente della vite, per una M5 equivale a 14,2 mm²;

Y è il coefficiente di sicurezza che è stato assunto pari a 2.

Così facendo si ottiene una R_{taglio} pari a 3408 N.

Successivamente si è valutato il numero di viti sufficienti a sostenere il carico totale. È stato, quindi, calcolato il carico totale applicato, nota la coppia massima C fornita per la rotazione (110 Nm) e il braccio b (0,175 m), con la seguente equazione:

$$F = \frac{C \cdot Y}{b} \quad (8)$$

Andando poi a dividere la forza ottenuta (314,3 N) per il numero di viti utilizzate (4) si ottiene il carico per ogni vite (314,3 N) che deve risultare inferiore alla resistenza a taglio.

L'albero, così realizzato, è poi accoppiato ad un giunto elastico (*Figura 47*) che, grazie all'elemento in gomma flessibile presente al suo interno, assorbe i picchi di coppia e compensa eventuali disallineamenti. Infatti, soprattutto in fase di avviamento si possono avere degli sforzi eccessivi, dovuti anche ad un non perfetto allineamento del sistema, che possono portare alla rottura del sistema. Per la scelta del giunto è stato necessario stimare la coppia che il motore Bafang genera durante il funzionamento. Questo, infatti, pur potendo lavorare fino a 110 Nm, viene utilizzato per simulare la pedalata di un ciclista che ha al massimo una potenza e un numero di giri al minuto pari a 200 W e 100 rpm [22]. Di conseguenza, una volta calcolata la velocità angolare, si ricava la coppia massima da erogare che sarà equivalente a 19,1 Nm.

$$\omega = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{60} \quad (9)$$

$$C = \frac{P}{\omega} \quad (10)$$

Per il lato ciclista, invece, è stato progettato un albero (Figura 73) che va ad agganciarsi alla parte mobile del motore con le 5 viti M5 previste per il fissaggio della corona della bicicletta. L'albero presenta poi una concavità che garantisce, insieme alle viti, un accoppiamento stabile con l'elemento in rotazione. Anche in questo caso è stata effettuata una verifica della resistenza al taglio delle viti e del carico totale a cui è sottoposta ogni vite.

Entrambi gli alberi sono stati realizzati in alluminio mediante tornitura, in modo da garantire una maggiore leggerezza del sistema, e presentano un vano sagomato per l'inserimento della chiavetta con cui è fissato il giunto.

Per completezza si riportano, in appendice a pagina 92, i disegni completamente quotati dei pezzi realizzati.

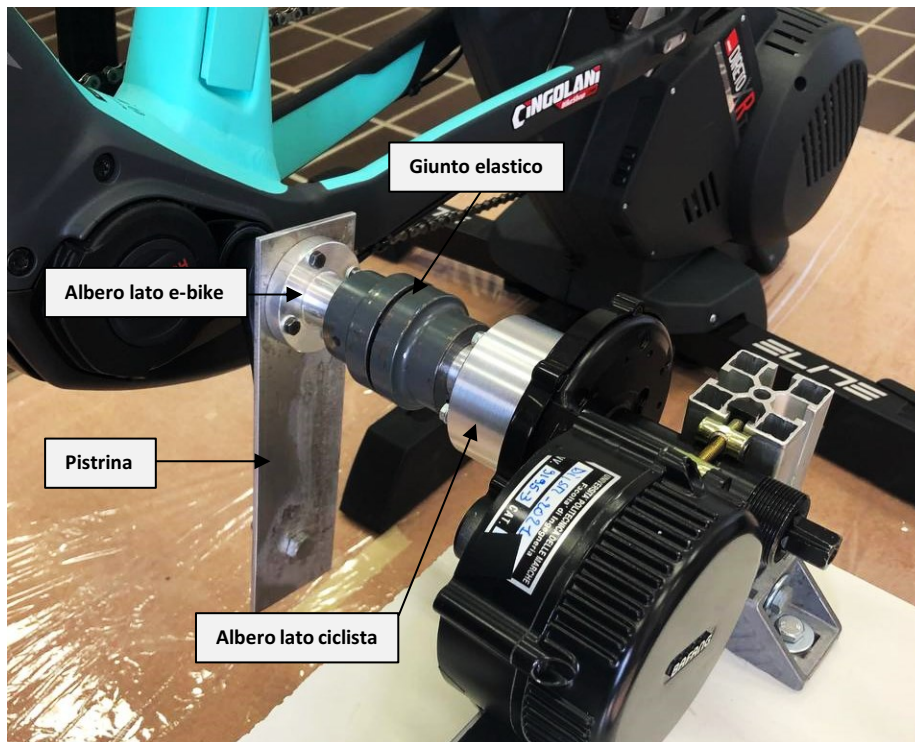


Figura 47 : Accoppiamento e-bike - motore

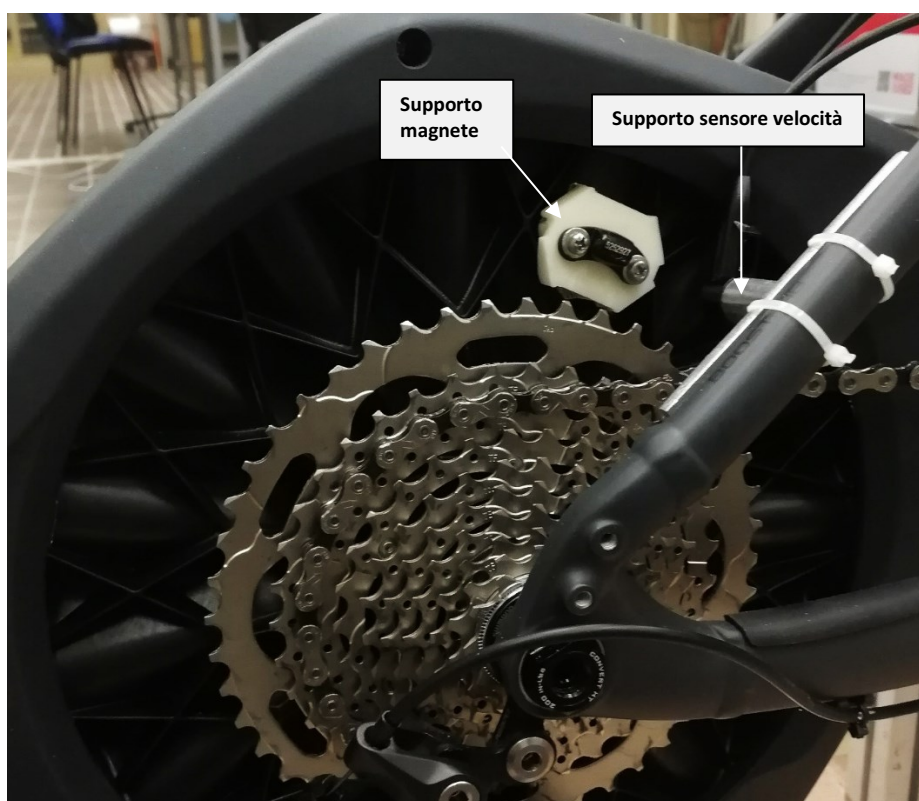


Figura 48 : Supporto sensore di velocità

4.4 SCHEMA FINALE DELL'ALLESTIMENTO

Una volta terminata la realizzazione del collegamento tra le due parti del banco prova, sono stati valutati i segnali necessari alla gestione del sistema e i dati da acquisire. Il tutto è stato poi riportato nello schema a blocchi di Figura 49.

Per quanto riguarda il lato e-bike si vanno ad acquisire i dati di voltaggio, tramite la scheda della National Instrument (NI6289), e i dati di temperatura, tramite le termocoppie collegate alla scheda di acquisizione (SCI), della batteria Bosch. Si acquisisce, inoltre, l'informazione di corrente tramite il sensore IT 65-S, il cui funzionamento è basato sull'effetto Hall. I segnali di voltaggio e corrente sono poi visualizzati a schermo tramite l'utilizzo di due display, questi forniscono un riscontro in tempo reale delle grandezze misurate.

La e-bike è poi connessa al freno magnetico della Elite che, tramite il software My E-Training, permette non solo di impostare il livello di resistenza alla pedalata, ma fornisce anche i dati relativi alla potenza del ciclista, alla velocità e alla cadenza. Il Nyon, invece, è il display della Bosch che permette l'acquisizione e l'esportazione, tramite il software eBike Connect, dei dati di potenza della bicicletta. Nello specifico permette la distinzione tra la potenza fornita dal ciclista e quella di supporto fornita dal motore elettrico.

Anche nel lato ciclista si vanno ad acquisire i dati di voltaggio e corrente del pacco batterie connesso al motore elettrico tramite ESC. Come già illustrato in precedenza, il sistema è messo in movimento tramite un segnale PWM, fornito attraverso un apposito programma su Labview.

Per maggiore chiarezza sullo schema (Figura 49) sono poi riportati tutti i dati acquisiti, i sistemi di acquisizione, il range dei segnali e il formato dei file esportabili. Si riporta, inoltre, la foto (Figura 50) dell'allestimento finale.

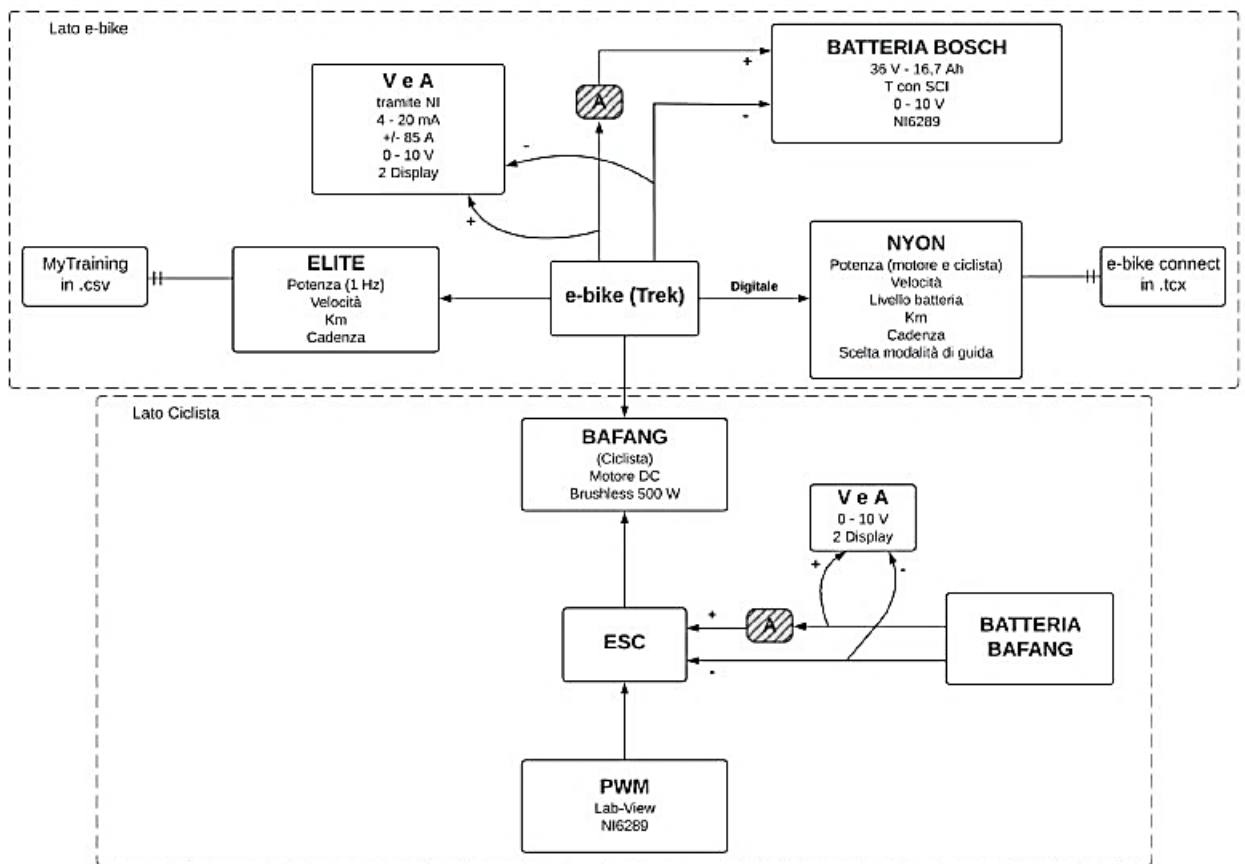


Figura 49 : Schema riassuntivo del set-up per l'e-bike



Figura 50 : Set-up finale dell'e-bike

5 CONCLUSIONI

La finalità dello studio condotto è di valutare le prestazioni di un nuovo sistema di raffreddamento, basato sull'immersione diretta dei componenti in un liquido dielettrico basso-bollente di produzione militare, il Novec 7000. Si vogliono, quindi, monitorare gli effetti che esso produce su temperature superficiali e voltaggi delle batterie, andandoli poi a confrontare al caso in cui non è presente un sistema di raffreddamento.

Il suddetto sistema è stato pensato per migliorare le prestazioni dei pacchi batterie delle mountain bike elettriche, attraverso l'assorbimento del calore generato dai picchi di potenza che si verificano soprattutto durante un percorso in salita, e cioè in assenza di convezione dell'aria.

Dapprima i test sono stati svolti su di un pacco batterie di dimensioni ridotte (3P3S) rispetto a quello della e-bike in modo da valutare, attraverso un contenitore trasparente, il comportamento fisico e fluidodinamico del Novec ai diversi C-rate di scarica.

Dalle prove effettuate si è evidenziata una notevole riduzione delle temperature di funzionamento del pacco batterie immerso nel Novec. Questo, infatti, presenta una temperatura, al termine della scarica in 3C, di circa il 70% in meno rispetto al caso non raffreddato. Ciò è dovuto al liquido basso bollente che, andando in ebollizione a circa 34 °C, assorbe una grande quantità di calore riducendo i picchi di temperatura. Inoltre, durante il cambiamento di fase la temperatura all'interno del pacco resta per lo più costante, riducendo così di molto i fenomeni termici.

Tutto ciò contribuisce a mantenere le batterie nel range ottimale di funzionamento (20 – 40°C), cioè dove sprigionano la massima potenza elettrica e il minimo calore, incrementando così anche la vita utile delle stesse.

Un altro importante risultato ottenuto è la maggiore uniformità termica che si riscontra con l'utilizzo del Novec. Le termocoppie poste sulle diverse celle, infatti,

forniscono lo stesso andamento termico durante tutte le prove. Tale uniformità è riscontrabile anche nelle termocoppie immerse nel fluido dove, a differenza del caso senza raffreddamento, si registrano temperature analoghe a quelle delle celle.

L'uniformità termica, osservata con le termocoppie, è evidenziata anche dalle rilevazioni termografiche, dove si osserva anche un riscaldamento minore della superficie del contenitore.

Il suddetto comportamento termico è stato poi confrontato con quanto ottenuto dalla modellazione numerica del pacco batterie, in modo da poter valutare se ci fosse una certa corrispondenza e verificare l'affidabilità dei dati ottenuti tramite simulazione.

Un altro aspetto che è stato trattato è il condizionamento che il liquido ha sul voltaggio delle batterie e quindi sulla potenza elettrica erogabile. Infatti, da un precedente lavoro di tesi si era evidenziato un calo del voltaggio esprimibile dalle batterie quando esse sono immerse nel Novec 7000. A tal proposito, si è osservato che andando a ridurre il quantitativo di fluido basso bollente per cella (50 cm^3 invece di 200 cm^3) si ha un'attenuazione notevole del fenomeno. Tutto ciò è stato attribuito ad una non perfetta dielettricità del Novec, che può portare, nel caso di un'eccessiva quantità dello stesso, alla dispersione di cariche elettriche.

Sempre dal confronto con i test effettuati su di una singola cella, si è riscontrato un aumento di temperatura notevole nel caso di più batterie in serie e in parallelo. Ciò è sicuramente attribuibile allo scambio termico per irraggiamento che si verifica tra le batterie dello stesso pacco e si va ad aggiungere ai fenomeni di riscaldamento già evidenti sulla singola cella.

Si suppone, quindi, che tali fenomeni incrementeranno nel caso di pacchi di dimensioni maggiori, portando alla generazione di una quantità di calore superiore al calore latente del Novec 7000. In tali condizioni, si potrebbe avere l'evaporazione completa del fluido con un conseguente incremento della pressione e della temperatura.

Questo fenomeno comporta la necessità di installare un soffiETTO, in modo da compensare le possibili sovrappressioni, e un sistema di raffreddamento alettato sulla superficie del contenitore, al fine di promuovere la condensazione. Si ipotizza, ad esempio, la possibilità di realizzare un contenitore alettato in alluminio in modo da garantire un elevato scambio termico.

Un altro obiettivo è stato quello di valutare l'applicazione, di questo sistema di raffreddamento, nel caso di un pacco batterie destinato all'alimentazione di una e-bike. A tale scopo è stato realizzato un banco prova che consente la simulazione, tramite un freno magnetico, di diversi percorsi reali. La bicicletta elettrica testata è movimentata tramite un motore che permette di simulare la pedalata di un ciclista, tutto ciò al fine di rendere le prove ripetibili e realistiche.

Dai test effettuati è stato riscontrato il perfetto funzionamento di tutto il sistema di sensoristica e movimentazione.

In conclusione, questo studio ha esteso lo studio, di un sistema di controllo termico basato sul cambio di fase di un liquido basso-bollente, ad un pacco batterie destinato alla propulsione elettrica.

Nello specifico il Novec si è dimostrato perfettamente in grado di gestire, dal punto di vista termico, gli elevati picchi di potenza imposti in applicazioni legate alla mobilità sostenibile. Questo, infatti, ha mantenuto la temperatura costantemente a ridosso di quella di ebollizione, in qualunque momento della scarica.

L'obiettivo del prosieguo della ricerca sarà di verificare le differenze prestazionali, della bicicletta a pedalata assistita, nel caso dell'utilizzo del Novec 7000 come sistema di gestione termica.

Per rendere ancora più realistici i test sul comportamento termico del pacco batterie della e-bike, si prevede la possibilità di effettuare dei test in galleria del vento per considerare anche la convezione dell'aria. Tutto ciò al fine di avere un quadro completo, del comportamento nelle diverse situazioni reali, in vista di una possibile produzione e immissione sul mercato.

APPENDICE A: Rette di calibrazione dei sensori

Per maggior chiarezza si riportano i grafici delle rette di calibrazione del sensore di corrente e di pressione con le relative equazioni.

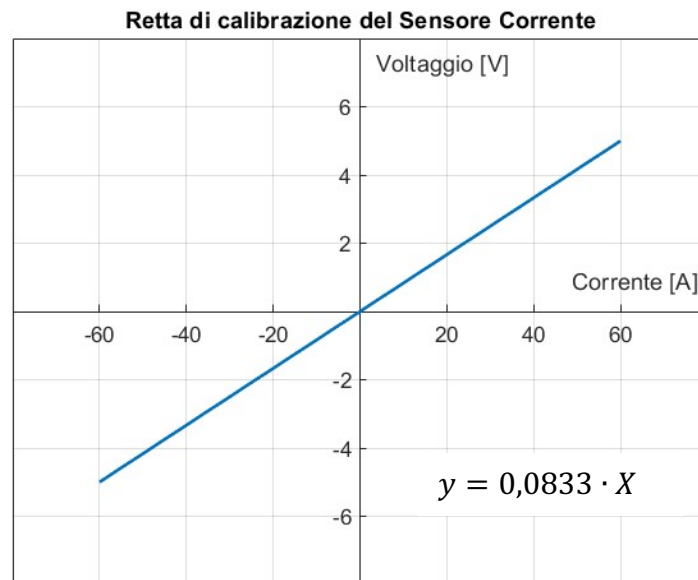


Figura 51 : Retta di calibrazione del sensore di corrente



Figura 52 : Sensore di corrente IT 65-S

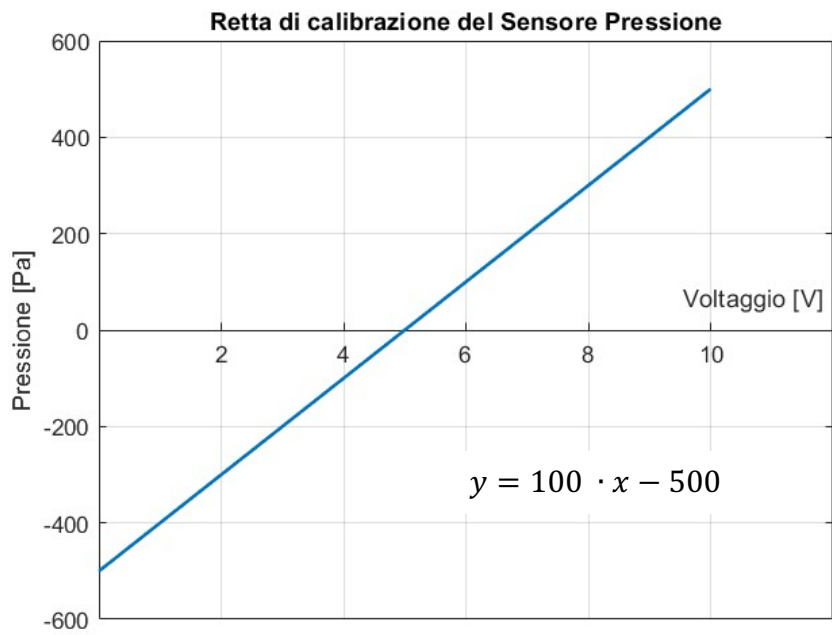


Figura 53 : Retta di calibrazione del sensore pressione



Figura 54 : Sensore di pressione differenziale GEMS 5266

APPENDICE B: Proprietà fisiche del Novec 7000

Si riportano i grafici relativi all'andamento di densità, conducibilità termica e calore specifico del PCM utilizzato per le prove sperimentali.

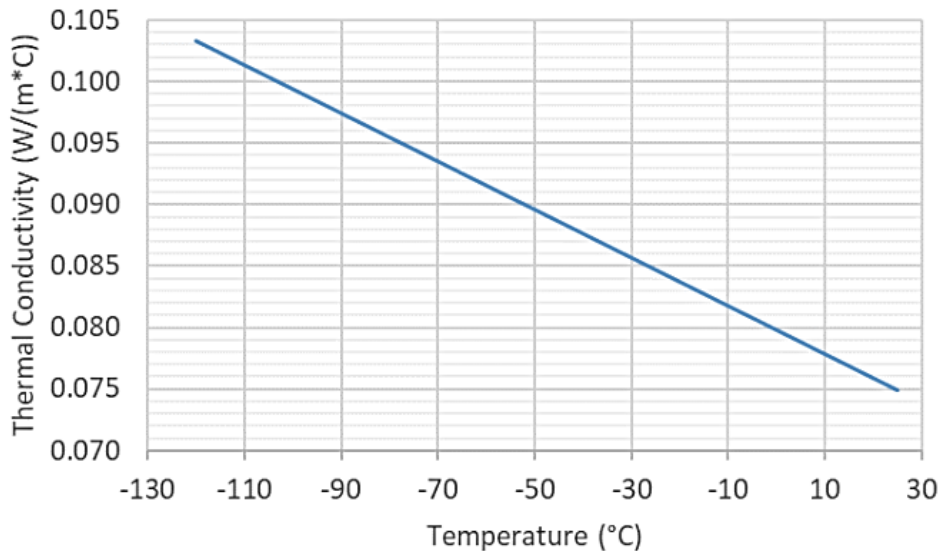


Figura 55 : Conducibilità termica del Novec 7000

La Conducibilità, espressa in $W/(m^2K)$ rappresenta la capacità di un mezzo di trasferire energia termica al suo interno e dipende da diversi meccanismi quali: vibrazione molecolare, mobilità elettronica, mobilità molecolare.

Confrontando la conducibilità termica dell'acqua in quiete ($0,63 W/mK$) e dell'aria in quiete ($0,026 W/mK$), che è considerata un ottimo isolante, si può affermare che il Novec 7000, dal punto di vista della conducibilità, è più simile ad un isolante termico che ad un conduttore. Inoltre, la conducibilità del PCM, che viene calcolata in funzione delle condizioni termiche con la formula seguente, diminuisce all'aumentare della temperatura.

$$\text{Conducibilità} = 0,0798 - 0,000196 \times T \quad (11)$$

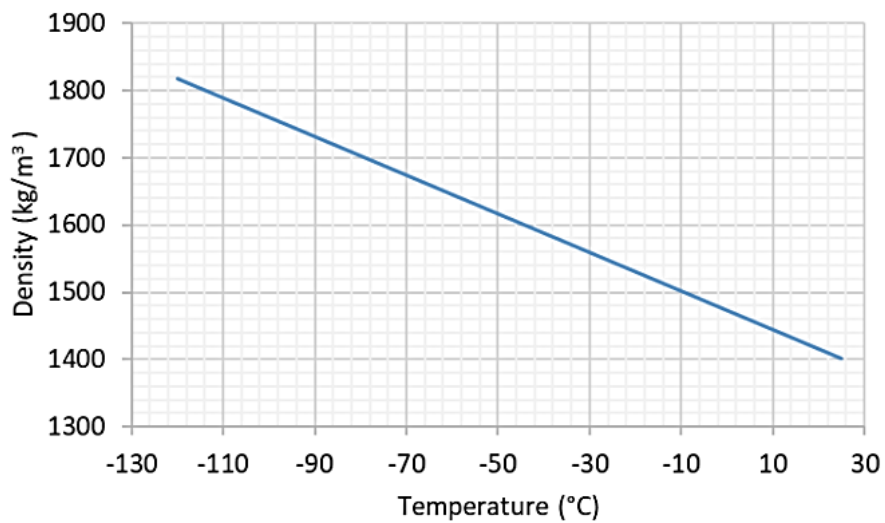


Figura 56 : Densità del Novec 7000

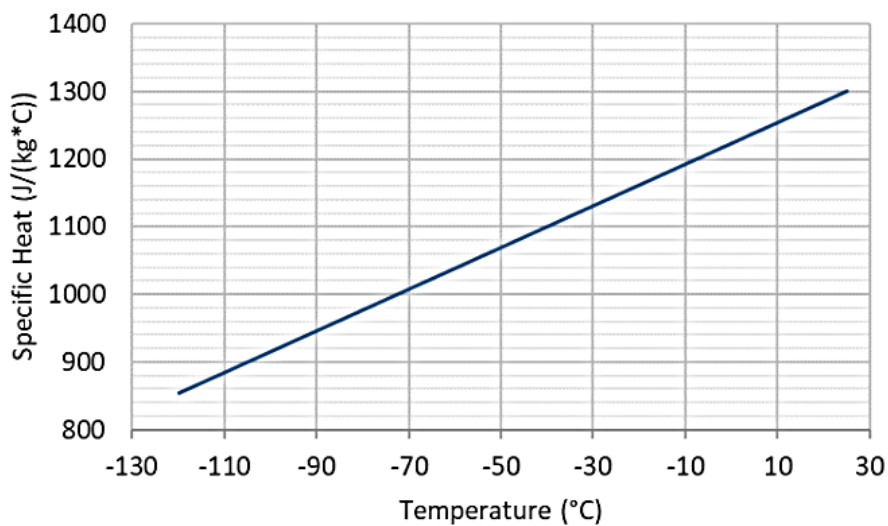


Figura 57 : Calore specifico del Novec 7000

Per quanto riguarda la densità (Kg/m^3), data dal rapporto tra la massa e il volume della sostanza, e il calore specifico (J/kgK), che esprime la quantità di calore da fornire per innalzare di $1\text{ }^\circ\text{C}$ la temperatura di un 1 Kg della sostanza, hanno andamenti opposti all'aumentare della temperatura di lavoro. Infatti, mentre il primo diminuisce di $80\text{ kg}/\text{m}^3$ andando da 0 a $30\text{ }^\circ\text{C}$, il secondo aumenta di $80\text{ J}/\text{kgK}$ nello stesso range.

Un termine fondamentale per l'analisi in campo termico, in condizioni non stazionarie, è la diffusività termica (m^2/s), ottenuta dal rapporto della conducibilità termica con il prodotto di densità e calore specifico. Si riporta di seguito l'espressione algebrica:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (12)$$

È fondamentale che il prodotto presenta al denominatore, ovvero la capacità termica, non sia troppo elevata affinché il calore possa essere trasmesso rapidamente.

Se si considerano i valori di conducibilità termica, densità e calore specifico del Novec 7000 ad una temperatura tra i 25°C e i 30°C (cioè il range mantenuto durante le prove), si ottiene un valore di diffusività di $4,12 \cdot 10^{-8} m^2/s$, mentre per l'acqua si ha $1,5 \cdot 10^{-7} m^2/s$, e quindi di un ordine di grandezza superiore. L'aria, invece, presenta una diffusività molto più bassa ($2 \cdot 10^{-5} m^2/s$) dovuta alla sua densità di tre ordini di grandezza inferiore rispetto ai primi due elementi.

Tali valori suggeriscono, dunque, che in condizioni non stazionarie come quelle sperimentali, in cui il calore generato dalla batteria varia con il tempo, il Novec 7000 tende a non diffondere rapidamente il calore al suo interno, ma piuttosto ad immagazzinarlo.

APPENDICE C : Grafici prove sperimentali

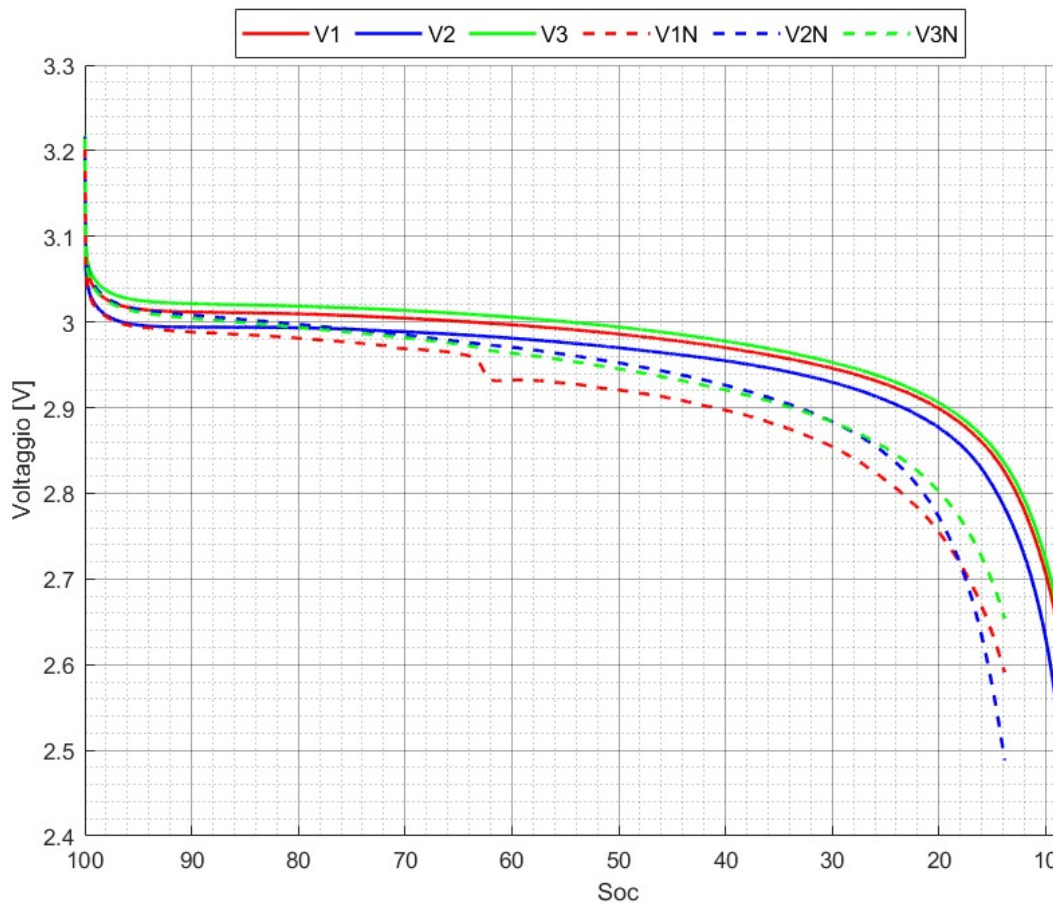


Figura 58 : Andamento voltaggio delle singole celle 3C

Dall'andamento dei voltaggi dei singoli moduli in parallelo si osserva che è sempre la cella centrale (linea blu) ad arrivare al voltaggio minimo di 2,5 V e, quindi, ad interrompere la scarica.

Nonostante ciò, gli andamenti dei singoli paralleli risultano simili tra loro durante tutta la scarica.

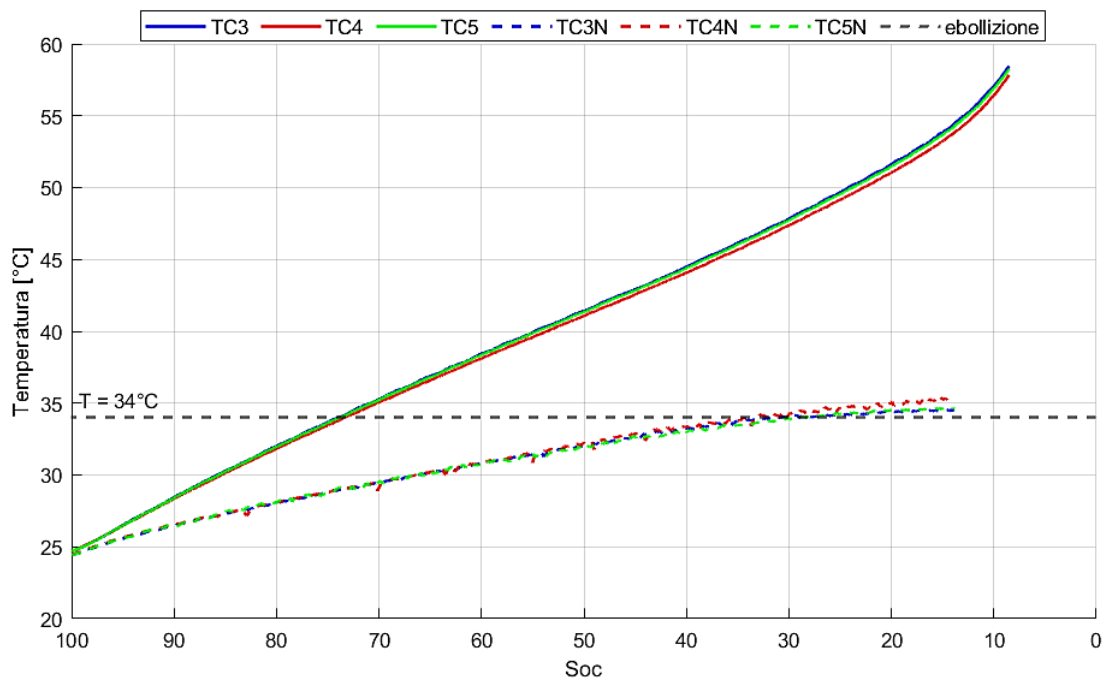


Figura 59 : Andamento della temperatura lungo una stessa batteria in 3C

Dall'analisi sui tre lati di una stessa batteria non è stato possibile riscontrare alcuna differenza significativa. Si può quindi affermare che non è presente nessuna disuniformità termica di grande intensità sulla batteria.

Si riportano di seguito gli andamenti di tutte le sette termocoppie presenti sulle batterie, al fine di mostrare come con l'utilizzo del Novec la distribuzione termica risulti molto più omogenea nei diversi punti del bacco batterie. Inoltre, vengono poi riportati gli andamenti ai diversi C-rate in modo da illustrare le differenze termiche.

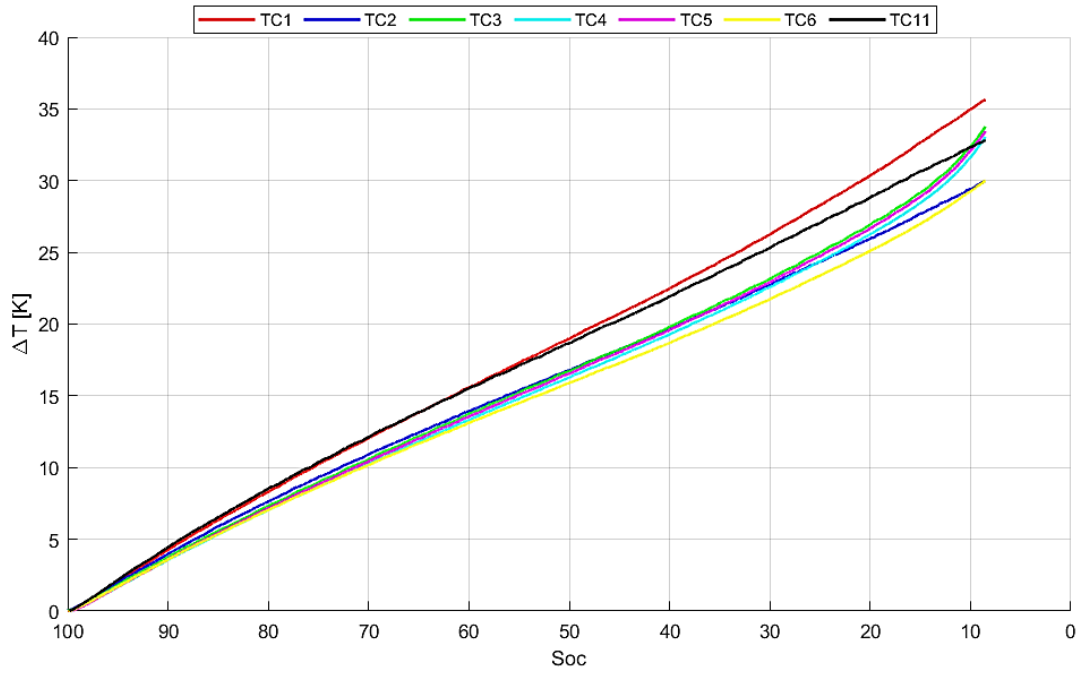


Figura 60 : Andamento di tutte le TC sulle batterie in aria (3C)

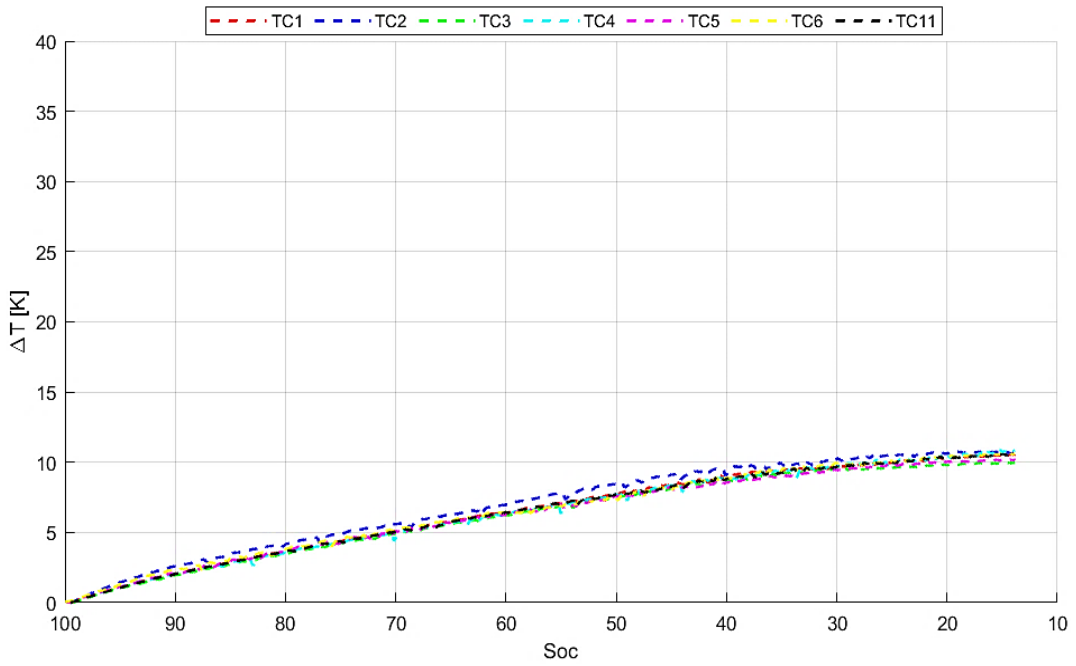


Figura 61 : Andamento di tutte le TC sulle batterie Novec (3C)

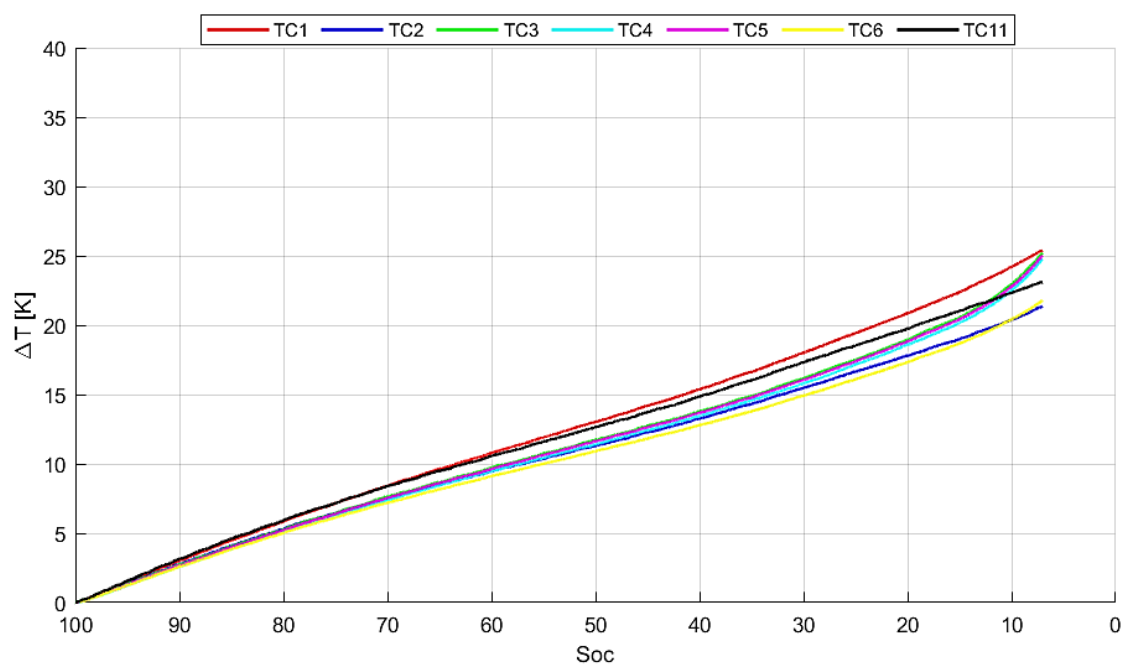


Figura 62 : Andamento di tutte le TC sulle batterie in aria (2C)

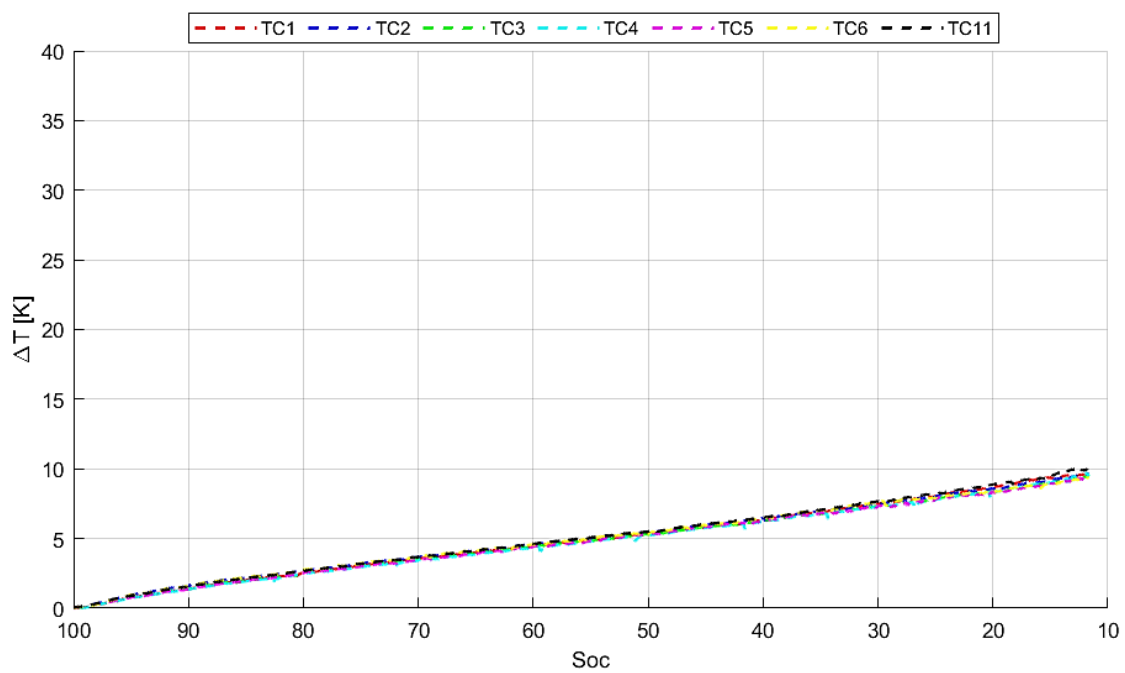


Figura 63 : Andamento di tutte le TC sulle batterie Novec (2C)

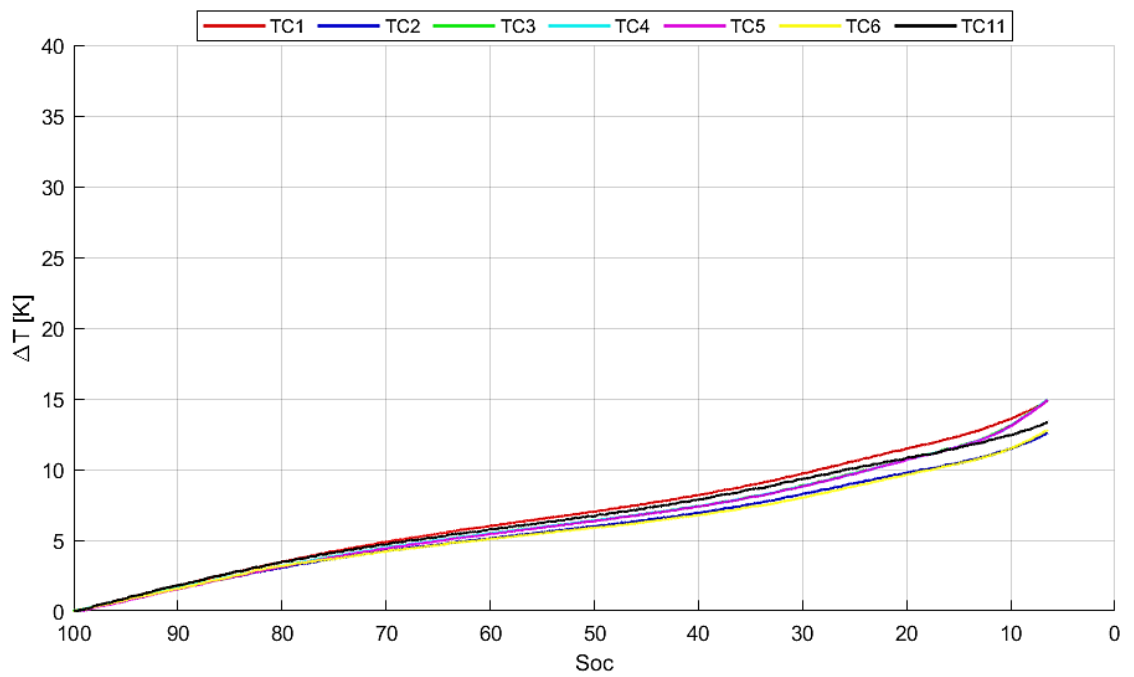


Figura 64 : Andamento di tutte le TC sulle batterie in aria (1C)

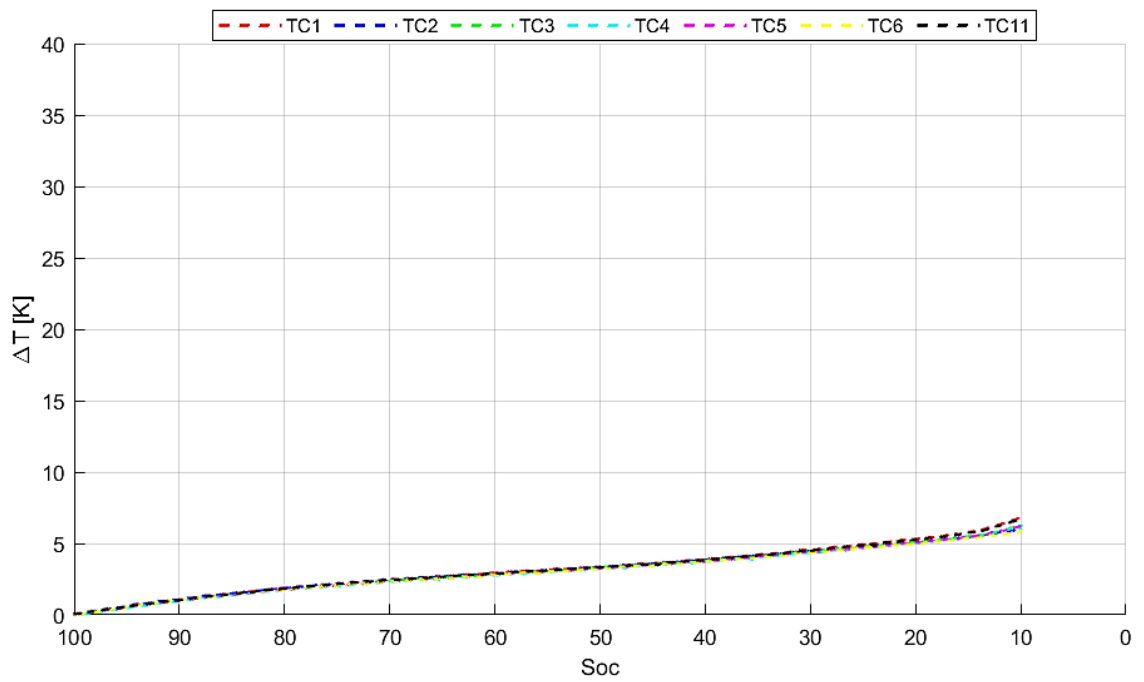


Figura 65 : Andamento di tutte le TC sulle batterie Novec (1C)

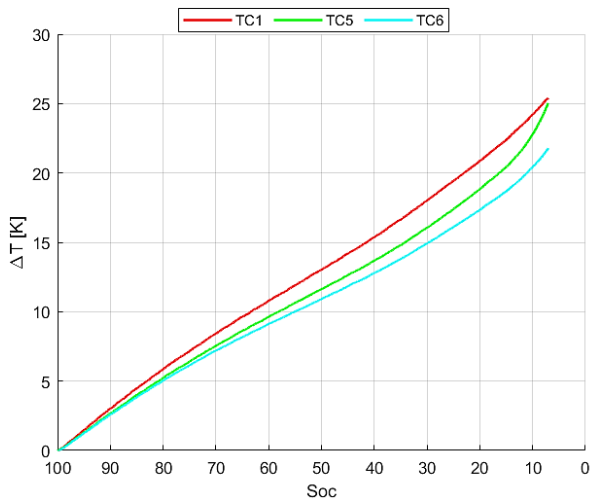


Figura 66 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (aria 2C)

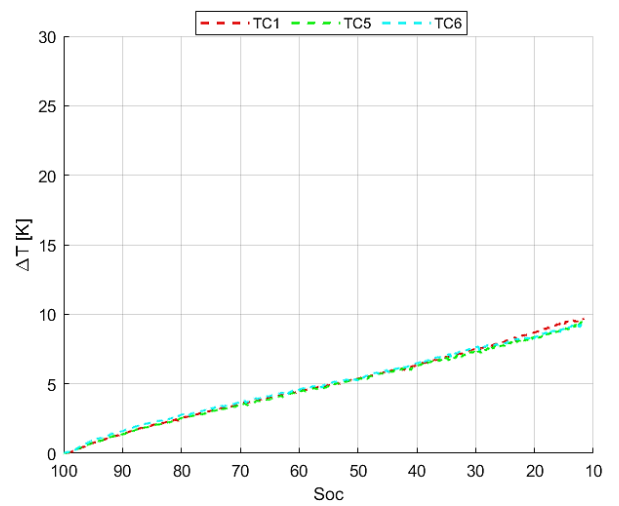


Figura 67 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (Novec 2C)

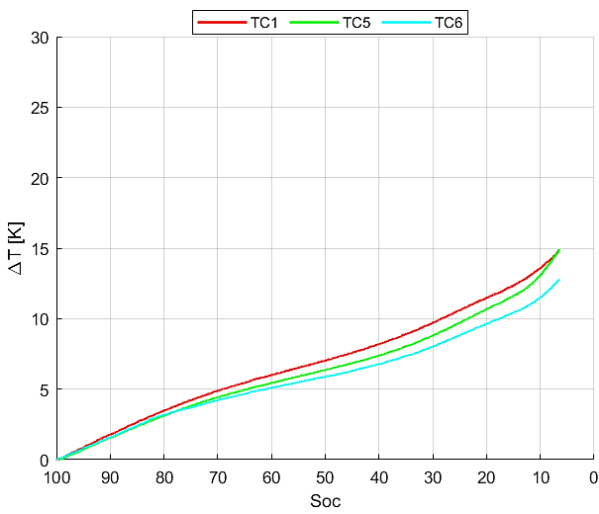


Figura 68 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (aria 1C)

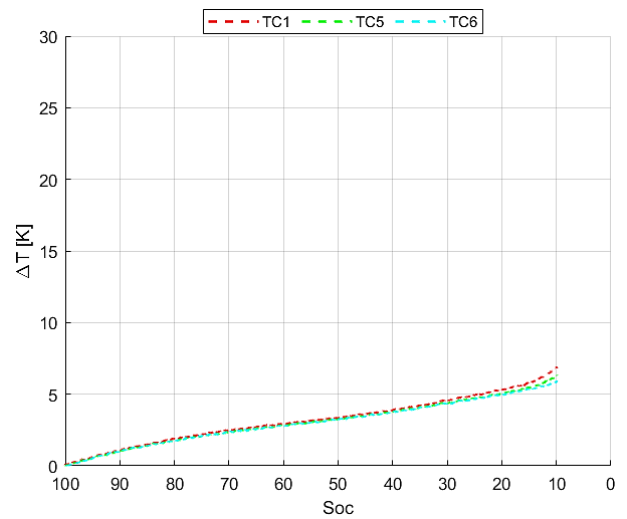


Figura 69 : Andamento TC1, TC5 e TC5 (Novec 1C)

APPENDICE D: Immagini delle prove termografiche

Si riportano di seguito le immagini termografiche acquisite a quattro intervalli di SoC e ai diversi C-rate. Per rendere più evidenti i fenomeni di riscaldamento nelle diverse prove è stata utilizzata sempre la stessa palette di colori con scale, però, diverse. Si riportano, quindi, i valori di minimo e massimo delle scale per i diversi C-rate e nei due casi aria – Novec (Tabella 8 e Tabella 9).

[°C]	Minimo	Massimo
1 C	0	7
2 C	0	10
3 C	0	12

Tabella 8 : Estremi della scala nel caso aria

[°C]	Minimo	Massimo
1 C	0	5
2 C	0	7
3 C	0	10

Tabella 9 : Estremi della scala nel caso Novec

Come è evidente osservando gli estremi delle scale ai diversi C-rate di scarica, nel caso Novec si ha un riscaldamento minore della superficie del contenitore.

Di seguito vengono riportate le immagini termografiche, queste presentano una linea che corrisponde al luogo dei punti dove è stata valutata la temperatura tramite Matlab.

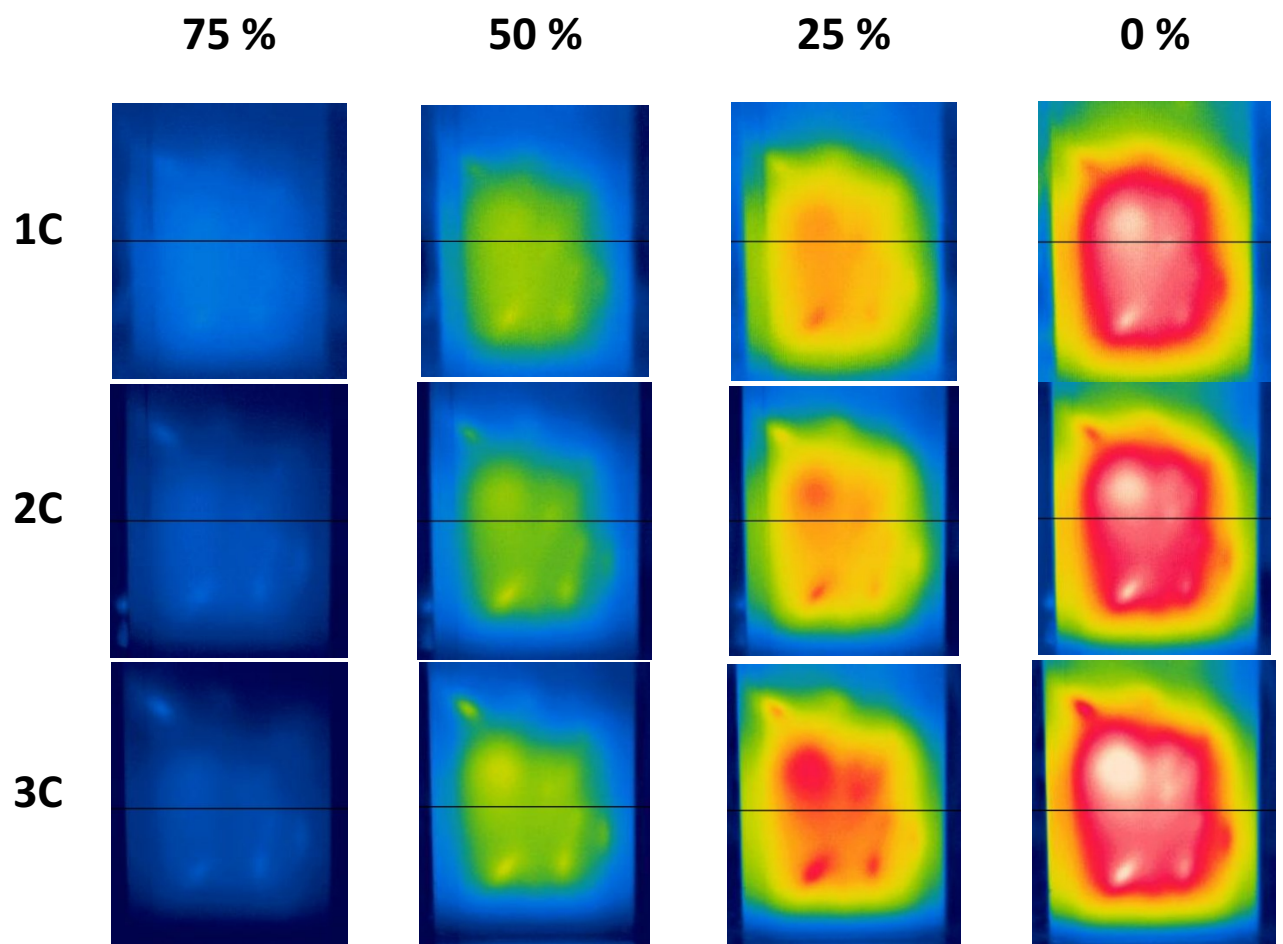


Figura 70 : Confronto immagini termografiche aria (1C, 2C, 3C)

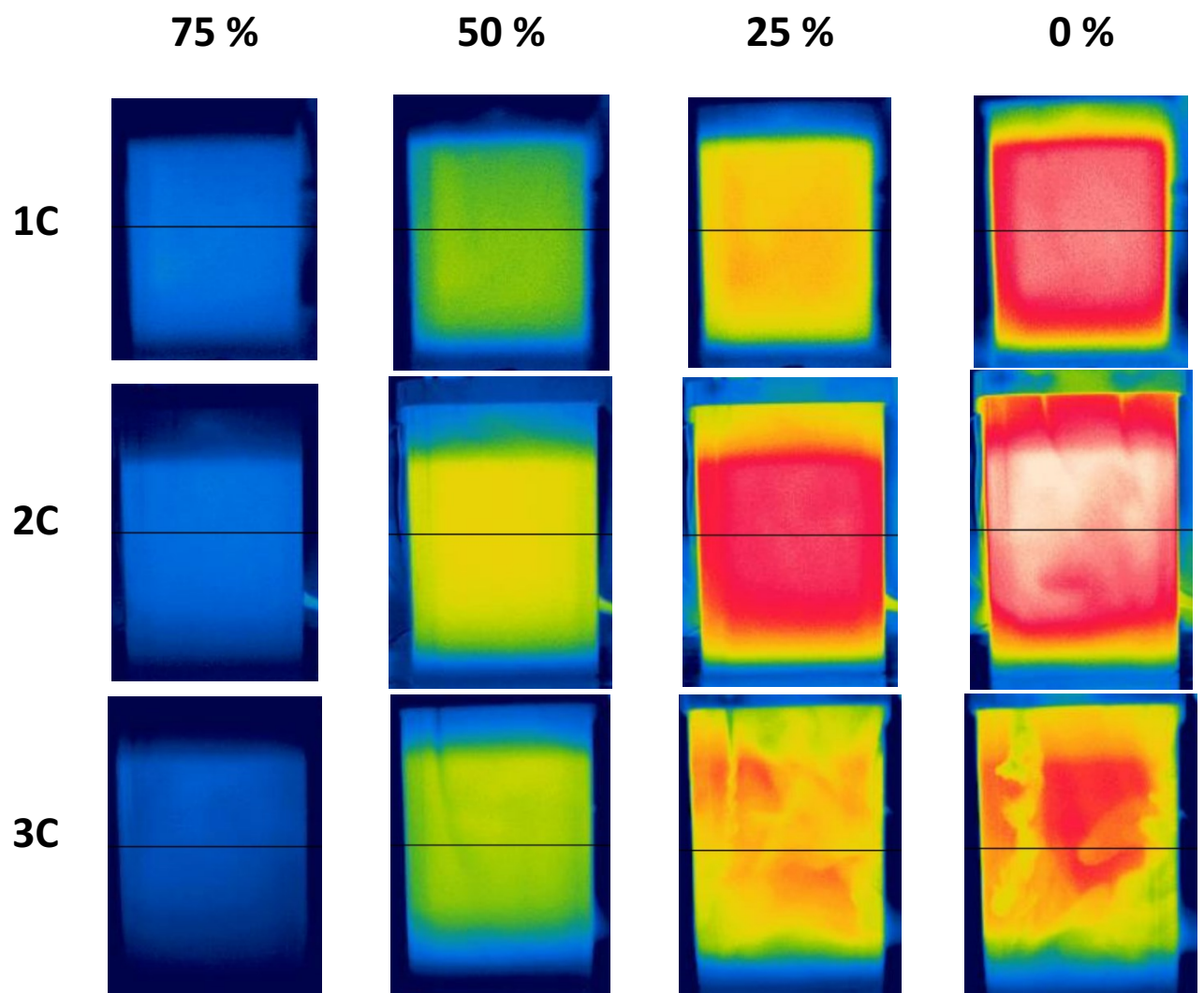


Figura 71 : Confronto immagini termografiche Novec (1C, 2C, 3C)

APPENDICE E: Dettagli componenti progettati

Si riportano i disegni quotati dei due alberi necessari al collegamento motore Bafang – e-bike. L'albero lato bicicletta presenta una filettatura M15 (passo 1 mm), sull'estremità di diametro minore, non rappresentata in figura.

Entrambe le estremità di diametro 28 mm sono state dimensionate in modo tale da essere inserite nei due lati del giunto elastico (Figura 75) e hanno una scanalatura per la linguetta di fissaggio.

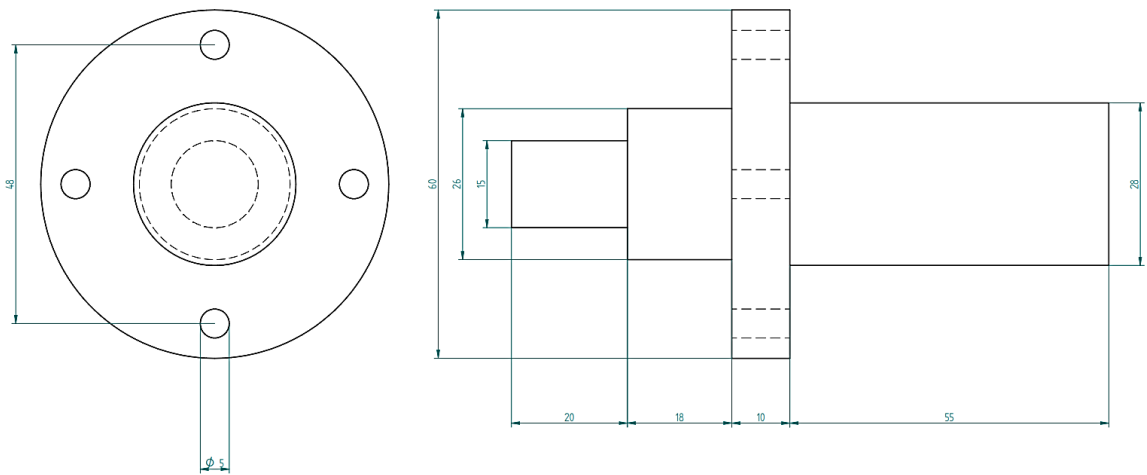


Figura 72 : Disegno quotato dell'albero lato bicicletta

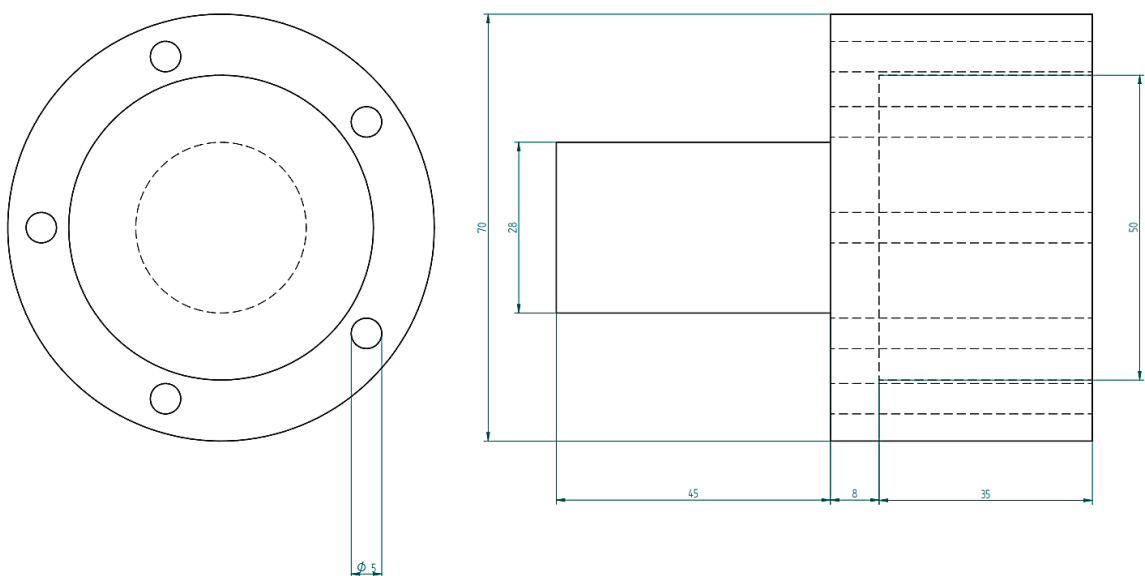


Figura 73 : Disegno quotato dell'albero lato ciclista



Figura 74 : Dettaglio albero lato ciclista



Figura 75 : Accoppiamento lato ciclista

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Stilo, Segura-Velandia, H. Lugo, P. P.Conway e A. A. West, «Electric bicycles, next generation low carbon transport systems: A survey,» *Elsevier*, vol. 10, 2021.
- [2] L. Giammichele, V. D'Alessandro, M. Falone e R. Ricci, «Thermal behaviour assessment and electrical characterisation of a cylindrical Lithium-ion battery using infrared thermography,» *Elsevier*, vol. 205, 2022.
- [3] L. Echeverría, J. I. Gimenez-Nadalb e J. A. Molinace, «Green mobility and well-being,» *Elsevier*, vol. 195, 2022.
- [4] «Commissione Europea,» Settembre 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_it.
- [5] (Eea) European Enviroment, «Health and environment, including air and noise pollution,» 2021.
- [6] R. Mahamud e C. Park, «Theory and Practices of Li-Ion Battery Thermal Management for Electric and Hybrid Electric Vehicles,» *MDPI*, 2022.
- [7] L. Raijmakers, D. Danilov, R.-A. Eichel e P. Notten, «A review on various temperature-indication methods for Li-ion batteries».
- [8] D. Bernardi, E. Pawlikowski e J. Newman, «Journal of the electrochemical society».
- [9] M.Doyle e T. F. J. N., «Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell,» *Journal of Electrochemical Society*, vol. 6, n. 140.
- [10] M. Pigłowska, B. Kurc, M. Galiński, P. Fuć e M. Kamińska, «Challenges for Safe Electrolytes Applied in Lithium-Ion Cells,» *MDPI*, 2021.

- [11] N. Zheng, C. Zhang, R. Fan e Z. Sun, «Melamine foam-based shape-stable phase change composites enhanced by aluminum nitride for thermal management of lithium-ion batteries,» *Elsevier*, vol. 52, 2022.
- [12] Ortega e Iñigo, «Battery thermal management systems (BTMS) for mobility applications,» 2021.
- [13] C. Zhao, B. Zhang, Y. Zheng, S. Huang, T. Yan e X. Liu, «Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles,» *MDPI*, 2020.
- [14] P. Keblinski, J. A. Eastman e D. G. Cahill, «Nanofluids for thermal transport,» *Materialstoday*.
- [15] S. S. Katoch e M. Eswaramoorthy, «A Detailed Review on Electric Vehicles Battery Thermal Management System,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020.
- [16] Weng, Ying-Che, Cho, Hung-Pin, Chang, Chih-Chung e Sih-LiChen, «Heat pipe with PCM for electronic cooling,» *Elsevier*, vol. 88, 2011.
- [17] 3M™ Novec™, *3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid*, 2021.
- [18] D. Karimi, H. Behi e J. V. M. a. M. Berecibar, «An Experimental Study on Thermal Performance of Graphite-Based Phase-Change Materials for High-Power Batteries,» *MDPI*, 2022.
- [19] ENERpower, «Product specifications of HTCFR18650 LiFePo4 Battery».
- [20] UNI CEI ENV 13005, «Guida all'espressione dell'incertezza di misura,» 2000.
- [21] FLIR SYSTEMS, «ThermaCAM SC3000 data sheet».
- [22] L. Li e B. S. Baum, «Electromechanical delay estimated by using electromyography,» *Elsevier*, 2003.

RINGRAZIAMENTI

Alla conclusione di questo percorso un sentito ringraziamento va al Prof. Ricci che mi ha accompagnato in questi anni ed è stato capace di trasmettermi sia le conoscenze che la sua infinita passione, fornendomi continui stimoli a migliorare. Lo ringrazio, inoltre, per avermi affidato a Luca, che con la sua pazienza e la sua perspicacia, mi ha guidato ed aiutato durante questo duro lavoro di tesi. Un ringraziamento va anche a tutto il gruppo di ricerca con i quali ho condiviso con piacere molte delle giornate di questi ultimi mesi.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, per avermi dato la possibilità di inseguire il mio sogno e per avermi supportato e sopportato ogni giorno di questo lungo percorso di studi. Ogni cosa che faccio, nel mio piccolo, è per ripagare l'amore e i sacrifici che hanno fatto per me.

Ringrazio poi Nicola, la mia metà, che mi è sempre stato vicino e da sei anni rende tutto più facile e leggero.

Un grazie va anche ai miei amici con i quali ho condiviso gioie e ansie di questo percorso e sui quali so che potrò sempre contare.

Infine, desidero ringraziare quella ragazza insicura e confusionaria che ero quando ho varcato per la prima volta le porte di Ingegneria. È solo grazie alla sua determinazione instancabile e ai suoi sacrifici se sono diventata la donna sicura e ambiziosa di oggi.