



**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 NUMERICO DI UN ACCUMULATORE  
AGLI IONI DI LITIO PER BICI A PEDALATA ASSISTITA**

**THERMAL MANAGEMENT OF ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS FOR  
SUSTAINABLE MOBILITY: NUMERICAL MODEL OF A LITHIUM-ION  
ACCUMULATOR FOR PEDELEC**

Relatore:

**Prof. Renato Ricci**

Tesi di Laurea di:

**Gianluca Minardi**

Correlatore:

**Ing. Luca Giammichele**

**A.A. 2021/2022**

# SOMMARIO

---

INTRODUZIONE .....	3
1 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO PER LA MOBILITÀ ELETTRICA .....	6
1.1 BICICLETTE ELETTRICHE.....	8
1.1.1 MOTORI PER BICICLETTE ELETTRICHE .....	12
1.1.2 SENSORI PRESENTI IN UNA BICICLETTA ELETTRICA.....	14
1.2 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO .....	17
1.3 SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER BATTERIE AGLI IONI DI LITIO .....	25
1.3.1 RAFFREDDAMENTO A FLUIDO.....	26
1.3.2 RAFFREDDAMENTO TRAMITE PCM.....	27
2 ALLESTIMENTO DEL BANCO PER LA SPERIMENTAZIONE .....	28
2.1 COMPONENTI CHE COSTITUISCONO IL BANCO .....	29
2.2 SENSORE DI VELOCITÀ.....	38
2.3 COLLEGAMENTO MECCANICO TRA IL MOTORE BAFANG E IL MOTORE BOSCH.....	41
2.4 CONTROLLO DEL MOTORE BAFANG .....	49
2.5 REALIZZAZIONE DEL PACCO BATTERIE PER LA MOUNTAIN BIKE ELETTRICA .....	52
2.6 PROGETTAZIONE DEL CONTENITORE PER IL PACCO BATTERIE.....	55
3 MODELLAZIONE NUMERICA DEL PACCO BATTERIE .....	59
3.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NEL SOFTWARE .....	62
4 RISULTATI NUMERICI.....	72
4.1 PROVE DI SCARICA COSTANTE .....	73
5 CONTROLLO TERMICO DELLA BATTERIA.....	90
5.1 IL NOVEC 7000.....	91
5.2 PROVE DI SCARICA COSTANTE .....	95
CONCLUSIONI .....	108
BIBLIOGRAFIA.....	111
RINGRAZIAMENTI.....	112

## INTRODUZIONE

---

Il settore dei trasporti sta attraversando una fase di transizione verso la mobilità elettrica, attraverso la sostituzione dei tradizionali veicoli con motore a combustione interna, a causa di vincoli sulle emissioni sempre più stringenti.

Le batterie agli ioni di litio sono ampiamente utilizzate come accumulatori di energia per veicoli elettrici e ibridi, per la loro elevata densità di potenza, fattore determinante nell'ambito della mobilità. La temperatura di funzionamento di tali batterie è un fattore cruciale per la loro durata di vita e il controllo della temperatura massima risulta fondamentale per la loro operatività in condizioni di sicurezza. Inoltre, un fattore determinante per il successo di un veicolo elettrico e su cui i produttori stanno investendo è rappresentato dalla velocità con cui le sue batterie possono essere caricate. Maggiore è tale velocità, maggiore è la sollecitazione termica a cui sono sottoposte. Per questi motivi, è fondamentale sviluppare un sistema di controllo termico del pacco batterie. Le soluzioni tecniche per il raffreddamento sono diverse, ma in questo lavoro ci si concentrerà sull'utilizzo di un fluido basso-bollente e dielettrico di produzione militare, il Novec 7000, a contatto con il pacco batterie.

Per quanto riguarda l'applicazione, ci si concentrerà sulle mountain bike elettriche ad alte prestazioni, per verificare se tale liquido è in grado di assorbire rapidamente i picchi di potenza termica generata dal pacco batterie, quando il motore richiede una corrente elevata per l'alta potenza che deve erogare, come nel caso di una ripida salita.

Questo lavoro di tesi è successivo ad uno già svolto in cui è stato analizzato lo sviluppo di un sistema di controllo termico per batterie agli ioni di litio basato sull'utilizzo del Novec 7000 [1]. Per fare questo, sono state eseguite prove sperimentali su una singola cella per studiarne l'andamento della temperatura, applicando cicli di carica e scarica. I risultati sperimentali ottenuti sono promettenti per ciò che riguarda la capacità del Novec 7000 di mantenere la temperatura della cella sempre all'interno del range per essa consigliato dal costruttore.

Pertanto, nella ricerca in cui si inserisce questo lavoro si vuole proseguire la sperimentazione già iniziata, passando dalla singola cella ad un intero pacco batterie, per verificare se i risultati sono gli stessi anche nel caso in cui il numero di celle sia maggiore di uno.

La prima parte del lavoro svolto riguarda l'allestimento di un banco per la sperimentazione di un pacco batterie, mentre in un secondo momento verrà eseguita una modellazione numerica di un accumulatore agli ioni di litio destinato ad alimentare una bici a pedalata assistita.

Nella prima fase, una mountain bike elettrica è stata posta su un rullo interattivo, con lo scopo di simulare i percorsi reali e poter svolgere le prove all'interno di un laboratorio. La mountain bike elettrica non viene alimentata dal pacco batterie di cui la stessa è equipaggiata, ma da un altro che può essere così caratterizzato sia da un punto di vista termico che elettrico. Per rendere la sperimentazione ripetibile, escludendo la variabilità di pedalata di una persona, è stato utilizzato un motore elettrico che mette in rotazione i pedali, con lo scopo di simulare un ciclista. Infine, è stato progettato un contenitore in alluminio per il nuovo pacco batterie e il suo fluido di raffreddamento.

Terminata la prima fase di allestimento del banco, è stata eseguita la modellazione numerica di un pacco batterie destinato ad alimentare bici a pedalata assistita. Per fare ciò, è stato necessario affidarsi alla potenza di calcolo di un PC, e in particolare ad un software. L'obiettivo del lavoro è quello di studiare il comportamento termico di pacchi batterie durante la fase di scarica, per verificare se un sistema di gestione termica basato sul raffreddamento diretto attraverso un liquido in cambiamento di fase è in grado di migliorarne il controllo termico. Verranno analizzati gli andamenti di temperatura, potenza termica generata e voltaggio del pacco batterie che il software genera nelle simulazioni eseguite, in aria e nel Novec 7000, per comprendere se i risultati ottenuti sono compatibili con la fisica del problema. Inoltre, i risultati ottenuti dalla modellazione verranno confrontati con quelli ottenuti da prove sperimentali eseguite sullo stesso pacco batterie, per validare il modello stesso.

Il Novec 7000 possiede ottime caratteristiche dielettriche, che dovrebbero permettergli di non influire sulle prestazioni elettriche del pacco batterie. Inoltre, grazie al cambiamento di fase, è in grado di assorbire i picchi di potenza termica generata, tipici dell'applicazione presa in considerazione.

# 1 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO PER LA MOBILITÀ ELETTRICA

---

L'inquinamento atmosferico uccide circa sette milioni di persone ogni anno in tutto il mondo [2]. A lanciare l'allarme è l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), che pone l'accento sulla qualità dell'aria, sottolineando come il 91% della popolazione viva in luoghi in cui le emissioni di anidride carbonica superano i limiti indicati. Il settore dei trasporti è responsabile del 30% circa delle emissioni di CO<sub>2</sub> in Europa e circa il 72% di queste sono prodotte dal trasporto su strada, che comprende bus, camion e automobili. Queste ultime rappresentano il mezzo più inquinante: da sole producono circa il 61% delle emissioni causate dall'intero trasporto stradale. Il contributo dei trasporti all'inquinamento è cresciuto negli ultimi anni, tranne durante il lockdown imposto dai vari Paesi per far fronte alla pandemia di COVID-19. Una tendenza che rende impossibile centrare l'obiettivo di fare dell'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050. Da qui la scelta di avviare un percorso definito per abbattere le emissioni di gas a effetto serra legate al settore dei trasporti, favorendo la sua transizione in chiave sostenibile.

L'ultima novità è un pacchetto di proposte messo a punto dalla Commissione europea per modernizzare il settore, in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo [3]. Il primo obiettivo della Commissione è ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> degli autoveicoli, del 50-55% entro il 2030, fino ad arrivare alla produzione di automobili ad emissioni zero entro il 2035. Allo stesso tempo, i Paesi membri dovranno installare stazioni di ricarica per auto elettriche ogni 60 chilometri.

Per ridurre entro il 2030 le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990 ed azzerarle totalmente entro il 2050, la Commissione ha fissato target più ambiziosi sulle energie rinnovabili, che dovranno ora raggiungere il 40% dei consumi finali entro il 2030, partendo dal 20% del 2019. Il nuovo target sostituisce l'obiettivo precedente del 32%. La proposta promuove l'utilizzo di combustibili rinnovabili nel settore dei trasporti.

Di conseguenza, una delle strategie per ridurre l'inquinamento atmosferico e le emissioni di gas serra è rappresentata dai veicoli elettrici. Molti Paesi hanno messo in atto incentivi per favorirne la diffusione, mentre i costruttori stanno moltiplicando gli sforzi per stare al passo di questa grande trasformazione nel settore dei trasporti.

## 1.1 BICICLETTE ELETTRICHE

Quando si parla di biciclette elettriche, chiamate anche e-bike, si intende una particolare tipologia di biciclette equipaggiate con un piccolo motore elettrico montato su un telaio resistente.

Le biciclette elettriche sono oggi un diffuso mezzo di trasporto, specialmente nell'ambiente urbano, anche grazie al miglioramento tecnologico avvenuto negli ultimi anni, in particolare delle sue componenti elettroniche.

Le biciclette elettriche non usano combustibili fossili e non rilasciano in ambiente emissioni tossiche. Hanno prezzi accessibili, un costo di gestione molto basso e l'acquisto è incentivato da bonus previsti dal Governo per la mobilità sostenibile. Inoltre, consentono di muoversi con molta agilità, liberando le strade dal problema del traffico e del parcheggio, e contribuendo a rendere le città più vivibili. Ciò le rende una valida alternativa, per brevi tragitti, all'utilizzo di un veicolo con motore a combustione.

Rispetto alle biciclette tradizionali, permettono di fare meno fatica, pur favorendo benessere e buona salute a coloro che le utilizzano, rendendole accessibili a molte più persone, anche in situazioni in cui l'uso di una bici "normale" sarebbe difficoltoso.

Il tipo di bicicletta con motore elettrico più diffuso è quella a pedalata assistita, detta anche pedelec. Vi sono installati un motore elettrico, una batteria al litio e una serie di sensori che rilevano la forza che viene impressa sui pedali e la trasmettono alla centralina che calibra l'assistenza da restituire al ciclista quando è in sella. Questa funzione è chiamata pedalata assistita. In questo modo il ciclista viene assistito durante lo sforzo, sebbene debba continuare a pedalare. La possibilità di aumentare o diminuire manualmente la potenza richiesta al motore è data da un piccolo computer posto sul manubrio.

Le batterie più recenti sono portatili e basta una normale presa di corrente per ricaricarle. La durata dipende dall'usura e dall'utilizzo che si fa, tuttavia in condizioni normali una carica dura almeno una cinquantina di chilometri.



La direttiva europea 2002/24/CE precisa la definizione di e-bike definendo le biciclette a pedalata assistita o EPAC (Electric Pedal Assisted Cycle) o pedelec mezzi *“dotati di un motore ausiliario elettrico avente potenza nominale continua massima di 0,25 kW la cui alimentazione è progressivamente ridotta e infine interrotta quando il veicolo raggiunge i 25 km/h o prima se il ciclista smette di pedalare”* [4]. Quindi non sono necessarie l’omologazione e la targa, secondo lo standard europeo EN 15194.

Le bici elettriche a funzionamento autonomo dispongono invece di un acceleratore che attiva il motore a prescindere dall’azione della pedalata e sviluppano una potenza superiore a 0,25 kW, raggiungendo una velocità massima di 45 km/h. Sono quindi equiparabili ai veicoli a motore, simili agli scooter; perciò, il Codice della Strada include questo tipo di mezzi nella categoria dei ciclomotori. Per utilizzare le bici elettriche a funzionamento autonomo bisogna perciò munirsi di casco, assicurazione RC moto, targa, patentino, documenti, specchietto retrovisore e fari di posizione; in caso contrario la circolazione è ammessa solo all’interno di aree private.

## **Mountain bike elettriche ad alte prestazioni**

Le biciclette elettriche non sono utilizzate solamente come mezzo di trasporto, ma anche per fare attività sportiva. Di recente, l'interesse per questi mezzi è stato tale da far nascere gare di mountain bike elettriche (e-MTB). Le gare si svolgono su percorsi estremi e impossibili da percorrere con la sola forza muscolare, prevalentemente sterrati, con tratti sconnessi, alternando salite a forte pendenza e discese. A queste competizioni sono ammesse biciclette a pedalata assistita che rispettano la Direttiva Europea 2002/24/CE, riportata in precedenza, che tutte le tipologie di biciclette rispettano, ma presentano caratteristiche tecniche che garantiscono prestazioni superiori, adatte a questa applicazione. Ne viene riportato un esempio in figura 1.1. Per il successo in queste gare, i fattori determinanti sono il motore che deve essere più potente, la batteria che deve essere capace di resistere per tutta la durata della gara anche nelle modalità di assistenza più alte e il peso che permette, oltre a rendere il mezzo più facile da guidare, di risparmiare batteria.



Figura 1.1 – Mountain bike elettrica ad alte prestazioni

### 1.1.1 MOTORI PER BICICLETTE ELETTRICHE

I motori elettrici impiegati sono generalmente a corrente continua a magneti permanenti, con o senza spazzole [5].

I motori con spazzole sono in grado di sviluppare una forte coppia a basse velocità di rotazione. Essi uniscono ad una relativa semplicità realizzativa, ottime doti di robustezza e durata. Il loro limite nasce proprio dalla presenza del commutatore a spazzole che richiede periodici interventi di manutenzione per l'usura e limita la velocità di rotazione.

I motori senza spazzole (brushless) prevedono un controllo effettuato elettronicamente mediante un banco di transistor di potenza. Ciò elimina una possibile causa di attriti con conseguente minor sviluppo di calore e consente anche di realizzare unità motrici più piccole a parità di potenza. Inoltre, l'assenza di spazzole permette velocità di rotazione più elevate, richiede minor manutenzione ed assicura in generale maggior vita al motore. Per contro richiede costi superiori per la maggior complessità costruttiva.

Una ulteriore discriminante è costituita dal posizionamento della motorizzazione che può essere sul mozzo della ruota anteriore, su quello della ruota posteriore, o in una posizione intermedia, in corrispondenza dei pedali [6].

- **Motori sul mozzo anteriore:** sono il sistema più semplice e meno costoso, in quanto facili da montare perché non interferiscono con i pedali o la catena. A fronte della semplicità, ci sono alcuni problemi: sono poco efficienti in caso di asfalto scivoloso, su sterrati o in salita, perché la ruota anteriore, con meno carico rispetto a quella posteriore, può slittare. Inoltre, aumentano il carico sulla forcella anteriore, che nel caso di montaggio su una bici non predisposta in partenza per accogliere il motore, deve essere sostituita con un modello più resistente

- Motori sul mozzo posteriore: con questo tipo di motori non ci sono rischi di slittamento della ruota. Sono in generale più difficili da montare in quanto potrebbero andare a interferire con il cambio. Hanno anche l'inconveniente di rendere più difficile togliere la ruota in caso di foratura, perché è necessario scollegare il cavo del motore. I motori al mozzo posteriore sono adatti per un uso urbano o trekking
- Motori montati centralmente: i motori montati centralmente, al livello dei pedali, agiscono direttamente sul sistema di trasmissione della bici. Sono più complicati da montare, e richiedono spesso un telaio apposito, ma hanno il vantaggio di non interferire con il montaggio e smontaggio delle ruote e soprattutto di agire direttamente sulla trasmissione, dando quindi una sensazione molto naturale. Essendo solidali al telaio, e non posizionati su masse sospese come i motori al mozzo, temono meno le buche, tanto da essere una scelta praticamente obbligata per le mountain bike elettriche.

### 1.1.2 SENSORI PRESENTI IN UNA BICICLETTA ELETTRICA

Avendo già parlato dei motori che caratterizzano i cicli a pedalata assistita, si procede con l'analisi dei vari sensori presenti in una e-bike [7].

- Sensore di posizione e velocità del motore: è necessario per attuare il controllo dello stesso, ed è un sensore ad effetto Hall. Tale sensore risulta essere composto da un elemento sensibile accoppiato ad un magnete, che rileva la variazione del flusso di campo magnetico quando un corpo in materiale ferromagnetico si avvicina e si allontana. Oltre a trovare applicazione nella misurazione della posizione del motore, vengono utilizzati anche per la misurazione della velocità dello stesso
- Sensore di velocità: è un sensore induttivo, necessario al funzionamento del motore, che aziona automaticamente il motore fornendo assistenza alla pedalata sin dall'inizio della guida. Inoltre, è un limitatore sotto forma di software che, quando la bicicletta elettrica raggiunge la velocità di 25 km/h, limite massimo imposto dalla legge, disattiva l'assistenza del motore, riducendone rapidamente la potenza. Il sensore di velocità è posto sul telaio, mentre un piccolo magnete è installato su uno dei raggi della ruota posteriore. Il calcolo della velocità della bici elettrica viene effettuato prendendo in considerazione la circonferenza della ruota grazie agli impulsi che il magnete inoltra al sensore stesso
- Sensore P. A. S. (Pedal Assist System): in una bicicletta a pedalata assistita, l'ausilio del motore elettrico viene progressivamente ridotto e infine interrotto quando viene raggiunta una velocità di 25 km/h o prima, se il ciclista smette di pedalare. Il sensore P. A. S. consiste nella presenza di un sensore magnetico che rileva semplicemente il movimento dei pedali, consentendo l'azionamento del

motore indipendentemente dalla pressione (e quindi dallo sforzo) che si esercita su di essi. Il funzionamento di tale sensore si basa sulla rotazione di un disco, la cosiddetta "ruota fonica", fissato in modo solidale con i pedali e recante lungo la circonferenza alcuni piccoli magneti orientati. Attraverso il movimento, tali magneti transitano davanti ad un sensore ad effetto Hall, il quale rileva la variazione di flusso del campo magnetico e, di conseguenza, genera un impulso che, inviato alla centralina elettronica, provvede all'avviamento del motore. Tale sensore presenta un certo ritardo alla partenza nell'avvio del motore, in quanto il segnale necessita solitamente di almeno un mezzo giro di pedali prima di essere attivato (allineamento del primo magnete con il sensore); la sensazione di guida, pertanto, risulta spesso poco omogenea. Infatti, mentre sui terreni pianeggianti la frequenza di pedalata consente di raggiungere con relativa facilità e senza sforzo la velocità voluta, tale svantaggio lo si incontra soprattutto nei tragitti dotati di una certa pendenza, dove la mancanza di un'assistenza più pronta può rivelarsi davvero un punto di debolezza. Occorre, comunque, aggiungere che più i magneti risultano numerosi e stretti tra loro, più reattivo sarà il mezzo elettrico

- Sensore di coppia: l'alternativa ai sensori P. A. S. è rappresentata dai sensori di coppia o di sforzo, i quali, tramite il ponte di Wheatstone, misurano la coppia esercitata sui pedali dall'utilizzatore e, in funzione di essa, con l'aiuto di specifici software, gestiscono l'erogazione della potenza e dell'assistenza del motore elettrico. Tale tipo di sensore contribuisce a determinare uno stile più naturale di pedalata: infatti, il motore si attiva immediatamente in partenza, non appena viene rilevata la pressione del piede sul pedale. Quando si pedala con poca intensità, anche il motore assiste poco; quando si pedala più intensamente (in salita, o perché si vuole aumentare la velocità) anche il motore fornisce maggiore potenza. Il sensore di coppia prevede la presenza di un estensimetro, formato da quattro griglie sensibili, orientate secondo le diagonali di un quadrato. Le quattro griglie, oltre ad essere posizionate sulla superficie del perno, ossia sull'asse che ruota all'interno della scatola del movimento e sul quale vengono calettate le

pedivelle, risultano elettricamente collegate in modo da costituire un ponte di Wheatstone; i quattro vertici, o nodi, del ponte sono portati poi all'esterno tramite quattro terminali. In seguito al peso esercitato sui pedali dall'utilizzatore, il perno si deforma localmente e, visto che il filo di ciascun estensimetro segue le deformazioni della superficie su cui è incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa, si hanno variazioni dimensionali che causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Quest'ultima, essendo connessa all'entità della deformazione, permettono di risalire, in primo luogo, al valore della forza applicata sulle pedivelle e, in secondo luogo, conoscendo la distanza del ponte di Wheatstone dall'estremità del perno, al valore della coppia applicata. Tale informazione viene infine inviata alla centralina elettronica di controllo, la quale provvede non solo all'avviamento del motore ma, in funzione dei valori riscontrati, identifica il livello di assistenza da erogare in proporzione allo sforzo esercitato

- Sensore di cut-off: permette il disinserimento immediato del motore, non appena si aziona la leva del freno a cui lo stesso è stato collegato. Tali dispositivi sono sostanzialmente dei microinterruttori, magnetici oppure meccanici, molto importanti, in quanto permettono di interrompere in maniera repentina l'erogazione di corrente al motore nel momento in cui vengono azionate le leve dei freni, senza aspettare l'input del sensore di pedalata. In tal modo si può essere sempre certi di non avere ritardi sull'interruzione della corrente, a vantaggio quindi della sicurezza.



## 1.2 BATTERIE AGLI IONI DI LITIO

Le batterie agli ioni di litio rappresentano l'unica tipologia di accumulatore utilizzato negli attuali veicoli elettrici, per la loro alta energia specifica, l'elevato numero di cicli di vita e i brevi tempi di ricarica. Di seguito vengono riportate alcune delle principali caratteristiche che permettono di distinguere le diverse tipologie di batterie esistenti sul mercato:

- Tensione nominale [V]: dipende dalla composizione chimica
- Capacità [Ah]: è la corrente che in un'ora scarica completamente una cella inizialmente carica al 100%
- C-rate: è il rapporto con il quale la batteria può essere scaricata rispetto alla sua capacità massima [1/h]. Ad esempio, una batteria con una capacità di 20 Ah e un C-rate di 5C ammetterà una corrente di scarica di 100 A per 12 minuti
- S-number: rappresenta il numero di celle collegate in serie. Moltiplicato per la tensione di cella fornisce il voltaggio totale del sistema
- Cicli di vita: è il numero di cicli di scarica e ricarica completi che la batteria può tollerare, mantenendo inalterate le sue prestazioni
- Self-Discharge: è il tasso di auto-scarica della batteria in condizioni di riposo
- SOC: è l'abbreviazione di State of Charge (SoC), e rappresenta lo stato di carica della batteria.

Una cella è composta da un elettrodo positivo (catodo) e da uno negativo (anodo), divisi da un separatore e da un elettrolita [8]. Al catodo avviene la reazione di riduzione, all'anodo avviene invece la reazione di ossidazione. Quando la batteria è collegata ad un carico, cioè in fase di scarica, gli ioni di litio positivi si muovono verso il catodo attraversando l'elettrolita. Il catodo, dopo aver accumulato al suo interno gli ioni di litio, diventa carico positivamente rispetto all'anodo attirando gli elettroni attraverso il circuito elettrico. Il contrario avviene in fase di carica della batteria. Il principio di funzionamento è riportato in figura 1.2.

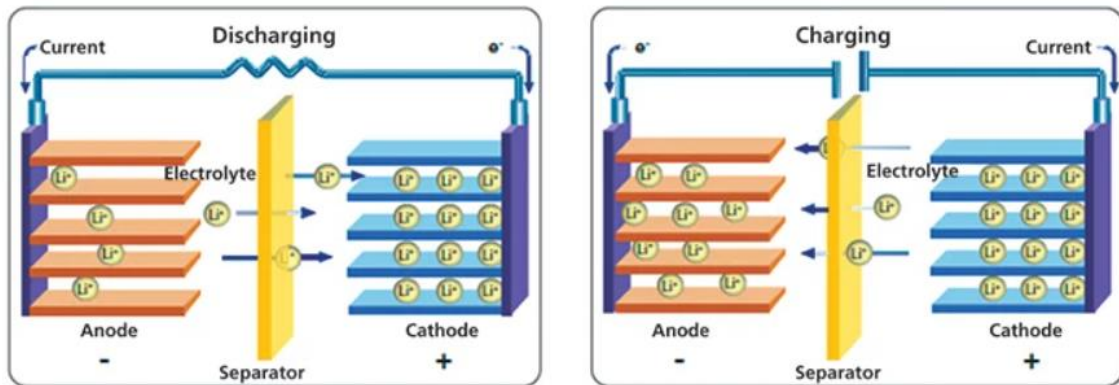


Figura 1.2 – Schema di funzionamento di una cella agli ioni di litio

Il catodo è composto da un materiale che dipende dalla tipologia di cella, mentre nell'anodo si trova sempre polvere di grafite. L'elettrolita è un insieme di sali di litio e solventi organici, fondamentali per incrementare la mobilità degli ioni di litio. Il separatore è un componente di sicurezza e ha la funzione di evitare il contatto, e quindi il cortocircuito tra catodo e anodo, e allo stesso tempo deve essere permeabile agli ioni di litio. Il separatore svolge un ruolo fondamentale nel caso in cui la temperatura delle celle cominciasse a salire in modo pericoloso, nel caso di fuga termica o thermal runaway. Esso, infatti, si fonde bloccando il flusso di ioni, questo causa il danneggiamento irreparabile della cella ma evita l'innesco di un principio d'incendio.

Le batterie Li-ion sono prodotte principalmente in due formati: cilindriche o a pouch. Nella configurazione a pouch il catodo, l'anodo e il separatore sono racchiusi in film laminato che ha la funzione di proteggere la cella. Mentre, nella configurazione cilindrica, i vari elementi sono arrotolati e sigillati in un contenitore metallico.

Le specifiche nominali di un pacco batterie non dipendono solamente dal tipo di celle utilizzate, ma anche da come esse sono collegate tra di loro. Infatti, in base al tipo di collegamento, se in serie o in parallelo, si ottiene un aumento della tensione o della capacità. In figura 1.3 è riportato un esempio di collegamento.

- Connessione in parallelo: si ottiene collegando terminali con la stessa polarità. Permette di aumentare la capacità del sistema e la corrente erogata
- Connessione in serie: si ottiene collegando i terminali positivi e negativi di una o più celle. Viene utilizzata per incrementare la tensione nominale del pacco.

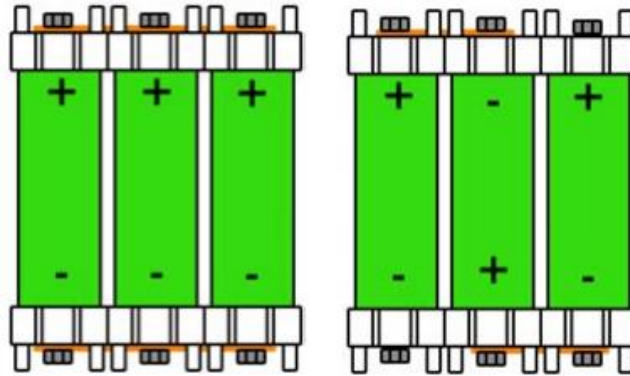


Figura 1.3 – Configurazione celle in parallelo (a sinistra) e in serie (a destra)

Per ottenere gruppi di potenza per la trazione elettrica, le singole celle vengono collegate in serie andando a costruire un modulo a voltaggio maggiore rispetto a quello del singolo elemento. Il modulo ospita anche il BMS (Battery Management System) che gestisce il bilanciamento della scarica delle celle. Successivamente, più moduli vengono collegati in serie/parallelo per realizzare il pacco batterie vero e proprio, aumentando ulteriormente la tensione e la corrente massima erogabile dal sistema.

Le correnti richieste dal motore sono molte elevate. Per questo, è fondamentale dimensionare correttamente gli elettrodi delle celle: elettrodi sottili garantiscono una risposta pronta alla variazione di carico, ma non permettono il passaggio di correnti elevate, viceversa elettrodi di dimensioni maggiori risentono di un certo ritardo nella risposta in transitorio ma garantiscono l'erogazione di correnti ad alto amperaggio.

Le batterie agli ioni di litio presentano i seguenti vantaggi: alta capacità specifica, cicli di vita molto alti (>1000), non hanno necessità di effettuare scariche complete dopo un certo periodo, tassi di ricarica anche molto elevati, e quindi tempi di ricarica brevi, basso tasso di autoscarica (5% in 24 ore), alta tensione nominale. Invece, tra gli svantaggi: importanti fenomeni di riscaldamento in carica e scarica profonda, prestazioni che

degradano rapidamente alle alte e basse temperature, devono essere conservate non completamente cariche.

Le più comuni batterie agli ioni di litio utilizzate sono:

- LCO: Litio-Cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ )
- LMO: Litio-Manganese ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )
- MNC: Litio-Nickel-Manganese ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ )
- LFP: Litio-Ferro-Fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ )
- LTO: Litio-Titanato ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ )

Nella seguente tabella, vengono riportate le loro principali caratteristiche.

<b>Tipologia</b>	<b>LCO</b>	<b>LMO</b>	<b>NMC</b>	<b>LPF</b>	<b>LTO</b>
<b>Tensione nominale [V]</b>	3.6	3.7	3.6	3.3	2.4
<b>Tensione carica completa [V]</b>	4.2	4.2	4.2	3.65	2.85
<b>Tensione scarica completa [V]</b>	3	3	3	2.5-2	1.8
<b>Energia specifica [Wh/Kg]</b>	150-200	100-150	150-220	90-120	70-80
<b>Rate di ricarica</b>	0.7-1C	0.7-1C	0.7-1C	1C	1-5C
<b>Cicli di vita</b>	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	3000-7000

Tabella 1 – Caratteristiche delle celle agli ioni di litio

La prima fase di progettazione di un impianto di raffreddamento per batterie consiste nella valutazione della potenza termica da dissipare, che rappresenta una delle problematiche maggiori. Per la sua valutazione, l'approccio più rigoroso è di tipo elettrochimico, ma richiede la conoscenza di una grande quantità di parametri relativi alla cella ed è per questo di difficile utilizzo.

L'approccio a parametri concentrati è, invece, più immediato e fornisce una buona approssimazione. La potenza termica generata da una batteria è data da un termine irreversibile e da uno reversibile:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{irr}} + \dot{Q}_{\text{rev}} = I(V - E_{\text{OCV}}) + I T \frac{\partial E_{\text{OCV}}}{\partial T}$$

Dove  $I$  è la corrente di scarica,  $V$  è il potenziale sotto carico,  $E_{\text{OCV}}$  è il potenziale a circuito aperto e  $T$  è la temperatura della batteria.

Il primo termine è sempre positivo e quantifica i fenomeni irreversibili che si generano all'interno della batteria durante il suo funzionamento, come le perdite dovute a resistenze interne.

Il secondo termine può essere sia positivo che negativo, a seconda se viene rilasciato o assorbito calore dalla batteria, cioè se il processo è esotermico o endotermico.

Come già accennato, in un veicolo elettrico è sempre presente il sistema di monitoraggio della carica della batteria, comunemente denominato Battery Management System o BMS. Il BMS gestisce l'intero array di celle al litio (singole celle o interi pacchi batterie), determinando un'area operativa sicura, ovvero un'area di sicurezza all'interno della quale il pacco batterie garantisce le migliori prestazioni tecniche ed energetiche. Il BMS è in pratica un sistema elettronico per il controllo completo di tutte le funzioni diagnostiche e di sicurezza per la gestione dell'alta tensione a bordo del veicolo e il bilanciamento della carica elettrica. Le grandi batterie agli ioni di litio sono formate da

centinaia o addirittura migliaia di singole celle che devono essere gestite con precisione. Le tensioni tra le celle devono essere attentamente monitorate ed equilibrate.

I sistemi di gestione delle batterie per autoveicoli devono essere in grado di soddisfare caratteristiche critiche come il monitoraggio della tensione, della temperatura e della corrente, lo stato di carica della batteria (SoC) e il bilanciamento delle celle.

In pratica, le funzioni principali di un sistema di gestione della batteria per veicoli elettrici possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Protezione della batteria per impedire operazioni al di fuori della sua area operativa sicura
- Monitoraggio della batteria stimando lo stato di carica (SoC) e di salute (SoH) durante le operazioni di carica e scarica
- Ottimizzazione della batteria grazie al bilanciamento delle celle che ne migliora la durata e la capacità, ottimizzando così l'autonomia di guida di veicoli elettrici.



### 1.3 SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER BATTERIE AGLI IONI DI LITIO

Come visto in precedenza, le batterie agli ioni di litio lavorano in intervalli di temperatura ben definiti, in quanto al di fuori di questi si innescano reazioni chimiche che possono causare problemi di sicurezza e diminuzione delle prestazioni operative. Inoltre, è necessario mantenere una variazione di temperatura contenuta (circa 5 °C) tra le diverse celle dello stesso modulo e anche tra moduli diversi di uno stesso sistema, per evitare diverse modalità di scarica che portano ad un peggioramento delle prestazioni dell'intero pacco batterie. Per questi motivi, è necessario un sistema di raffreddamento della batteria in modo da garantire le migliori condizioni di funzionamento. Tali sistemi possono essere classificati in base al tipo di materiale usato per raffreddare, che può essere un fluido o un PCM, ovvero phase change material.

### 1.3.1 RAFFREDDAMENTO A FLUIDO

Il fluido utilizzato può essere aria o un liquido refrigerante; le soluzioni adottate sono complessivamente simili nei due casi. Infatti, solitamente utilizzano una serpentina, canali o fessure, attraverso cui scorre il fluido.

I sistemi di raffreddamento che utilizzano l'aria sono i più usati, in quanto piuttosto semplici e dal costo contenuto. Il trasferimento di calore con l'aria è ottenuto facendo passare, naturalmente o forzatamente (con l'utilizzo di un ventilatore), l'aria attraverso i moduli. La convezione forzata garantisce una maggiore efficienza di raffreddamento. Esistono due metodi per far fluire l'aria all'interno di un pacco batterie [9]: in serie o in parallelo. Nel primo metodo, l'aria entra da un lato del pacco ed esce dal lato opposto. Si ha così che tutti i moduli sono attraversati dalla stessa quantità d'aria. Ciò implica che la temperatura dell'aria in ingresso al pacco batterie è minore di quella in uscita, e man mano che l'aria fluisce all'interno del pacco si riscalda sempre di più. Si avrà allora che la capacità di raffreddare i moduli sarà massima vicino all'entrata, mentre si ridurrà avvicinandosi all'uscita. Nel secondo metodo, la portata d'aria viene divisa in parti uguali e ogni parte di questa raffredda un modulo diverso. Rispetto al raffreddamento in serie, quello in parallelo è più efficace in quanto l'aria lambisce un singolo modulo e così si ottiene una distribuzione della temperatura più uniforme all'interno del pacco batterie.

Tuttavia, i liquidi refrigeranti hanno proprietà termodinamiche migliori rispetto all'aria, che può essere utilizzata solo nel caso di batterie che rilasciano basse quantità di calore. Gli impianti di raffreddamento a liquido prevedono il passaggio di un fluido termovettore (solitamente acqua e glicole) all'interno di canali che lambiscono le pareti dei moduli. Il circuito si completa con il passaggio del refrigerante in uno scambiatore aria-liquido posto nella parte anteriore del veicolo. Spesso il circuito di raffreddamento delle batterie è accoppiato a quello di condizionamento dell'aria dell'abitacolo.

### 1.3.2 RAFFREDDAMENTO TRAMITE PCM

I PCM (phase change materials) e i liquidi basso bollenti, attraverso il cambiamento di fase, sono in grado di assorbire i picchi di potenza termica.

I PCM a temperatura ambiente si presentano allo stato solido, per poi liquefare al crescere della temperatura, assorbendo calore per effettuare il cambiamento di fase. Allo stesso modo, quando la temperatura diminuisce, il materiale solidifica e cede calore. Pertanto, sono sistemi di raffreddamento passivi e devono essere abbinati ad un impianto di raffreddamento (generalmente a fluido), per poter dissipare il calore assorbito dalle celle. Inoltre, grazie all'estrema facilità di lavorazione di tali materiali, si garantisce un ottimo contatto fra le celle e il PCM, generando ampie superfici di scambio termico.

Il secondo sistema basato sul cambiamento di fase è rappresentato dai liquidi basso bollenti che, non appena raggiungono la temperatura di ebollizione, iniziano ad asportare calore. In letteratura, è possibile trovare informazioni sul Novec 7000, oggetto di questo lavoro di tesi, riguardo la sua capacità di asportare il calore, non appena inizia il cambiamento di fase. In particolare [10], posto a contatto diretto con una batteria agli ioni di litio, è stato in grado di mantenere, durante la fase di scarica, la temperatura più bassa rispetto a quella raggiunta, durante la stessa prova, eseguita in aria.

## 2 ALLESTIMENTO DEL BANCO PER LA SPERIMENTAZIONE

---

L'obiettivo della ricerca in cui si inserisce questo lavoro di tesi è quello di svolgere prove sperimentali su un intero pacco batterie, destinato ad alimentare una bici a pedalata assistita, in una reale condizione di utilizzo, per studiare un sistema di raffreddamento innovativo basato sul Novec 7000. Nel precedente lavoro già citato [1], le prove sono state svolte su una singola cella, attraverso l'utilizzo di un carico elettronico (per la scarica) e un caricatore.

Per la sperimentazione, è stato inizialmente pensato di acquistare solo il motore di una mountain bike elettrica, evitando di utilizzare altri carichi elettronici da mettere in parallelo a quelli già a disposizione, non sufficienti per passare da prove sulla singola cella a quelle sull'intero pacco batterie. Tuttavia, i principali costruttori di tali sistemi di propulsione non permettono di acquistare singolarmente tali componenti. Per questo, è stato reso di fatto obbligatorio l'acquisto di una mountain bike elettrica.

La bicicletta elettrica non viene alimentata dal pacco batterie di cui la stessa è equipaggiata, ma da un altro, appositamente realizzato con celle ENERpower, che può così essere caratterizzato sia da un punto di vista termico che elettrico. Per poter svolgere le prove all'interno del laboratorio, al posto della ruota posteriore è stato inserito un rullo interattivo, con lo scopo di simulare i percorsi reali. Per rendere la sperimentazione ripetibile, escludendo la variabilità di pedalata di una persona, è stato utilizzato un motore che permette di elettrificare biciclette tradizionali, per simulare un ciclista. Infine, è stato progettato un contenitore per il pacco batterie e il suo fluido di raffreddamento.

La fase iniziale di questo lavoro di tesi si è concentrata sull'allestimento del banco per la sperimentazione su un pacco batterie.

## 2.1 COMPONENTI CHE COSTITUISCONO IL BANCO

Di seguito viene riportata una descrizione di tutti gli elementi che costituiscono il banco per svolgere prove sperimentali su un pacco batterie.

### **TREK Powerfly 4 625 (2021-2022), taglia M**

È una mountain bike elettrica dell'azienda statunitense Trek Bicycle Corporation, nota semplicemente come Trek. Il telaio in alluminio viene estruso a freddo con spessori differenziati in più punti, e idroformato secondo sofisticati profili per la massima resistenza e il minimo peso. Il telaio racchiude una batteria Bosch PowerTube 625 da 625 Wh a lunga autonomia, facilmente removibile senza ricorrere ad alcun attrezzo, grazie al sistema RIB (Removable Integrated Battery). È dotata di una porta esterna per la ricarica, sia con la batteria montata sia con la batteria estratta dalla bici. Il motore Bosch Performance Line CX, con potenza e coppia rispettivamente di 250 W e 85 Nm, ha il corpo in magnesio, è piccolo e silenzioso ed è dotato di uno scudo protettivo che lo ripara da eventuali detriti. Il motore è molto efficiente e offre una buona autonomia con una singola carica della batteria. Sul manubrio, è presente il controller Bosch Purion, il quale attraverso diverse modalità, permette di impostare la quantità di assistenza che fornisce il motore. Ha sospensioni anteriori con bloccaggio e una trasmissione Shimano 1x10. La taglia M ha un peso di 23,37 kg.

## **Elite Direto XR-T (2021)**

È un rullo interattivo, prodotto da Elite, montato al posto della ruota posteriore della bicicletta, con lo scopo di simulare i percorsi reali all'interno del laboratorio. 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%. È un rullo interattivo che comunica con tanti software, tra cui My E-Training di Elite (disponibile gratuitamente per 12 mesi), via ANT+, FE-C e Bluetooth.

Basta impostare il percorso o programma di allenamento affinché il rullo vari in automatico la resistenza fornita alla pedalata. Il rullo trasmette in maniera immediata i dati di potenza, velocità e cadenza di pedalata, consentendo di replicare la pedalata su strada. La misurazione della cadenza avviene attraverso una tecnologia sensorless, ovvero senza sensori da applicare sulla bici, ed è basata su una sofisticata analisi della potenza erogata misurata dal misuratore di potenza integrato OTS.



Figura 2.1 – TREK Powerfly 4 625 montata su Elite Direto XR-T

Per gestire e impostare il rullo interattivo, viene utilizzata l'applicazione My E-Training, sviluppata da Elite [11]. È possibile replicare l'allenamento su strada o creare sessioni di allenamento personalizzate. L'applicazione consente di disporre di parametri scientifici, univoci e affidabili, visualizzabili direttamente su smartphone o PC, collegati wireless tramite protocollo ANT+™ o Bluetooth Smart.

Per quanto riguarda l'allenamento, è possibile impostare diversi programmi di allenamento, riportati in seguito.

- potenza – distanza
- potenza – tempo
- altimetria – distanza
- pendenza – distanza
- pendenza – tempo
- FTP – tempo
- allenamento libero
- allenamenti a livelli.

All'interno di ciascun programma, per creare un allenamento è sufficiente inserire all'interno di un editor grafico un certo numero di segmenti (singoli, crescenti, decrescenti, ripetuti), ciascuno dei quali è completamente modificabile impostando la sua altezza e larghezza a cui corrispondono le grandezze del programma scelto.



Utilizzando le mappe di Google, è possibile creare percorsi personalizzati in qualsiasi parte del mondo, e il rullo modifica la resistenza in funzione della posizione del ciclista. Il percorso può essere disegnato su Google Maps, importato con tracce GPS o registrato tramite app su smartphone durante un'uscita in bici. In alternativa, è possibile allenarsi su percorsi acquistabili all'interno dell'applicazione o condivisi da altri utenti.

L'applicazione consente di eseguire un test FTP (Functional Threshold Power). La FTP è la potenza massima espressa in Watt che il ciclista può raggiungere e mantenere per un'ora di allenamento; è il parametro più oggettivo per pianificare gli allenamenti.

Inoltre, il Training Test è un vero e proprio allenatore virtuale che permette di creare un programma di allenamento altamente personalizzato. Per valutare correttamente le capacità del ciclista, il software fa eseguire un test incrementale, generando un piano di allenamento di quattro settimane cucito su misura del ciclista. I segmenti dei vari programmi sono basati sui dati di potenza, che vanno a determinare automaticamente lo sforzo che il ciclista deve compiere per ogni segmento.

Durante ogni allenamento, il software grafica gli andamenti di velocità, potenza e cadenza in funzione del tempo, oltre a fornire direttamente i rispettivi valori medi e massimi, e anche la durata dell'allenamento e la distanza percorsa. Tali valori, acquisiti con una frequenza di 1 Hz, possono essere esportati nelle seguenti modalità: in CSV, in TCX, in FIT, upload diretto su Stava, upload diretto su MapMyRide.

## **BOSCH Nyon**

È stato scelto di sostituire il controller Bosch Purior, già installato sulla bicicletta elettrica acquistata, con il Bosch Nyon in quanto offre una funzionalità aggiuntiva: oltre alle modalità già presenti, è possibile aggiungere fino a quattro modalità, ciascuna della quali può essere modificata dall'utente. In particolare, può essere impostata, in funzione della velocità, da 0 fino alla velocità massima di 25 km/h, la percentuale di supporto del motore. Inoltre, permette di esportare diversi parametri registrati durante l'attività. Ha un display da 3,2 pollici su cui, attraverso schermate personalizzabili, vengono riportate informazioni come potenza, distinguendo tra quella del motore elettrico e quella del ciclista, e cadenza di pedalata.

## **Motore Bafang BBS02B 36 V 500 W**

È un motore brushless, contenuto in un kit di elettrificazione di biciclette tradizionali, da collegare alla e-bike, per simulare un ciclista. La tipologia è BBS02B motore centrale, con tensione e potenza nominale rispettivamente di 36 V e 500 W, la coppia massima è 100 Nm e il peso è di 4,3 kg. Per eseguire i collegamenti con l'ESC, è stato rimosso il coperchio di protezione posteriore.

## **Hailong Downtube Battery**

All'interno dello stesso kit di elettrificazione di una bicicletta tradizionale, viene fornita una batteria Hailong Downtube. Questa viene utilizzata per alimentare il motore Bafang attraverso l'ESC. Tensione e capacità sono 36 V e 15.6 Ah. Le dimensioni sono 91 x 366 x 111 millimetri; il peso è 2,46 kg.



Figura 2.2 – Hailong Downtube Battery

### **FLYFUN 130A HV OPTO V5**

È il controllo elettronico della velocità o ESC (Electronic speed control in inglese), cioè una scheda elettronica che controlla e regola la velocità del motore Bafang. Ha cinque cavi 10AWG, un rosso e un nero per l'alimentazione, e tre neri per il collegamento al Bafang. Viene alimentato dalla Hailong Downtube Battery, ed è collegato al motore Bafang secondo un preciso ordine, per ottenere il verso di rotazione voluto del suo asse.

Per mettere in rotazione l'asse del motore Bafang, si utilizza la modulazione di larghezza d'impulso (o PWM, acronimo del corrispettivo inglese pulse-width modulation), attraverso la quale si ottiene una tensione media variabile dipendente dal rapporto tra la durata dell'impulso positivo e dell'intero periodo (duty cycle). Il segnale PWM arriva all'ESC attraverso il cavo bianco e nero; maggiore è la tensione, maggiore è la velocità di rotazione dell'asse del motore.

Nella parte superiore ha delle alette per smaltire il calore che la scheda genera, quando percorsa da correnti elevate. Le dimensioni sono 110 x 50,4 x 33,2 millimetri; il peso è 221,5 g.

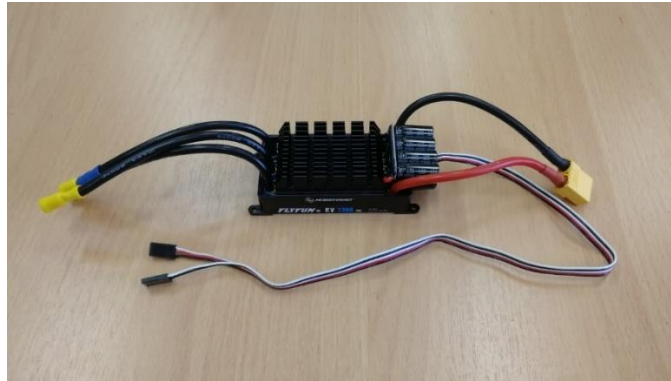


Figura 2.3 – FLYFUN 130A HV OPTO V5

### **BMS 36 V 35 A 10S**

È la scheda elettronica che si occupa della gestione di ogni cella del pacco batterie, non solo dal punto di vista termico.

È adatto ad un pacco batterie formato da celle agli ioni di litio 18650, disposte in modo da formare dieci serie (10S), con un voltaggio complessivo di 36 V. La corrente di scarica continua è 35 A, tensione e corrente di carica sono rispettivamente 42 V e 8 A. Le protezioni che offre sono da sovraccarica, da sovrascarica, da sovracorrente, da cortocircuito e svolge la funzione di bilanciamento tra le celle. Le dimensioni sono  $69 \times 51.5 \times 10$  millimetri.



Figura 2.4 – BMS 36 V 35 A 10S

## 2.2 SENSORE DI VELOCITÀ

Dopo la presentazione dei componenti che costituiscono il banco, si procede con l'attività di allestimento dello stesso.

Per la costruzione della base su cui alloggiare tutti i componenti, sono stati utilizzati profili di alluminio Bosch, tagliati secondo le giuste dimensioni, che sono stati fissati tramite staffe ad angolo retto, utilizzando viti M8 e i corrispondenti dadi e, se necessario, apposite rondelle piane larghe. Nella parte inferiore di tali profili, sono stati disposti spessori di materiale elastico in modo da smorzare le vibrazioni che i componenti, una volta terminato l'assemblaggio, possono creare. Nella parte superiore, invece, è stata incollata, utilizzando nastro biadesivo, una tavola in legno, dopo essere stata anch'essa tagliata e carteggiata.

Sulla tavola di legno è stata poggiata la mountain bike elettrica. La ruota anteriore è mantenuta in posizione fissa da un supporto in plastica che ne impedisce la rotazione; la ruota posteriore è stata rimossa per permettere l'inserimento del rullo interattivo. Nell'eseguire quest'ultima operazione, è stato rimosso il magnete, posizionato sul disco del freno e solidale alla ruota posteriore, che permette al sensore di velocità di misurazione la velocità di rotazione della ruota. Senza questo magnete, il motore elettrico della bicicletta elettrica non si avvia per fornire ausilio all'utente. Per questo motivo, è stato progettato e poi realizzato, tramite stampante 3D, un supporto per il magnete, a cui quest'ultimo è fissato tramite le stesse due viti che lo fissavano al disco del freno.



Figura 2.5 – Supporto per il magnete sul volano di Elite Direto XR-T e per il sensore di velocità

Il supporto è stato progettato in modo da aderire al volano del rullo interattivo, che viene messo in rotazione non appena viene fatta forza sui pedali. Il volano ha una superficie formata da tanti elementi che si ripetono uguali, ciascuno dei quali ha una superficie circolare con dei rilievi sui quali viene incastrato, esercitando una leggera pressione, il supporto, avendo questo nella parte più esterna delle gole di spessore leggermente inferiore ai rilievi. Per garantire una perfetta tenuta, la parte posteriore del supporto è stata prima limata e poi rivestita con del nastro biadesivo. Il supporto per il magnete è stato fissato, rispetto alla posizione iniziale del magnete sulla ruota posteriore, sulla parte opposta del volano del rullo, essendo l'altra chiusa all'interno di un rivestimento in materiale plastico. È stato pertanto necessario acquistare un nuovo sensore di velocità, del tutto identico a quello già installato sulla bicicletta elettrica, ma con una lunghezza del cavo di collegamento al motore superiore, in modo che potesse essere installato sulla parte opposta della forcella. Il sensore di velocità è di tipo induttivo e la distanza massima dal magnete non può superare un valore di pochi millimetri affinché quest'ultimo venga rilevato, e inoltre deve essere garantita la perpendicolarità tra i due. Perciò sono stati realizzati una basetta e un cilindro in metallo, uniti da una vite M4 svasata, che poggiano su uno spessore in legno, opportunamente carteggiato, in modo da permettere alla parte sensibile del sensore di essere perpendicolare al magnete. Il cilindro è stato forato e filettato nella parte superiore, in modo da poter permettere l'inserimento del sensore di velocità che è stato avvitato all'interno. Lo spessore in legno e la basetta in metallo sono stati fissati tramite fascette da elettricista alla forcella della ruota posteriore, in modo da impedirne ogni movimento. L'altra estremità del sensore di velocità ha un connettore che viene collegato al motore, sostituendo quello già esistente, dopo che il cavo ha percorso prima esternamente e poi internamente il telaio della mountain bike elettrica. Per collegare il nuovo sensore al motore, è stato rimosso temporaneamente il carter di protezione del motore.



## 2.3 COLLEGAMENTO MECCANICO TRA IL MOTORE BAFANG E IL MOTORE BOSCH

È stato realizzato, in modo analogo a quanto fatto in precedenza per la base inferiore del banco, un supporto per il motore Bafang, per l'ESC che permette il controllo di quest'ultimo e per la batteria che alimenta il motore attraverso l'ESC. Altri profili in alluminio Bosch, dopo essere stati tagliati alla dimensione corretta, sono stati disposti verticalmente, mentre nella parte superiore sono stati disposti orizzontalmente per permettere la collocazione di una tavola in legno, sulla quale sono stati fissati ESC e batteria. I profili disposti verticalmente non sono stati fissati alla base inferiore del banco per evitare di danneggiare i componenti collegati tra loro dalle vibrazioni create durante il funzionamento dagli stessi. La tavola di legno è fissata ai profili Bosch orizzontali attraverso viti che permettono il suo scorrimento orizzontale per consentire di allineare gli assi dei due motori, Bafang e Bosch, che vengono collegati insieme. La regolazione in altezza di questi ultimi si ottiene tramite due profili Bosch disposti verticalmente sulla tavola di legno, e fissati ad essa. Su entrambi è posta una staffa ad angolo retto che può scorrere, su cui è disposto orizzontalmente un altro profilo Bosch, su cui è collocato il motore Bafang. Sul profilo Bosch su cui poggia il motore Bafang, tramite del nastro biadesivo, è incollata della gomma, per ridurre le vibrazioni che il motore, soprattutto in fase di avvio, genera.

Il fissaggio del motore Bafang avviene attraverso un cavallotto, posto tra il profilo Bosch verticale e la parte cilindrica del motore Bafang, e attraverso piastrine forate che, tramite viti, lo vincolano ai profili Bosch che lo sorreggono.

Per il collegamento tra il motore Bafang e il motore Bosch della mountain bike elettrica, sono stati realizzati due alberi che sono stati poi uniti da un giunto elastico nella parte centrale, in modo da assorbire i picchi di coppia, soprattutto in fase di avviamento, grazie all'elemento in materiale elastico tra le due parti del giunto. La realizzazione dei due alberi è avvenuta utilizzando le macchine presenti nell'officina meccanica del Dipartimento in cui si svolge il lavoro.

L'albero che si collega al motore Bosch ha una parte, con diametro più piccolo e filettatura M15 x 1, da inserire all'interno del movimento centrale nel telaio della bicicletta elettrica, che si impegna sui filetti di quest'ultimo. Per fare ciò, è stata estratta la vite che mantiene in posizione la pedivella, ma senza rimuovere quest'ultima. La parte successiva ha diametro 26 millimetri e, dopo una rondella piana che permette l'allineamento facendo un piccolo spessore, va in battuta sulla pedivella. Per trasmettere il moto, l'albero ha una parte, con diametro maggiore e pari a 60 millimetri, che è fissata, attraverso viti, rondelle e dadi, ad una piastrina in acciaio appositamente forata che, a sua volta, si collega alla pedivella. La piastrina evita che venga scaricata tutta la coppia sui filetti del movimento centrale.

Le viti che collegano albero e piastrina lavorano principalmente a taglio per cui è stata verificata la loro resistenza utilizzando la seguente formula:

$$R_{\text{taglio}} = 0.6 \cdot f_{\text{tb}} \cdot \frac{A_{\text{res}}}{Y}$$

Dove:

- $f_{\text{tb}}$  è la resistenza a rottura del materiale impiegato per realizzare la vite; essendo il materiale della vite in classe 8.8,  $f_{\text{tb}} = 800 \text{ N/mm}^2$
- $A_{\text{res}}$  è l'area resistente [ $\text{mm}^2$ ]
- $Y$  è il coefficiente di sicurezza che è stato assunto nei calcoli pari a 2.

La forza che in totale le viti devono sostenere si ottiene dividendo la coppia massima del Bafang di 100 Nm, moltiplicata per un coefficiente di sicurezza pari a 2, per il braccio corrispondente. Confrontando quest'ultimo valore così calcolato con la resistenza a

taglio di ciascuna vite, si ottiene il carico che ogni vite deve reggere e il numero e il tipo di vite da inserire per un corretto accoppiamento tra albero e piastrina. In questo caso, è stato scelto di usare quattro viti di tipo M5. La stessa verifica è stata eseguita sull'altra estremità della piastrina che si collega alla parte opposta della pedivella, dove è necessaria una vite di tipo M8.

All'altra estremità, l'albero ha diametro di 28 millimetri, pari alla dimensione del giunto in cui deve essere inserito. La lunghezza di tale parte è stata fissata pari a 55 millimetri, in modo da permettere l'inserimento delle teste delle viti che realizzano l'accoppiamento tra albero e piastrina.

Viene qui sotto riportata la messa in tavola dell'albero lato motore Bosch.

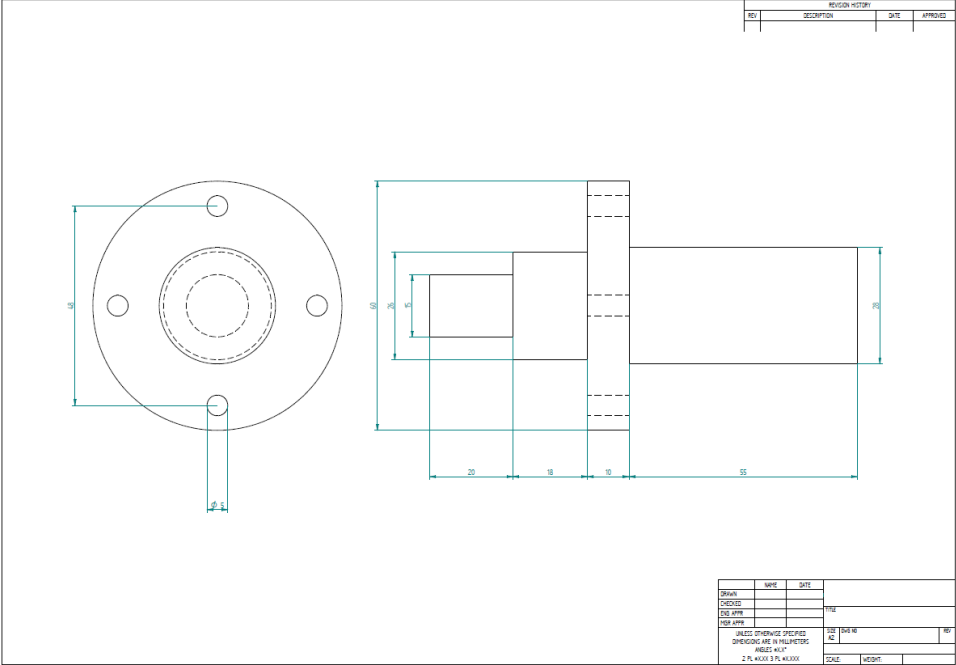


Figura 2.6 – Messa in tavola dell'albero lato motore Bosch

Il motore Bafang, quando viene azionato, mette in rotazione una parte con cinque fori filettati per viti M5. Tale parte ha una certa sporgenza, per cui, nella parte di albero con diametro 70 millimetri, è stata ricavata una gola con 50 millimetri di diametro e 35 di profondità. Al di fuori della gola, sono stati realizzati cinque fori in corrispondenza di quelli già presenti sul motore, per permettere l'accoppiamento tra motore e albero con cinque viti M5. Anche tali viti lavorano principalmente a taglio, per cui è stata ripetuta la stessa verifica già fatta in precedenza per l'altro albero. L'altra estremità dell'albero ha diametro 28 millimetri per permettere l'inserimento nel giunto, e lunghezza 45 per evitare di ostacolare le teste delle viti e le corrispondenti rondelle.

Gli alberi hanno entrambi una gola per l'inserimento di una chiavetta che permette l'accoppiamento con interferenza con il giunto.

Viene qui sotto riportata la messa in tavola dell'albero lato motore Bafang.

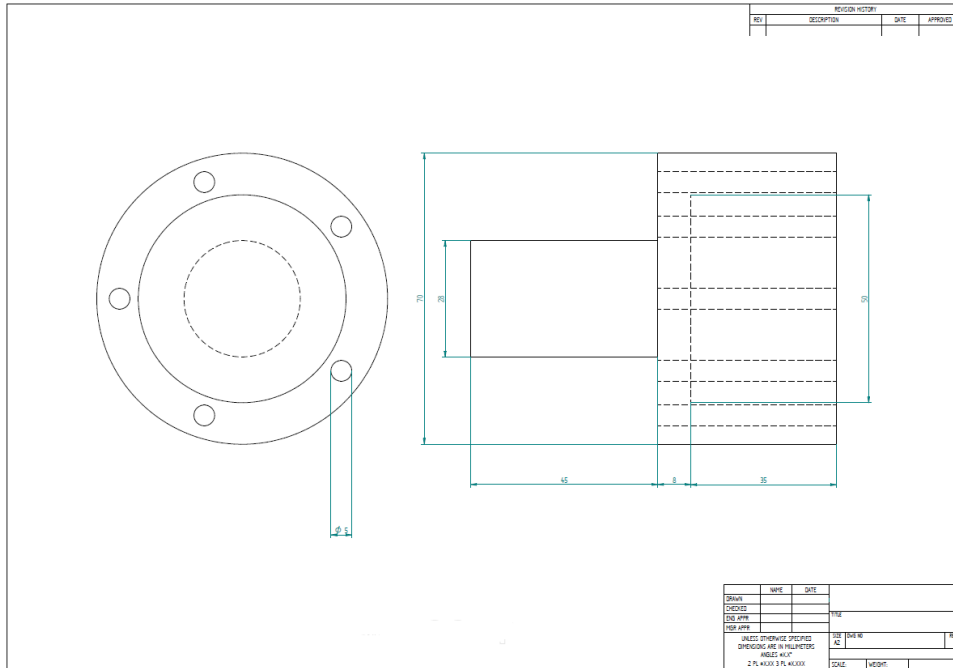


Figura 2.7 – Messa in tavola albero lato motore Bafang

Il collegamento tra i due alberi attraverso il giunto elastico viene riportato in figura 2.8, in cui è possibile osservare anche le modalità di fissaggio e regolazione del motore Bafang.

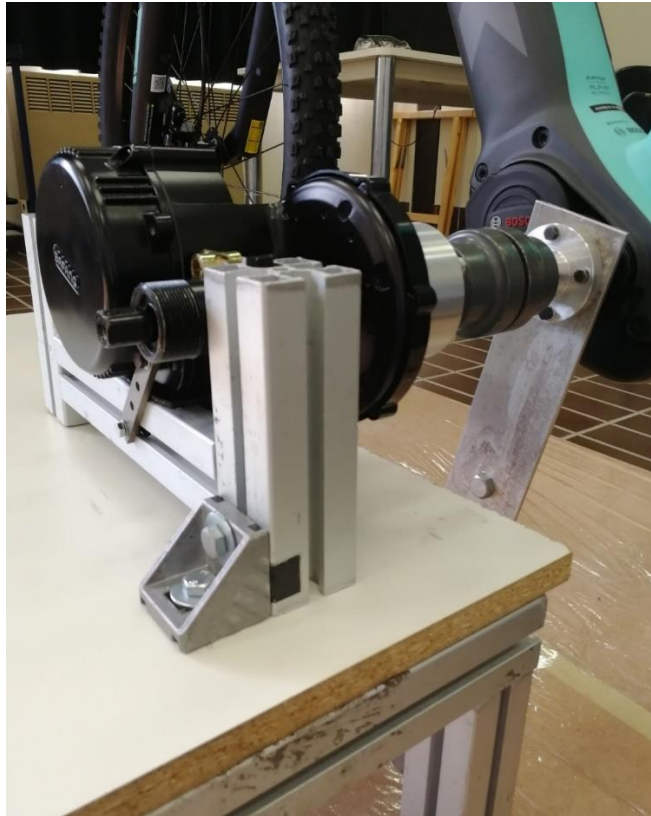


Figura 2.8 – Collegamento tra i due alberi attraverso il giunto elastico

Per la scelta del giunto è stato necessario calcolare la coppia che il motore Bafang genera durante il funzionamento. Tale valore permette di conoscere se l'elemento elastico posto tra le due parti che compongono il giunto è correttamente dimensionato. La coppia massima che può generare il motore Bafang è di 100 Nm. Tuttavia, quest'ultimo viene utilizzato per simulare un ciclista che ha, in media, una potenza e un numero di giri al minuto al massimo rispettivamente di 200 W e 100 rpm. Di conseguenza la coppia che al massimo il motore Bafang dovrà erogare è:

$$C = \frac{P}{\omega} = \frac{200}{10.47} = 19.1 \text{ Nm}$$

Per il calcolo della coppia massima, è stato necessario calcolare la velocità angolare.

$$\omega = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{60} = 100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{60} = 10.47 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$



## 2.4 CONTROLLO DEL MOTORE BAFANG

Dopo aver eseguito queste verifiche, si vuole cercare di far funzionare il motore Bafang, mettendo in rotazione il suo asse. L'idea è quella di gestirlo, variando la sua velocità di rotazione, attraverso la modulazione di larghezza d'impulso (o PWM, acronimo del corrispettivo inglese pulse-width modulation), che è un tipo di modulazione digitale che permette di ottenere una tensione media variabile dipendente dal rapporto tra la durata dell'impulso positivo e dell'intero periodo (duty cycle).

Per variare il duty cycle, e quindi la velocità di rotazione dell'asse del motore Bafang, si utilizza il potenziometro di un radiocomando per droni. Qualora questa prima prova dovesse funzionare, il sistema può anche essere replicato nel programma LabVIEW.

La batteria compresa nel kit di elettrificazione di una bicicletta tradizionale viene utilizzata per alimentare il motore Bafang attraverso l'ESC, che modula l'alimentazione con il segnale PWM, in modo da poter controllare quanta alimentazione arriva al motore. Più alimentazione arriva al motore, più la velocità di rotazione del suo asse aumenta. Dalla parte opposta dell'alimentazione, l'ESC ha tre cavi che si collegano al Bafang, secondo un preciso ordine. Il cavo centrale è la massa, cioè il neutro, mentre gli altri due vanno collegate in base al verso di rotazione che si vuole ottenere per l'asse del motore; invertendoli viene invertito il verso di rotazione. L'ESC è anche collegato al canale tre della ricevente, attraverso il cavo bianco e nero. Il PWM viene dato dal radiocomando e può essere variato agendo sul potenziometro, e il segnale arriva alla ricevente. Quest'ultima accetta un'alimentazione fino a 5 V; è collegata ad una batteria da 8 V attraverso un riduttore di tensione DC-DC che abbassa la tensione della batteria, essendo questa più alta della sua alimentazione. In figura 2.9 vengono riportati tutti gli elementi che permettono di realizzare tale prova; in figura 2.10 il radiocomando utilizzato per il controllo del motore Bafang.

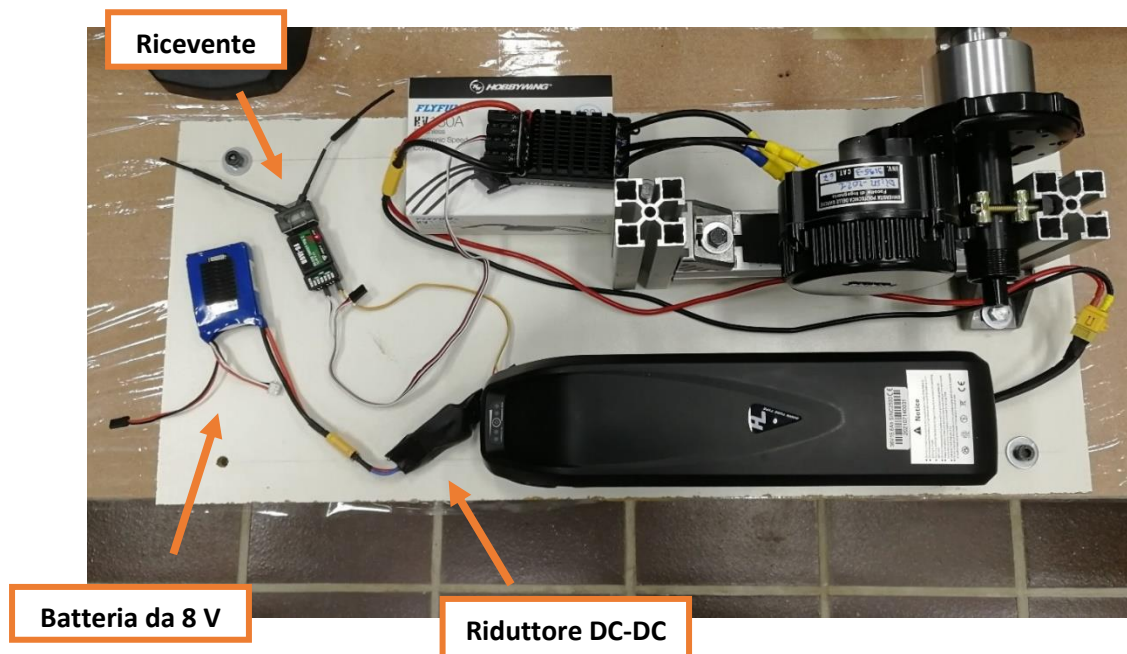


Figura 2.9 – Controllo del motore Bafang attraverso PWM da radiocomando



Figura 2.10 – Radiocomando utilizzato per il controllo del motore Bafang

Avendo verificato il corretto funzionamento, è stato realizzato lo stesso tipo di controllo per la movimentazione del motore tramite il programma LabVIEW.

## 2.5 REALIZZAZIONE DEL PACCO BATTERIE PER LA MOUNTAIN BIKE ELETTRICA

Viene ora realizzato il pacco batterie con celle ENERpower, sostituendo quello di cui la mountain bike elettrica è equipaggiata, per alimentare il motore della stessa. Il pacco batterie realizzato può in questo modo essere caratterizzato sia da un punto di vista termico che elettrico.

Ogni cella ha una capacità di 1,8 Ah e una tensione nominale di 3,2 V. La configurazione scelta per il pacco batterie è costituita da dieci serie formate da quattro celle in parallelo. Come detto in precedenza, la connessione in parallelo consente di aumentare la capacità del sistema, mentre quella in serie viene utilizzata per incrementare la tensione del pacco. Essendo quattro le celle in parallelo, la capacità è di  $1,8 \times 4 = 7,2$  Ah; essendo dieci le serie, la tensione è di  $3,2 \times 10 = 32$  V, che a piena carica diventa 36 V.

Ciascuna estremità di ogni cella viene inserita all'intero di un distanziale, uno di colore arancione per il polo positivo e uno di colore nero per quello negativo, che permette di disporre le celle secondo la configurazione voluta. Tali distanziali consentono il collegamento elettrico tra le celle, senza ricorrere alla saldatura. Infatti, hanno una parte filettata in metallo che sporge all'esterno, su cui vengono inserite strisce di alluminio forate, per poi essere chiuse con un dado.

Le celle vengono disposte in modo che ogni fila composta da quattro celle presenti estremità aventi la stessa polarità, ma opposta alla fila precedente e successiva. Dopo aver disposto le celle attraverso i distanziali, vengono realizzati i collegamenti in serie e parallelo tra le celle. Il collegamento in parallelo viene fatto collegando ogni fila composta da celle con la stessa polarità. Il collegamento in serie avviene tra poli opposti di due celle che costituiscono due collegamenti in parallelo successivi, sia nella parte inferiore che superiore del pacco, ma i collegamenti sono alternanti tra sopra e sotto. Il collegamento è stato fatto solo nella prima e nell'ultima cella delle quattro disposte in parallelo, e non su tutte e quattro.

Per quanto riguarda il collegamento con il BMS, questo nella parte inferiore ha un connettore da cui partono undici cavi, nove rossi che vengono saldati con stagno sulle strisce di alluminio che realizzano i collegamenti in serie, alternando il collegamento tra la parte superiore e inferiore, e un cavo rosso e uno nero che si collegano al positivo e negativo totale del pacco batterie.

Prima di collegare il connettore alla BMS, occorre verificare che il voltaggio sia giusto. Questo deve infatti aumentare procedendo nel collegamento tra le celle in serie.

Dopo aver realizzato i collegamenti al connettore, il polo negativo totale del pacco viene collegato alla porta B- del BMS. I cavi negativi della scarica e della carica vengono collegati alle altre due porte della scheda, P- e C-. La scarica e la carica vengono poi collegate al polo positivo totale del pacco attraverso un cavo che viene sdoppiato. Il positivo e negativo della scarica e della carica vengono uniti da due connettori XT60 (fino a 60 A).

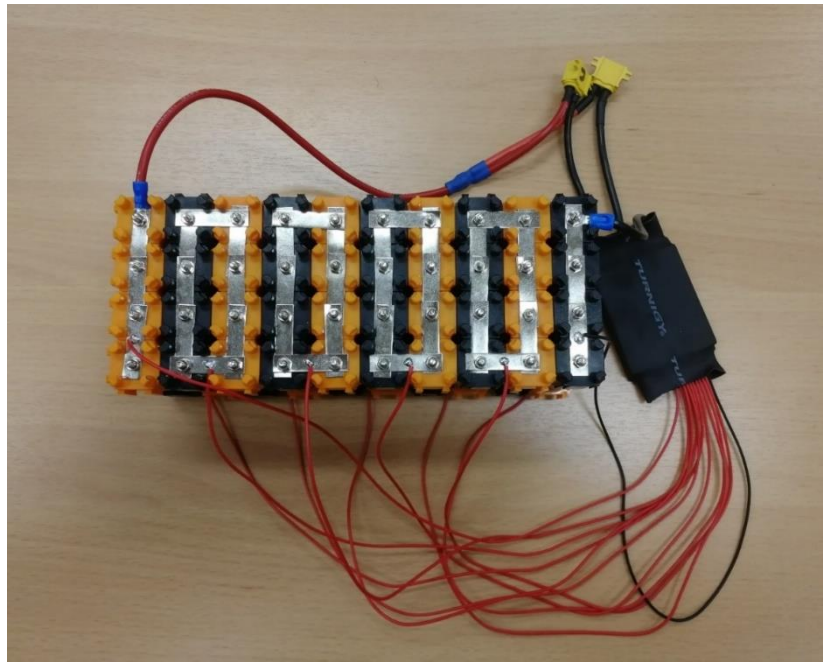


Figura 2.11 – Pacco batterie dieci serie di quattro celle in parallelo

## 2.6 PROGETTAZIONE DEL CONTENITORE PER IL PACCO BATTERIE

Si prosegue ora il lavoro con la progettazione del contenitore in alluminio per il pacco batterie e il Novec 7000.

Nel precedente lavoro già citato [1], è stata verificata la compatibilità tra il Novec 7000 e l'alluminio. Tre provini di alluminio sono stati immersi nel fluido e tenuti a bagno per tempi diversi, effettuando misure sul peso e sul diametro di questi, prima e dopo l'immersione. Le misure di peso non hanno evidenziato differenze significative, il che esclude perdite di massa dovute a corrosione o ossidazione sui provini a seguito del contatto con il Novec 7000. Per quanto riguarda le misure di diametro, sono stati misurati tre diametri lungo l'altezza di ciascun provino. Anche in questo caso, non sono state riscontrate differenze rilevanti.

Dunque, è stata certificata la non aggressività del Novec 7000 nei confronti dell'alluminio e si può passare alla fase di progettazione.

Il contenitore ha forma rettangolare e viene realizzato per fresatura partendo da un blocco pieno di alluminio. Le sue dimensioni sono state definite maggiorando leggermente quelle del pacco batterie costituito da dieci serie di quattro celle in parallelo. Le pareti verticali sono molto sottili, appena qualche millimetro, sufficienti per realizzare nella parte superiore una gola che permette l'inserimento di un elemento elastico. La gola è ricavata anche nella parte inferiore del coperchio che, quando viene chiuso, comprime l'elemento elastico, in quanto questo ha una dimensione leggermente superiore alle gole presenti nella due parti. Questo perché si vuole garantire una perfetta tenuta, evitando la fuoriuscita del Novec 7000, vista l'elevata volatilità che possiede.

Agli angoli del rettangolo e anche in corrispondenza del punto medio dei due lati lunghi, sono presenti sei rilievi, forati nella parte superiore, per permettere l'inserimento di una vite per ognuno di essi, che fissano il coperchio al resto del contenitore.

Su uno dei due lati lunghi sono stati realizzati quattro fori che, attraverso altrettanti pressacavi, fanno uscire i cavi e i connettori per la scarica e la carica del pacco batterie e i due cavi di segnale. Questi ultimi sono entrambi costituiti internamente da dieci cavi e permettono di acquisire separatamente i voltaggi di ogni serie del pacco batterie. È presente un dado che, quando viene stretto, mantiene il pressacavo in posizione nel foro della parete. Il dado fa presa su una parte filettata, ma poiché questa attraversa la parete è in parte inaccessibile. Per questo, la parete in corrispondenza dei punti di installazione dei pressacavi è più sottile.

Il foro per il passaggio delle termocoppie verrà realizzato in un secondo momento attraverso l'utilizzo di un trapano.

Sulla superficie di base interna del contenitore sono state realizzate delle alette che consentono di mantenere in posizione il pacco batterie, evitando ogni suo possibile movimento.

Per evitare spigoli vivi, soprattutto nei punti di inserimento dell'elemento elastico che fa tenuta, sono stati applicati raggi di raccordo in alcuni punti.

Nelle figure 2.12 e 2.13 viene riportato il disegno del contenitore e del suo coperchio.



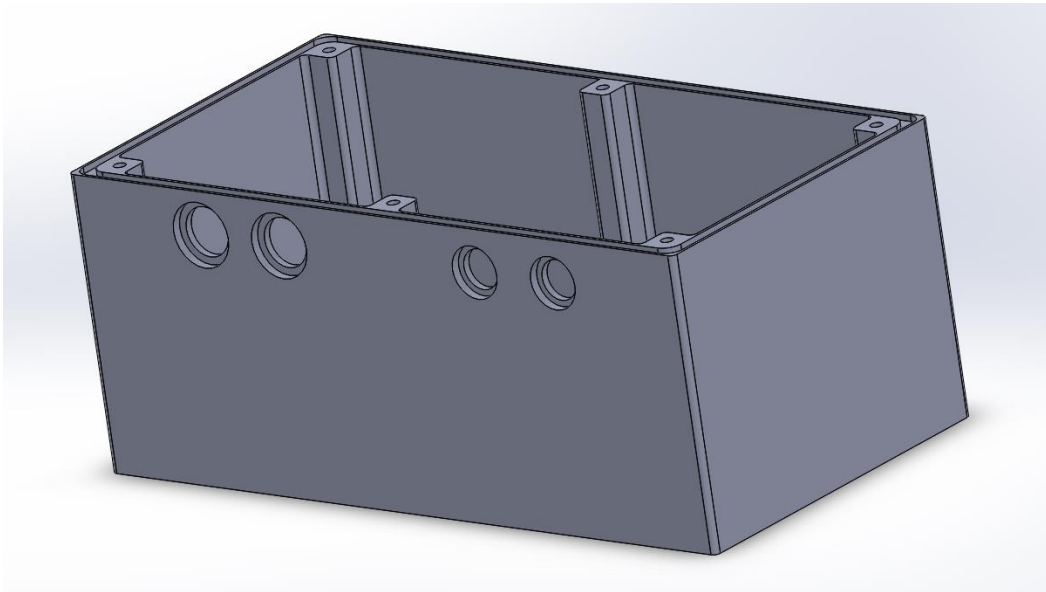


Figura 2.12 – Contenitore per il pacco batterie

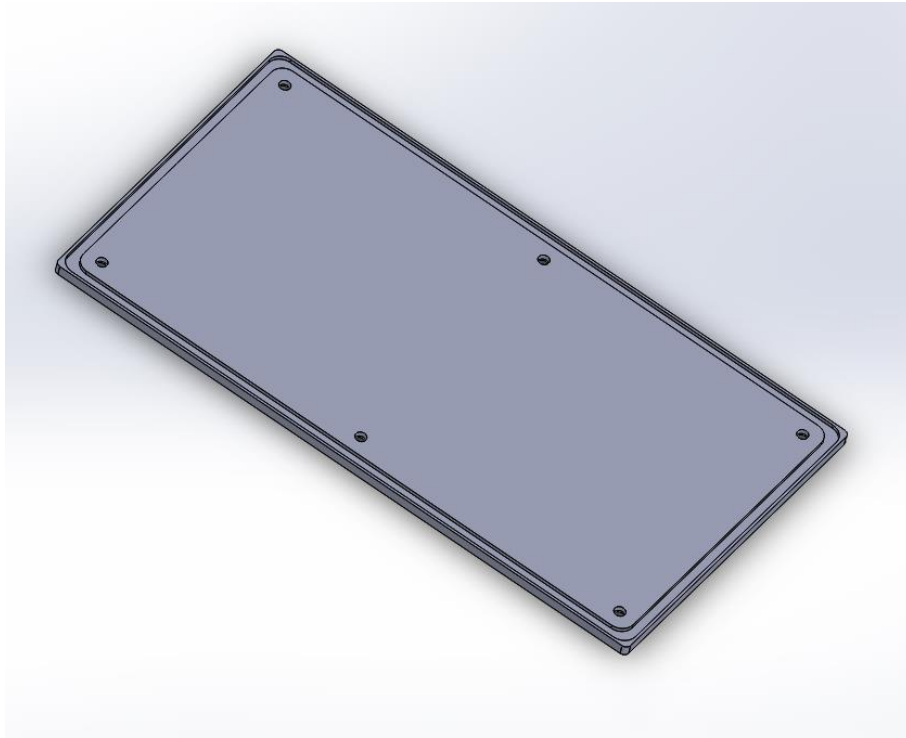


Figura 2.13 – Coperchio del contenitore

### 3 MODELLAZIONE NUMERICA DEL PACCO BATTERIE

---

Le celle utilizzate per la costruzione del pacco batterie sono  $\text{LiFePO}_4$  (litio-ferro-fosfato), marca ENERpower e modello HTCFR18650, con voltaggio nominale di 3,2 V e capacità di 1,8 Ah. Il polo positivo della cella è la superficie superiore del cilindro che la costituisce, mentre quello negativo è la superficie laterale e di base. Nella figura 3.1 viene riportata un'immagine di una cella oggetto dello studio, nella figura 3.2 vengono riportate le sue dimensioni.



Figura 3.1 – Cella  $\text{LiFePO}_4$  ENERpower 18650

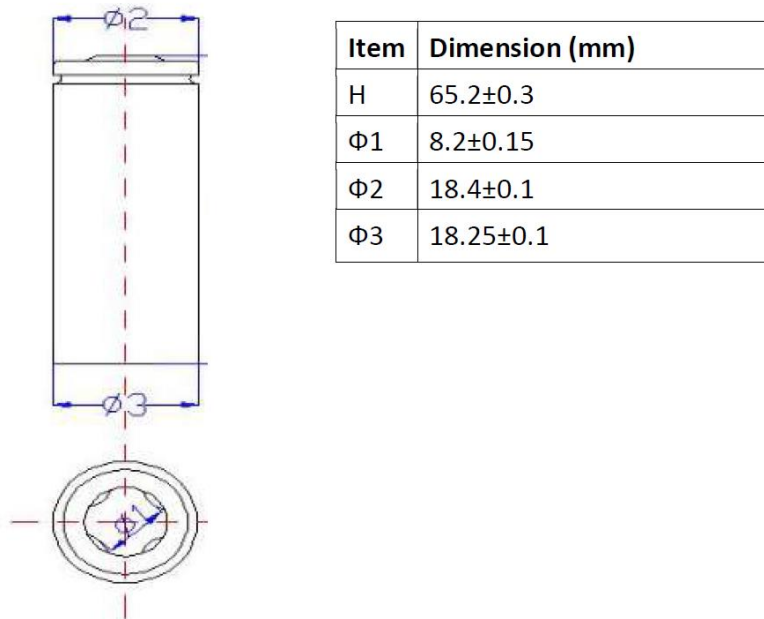


Figura 3.2 – Dimensioni della cella LiFePO<sub>4</sub> 18650 ENERpower

Tra i parametri più importanti, riportati nella scheda tecnica in figura 3.3, abbiamo la corrente di scarica in corrente continua e il C-rate corrispondente, ovvero la velocità con cui la batteria viene scaricata, che dipende dalla corrente stessa. Ad esempio, essendo la capacità 1,8 Ah, applicando una corrente di 1,8 A, la cella si scarica completamente in un'ora. Aumentare il C-rate significa ridurre il tempo necessario per scaricare la cella. Per la cella in esame, la massima corrente continua applicabile è di 5,4 A (3C), a cui corrisponde un tempo di scarica di venti minuti; la massima corrente di ricarica è 1,8 A (1C). Il voltaggio di cut-off, a cui interrompere la scarica per evitare danneggiamenti della cella, è di 2,5 V. Inoltre, viene fornito l'intervallo di temperatura in cui la cella può lavorare in sicurezza durante la carica e la scarica.

No.	Item	Standard	Note
1	Standard Capacity	1800mAh	0.5C, (current value of 1600mA at 1C)
2	Capacity Range	1700~1850mAh	0.5C
3	Standard Voltage	3.2V	
4	Alternating Internal Resistance	≤ 40mΩ	
5	Charge Conditions	Cut-off Voltage	Constant-current charge to 3.65V at 0.5C, constant voltage charge to stop until 0.01C mA
		Cut-off Current	
6	Max. Charging Current	1.8A	
7	Discharge Cut-off Voltage	2.5V	
8	Standard Discharge Current	0.9A	
9	Fast Discharge Current	1.8A	
10	Max. Continuous Discharge Current	5.4A	
11	Pulse Discharge Current	10A, 5s	
12	Cycle Characteristic	1500 times (100% DOD)	The residual capacity is no less than 80% of rated capacity at 1C rate.
		3000 times (80% DOD)	
		6000 times (50% DOD)	
13	Working Temperature	Charge: 0°C~55°C Discharge: -20°C~60°C	
14	Storage Temperature	-20°C ~ 45°C	Short-term storage (< 3 months)
15	Battery Weight	42 g (Approx.)	

Figura 3.3 – Principali caratteristiche della cella LiFePO<sub>4</sub> 18650 ENERpower

### 3.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NEL SOFTWARE

---

Il comportamento del pacco batterie è stato caratterizzato, durante la fase di scarica, sia dal punto di vista termico che elettrico, attraverso un modello numerico, verificando anche che i risultati ottenuti fossero coerenti con i valori sperimentali.

Le simulazioni numeriche non sono state eseguite sul pacco batterie formato da dieci serie di quattro celle in parallelo destinato ad alimentare la mountain bike elettrica, ma su un pacco più piccolo, formato da tre serie di tre celle in parallelo, procedendo con gradualità. Nel modello sono state riprodotte le celle già citate, ciascuna delle quali ha una tensione e una capacità nominale di 3,2 V e 1,8 Ah, che per il pacco 3x3 diventano rispettivamente 9,6 V e 5,4 Ah.

Il pacco viene inserito all'interno di un dominio fluido, aria nella prima simulazione e Novec 7000 nella seconda, per osservare le differenze che si hanno nei due casi. Il dominio fluido ha le stesse dimensioni del contenitore utilizzato nel modello sperimentale.

Per la risoluzione del modello numerico occorre affidarsi alla potenza di calcolo di un PC, e all'utilizzo di un software, a causa dell'elevata complessità computazionale. In particolare, è stato utilizzato un software commerciale che sfrutta il metodo degli elementi finiti (FEM). Il punto di forza di tale programma, rispetto ad altri software, è la presenza di numerosi moduli corrispondenti a diversi fenomeni fisici che possono essere combinati tra loro. Il software ha il compito di facilitare la compilazione e l'implementazione dei modelli, attraverso l'utilizzo di interfacce grafiche, e permette la configurazione del sistema, la preparazione degli esperimenti e la loro successiva visualizzazione.

Il primo passo per l'implementazione del modello consiste nell'assegnare i parametri che verranno utilizzati per effettuare la simulazione. In particolare, sono stati introdotti parametri geometrici e termici dei materiali che costituiscono gli elettrodi, i collettori di corrente e il separatore. Questi hanno permesso di calcolare, attraverso una media

pesata, il coefficiente di conducibilità termica, il calore specifico e la densità della parte attiva di ogni cella, che è la sorgente di calore interna della stessa durante la scarica. Per il calcolo sono state utilizzate le seguenti equazioni:

$$k_{T\_batt\_ang} = (k_{Tpos} L_{pos} + k_{Tneg} L_{neg} + k_{Tpos\_cc} L_{pos\_cc} + k_{Tneg\_cc} L_{neg\_cc} + k_{Tsep} L_{sep}) / L_{batt}$$

$$k_{T\_batt\_r} = L_{batt} / \left( \frac{L_{pos}}{k_{Tpos}} + \frac{L_{neg}}{k_{Tneg}} + \frac{L_{pos\_cc}}{k_{Tpos\_cc}} + \frac{L_{neg\_cc}}{k_{Tneg\_cc}} + \frac{L_{sep}}{k_{Tsep}} \right)$$

In cui  $k_{T\_batt\_ang}$  e  $k_{T\_batt\_r}$  sono rispettivamente la conducibilità termica in direzione angolare e radiale della parte attiva della cella. Per la densità e il calore specifico, invece, sono state utilizzate le seguenti formule:

$$\rho_{batt} = (\rho_{pos} L_{pos} + \rho_{neg} L_{neg} + \rho_{pos\_cc} L_{pos\_cc} + \rho_{neg\_cc} L_{neg\_cc} + \rho_{sep} L_{sep}) / L_{batt}$$

$$Cp_{batt} = (Cp_{pos} L_{pos} + Cp_{neg} L_{neg} + Cp_{pos\_cc} L_{pos\_cc} + Cp_{neg\_cc} L_{neg\_cc} + Cp_{sep} L_{sep}) / L_{batt}$$

I parametri richiesti per risolvere tali equazioni sono stati ripresi dal lavoro di tesi già citato [1], nel quale è stata effettuata un'analisi al microscopio ottico di una cella. Infine, sono stati inseriti i valori di temperatura ambiente e dello stato di carica iniziale delle celle, considerandole completamente cariche.

È possibile ora passare alla sezione geometria. Il pacco batterie è stato costruito in un ambiente tridimensionale. Ogni cella del pacco è costituita da due cilindri coassiali, entrambi hanno la stessa altezza, pari a quella della cella, ma il raggio è molto diverso.

Ciò permette di distinguere due domini principali: la parte attiva della cella che comprende gli elettrodi, il separatore, i collettori di corrente, e il battery can, un rivestimento sottile di 0,25 millimetri che circonda la superficie laterale del cilindro che rappresenta la parte attiva. È stato trascurato un terzo dominio, cioè l'anima interna della cella (mandrel), dato che, dal punto di vista termico, non fornisce un contributo rilevante.

L'estremità di ogni cella è inserita all'interno di un distanziale in materiale plastico, con all'interno un elemento in acciaio che permette il contatto tra il polo della cella e una striscia di alluminio, utilizzata per i collegamenti elettrici, in serie e in parallelo, tra le celle. Il pacco batterie è stato inserito all'interno di un dominio fluido, a cui è stato assegnato come materiale prima l'aria e poi il Novec 7000, per osservare gli effetti termici che la scarica delle celle provoca su di essi. Ad ogni dominio è stato assegnato il materiale corrispondente, così che il software avesse a disposizione i parametri fisici di ogni elemento per effettuare la simulazione. In figura 3.4 viene riportata la geometria tridimensionale realizzata per le simulazioni.



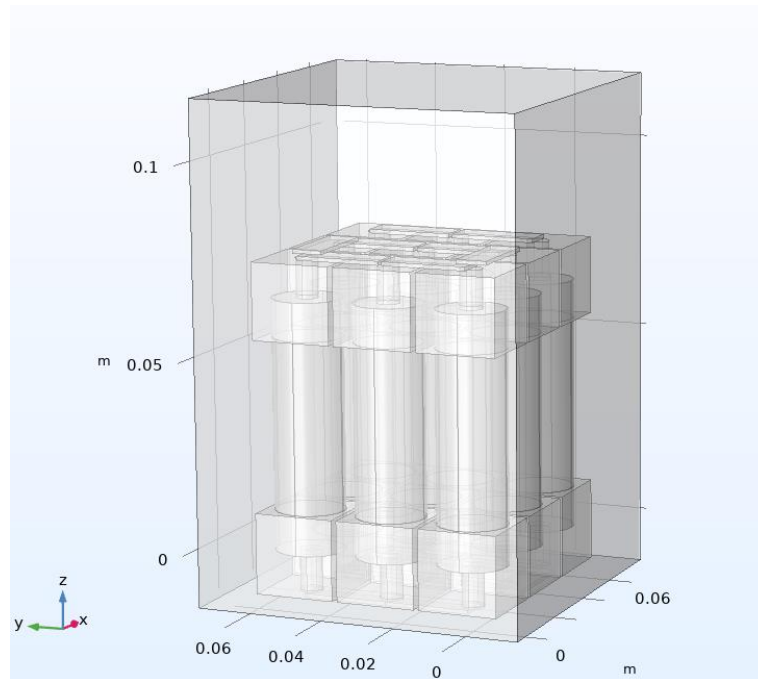


Figura 3.4 – Geometria del pacco batterie

Le temperature sono misurate in undici punti diversi, secondo lo schema seguente, che viene mantenuto invariato sia nel caso di immersione del pacco in aria che nel Novec 7000. Tali punti corrispondono a quelli in cui, nel modello sperimentale, sono state installate termocoppie, per poter eseguire un confronto tra i risultati numerici e sperimentali. Le sonde di temperatura sulle celle hanno il compito di misurare la loro temperatura superficiale, evidenziando anche, sulla cella con tre sonde, come il calore si distribuisce sulla circonferenza. Altre sonde misurano la temperatura del fluido, aria e Novec 7000, e sono poste in corrispondenza della parete del dominio fluido e in una zona centrale tra le celle, in quest'ultimo caso su tre altezze differenti. Uno schema della loro disposizione è riportato in figura 3.5.

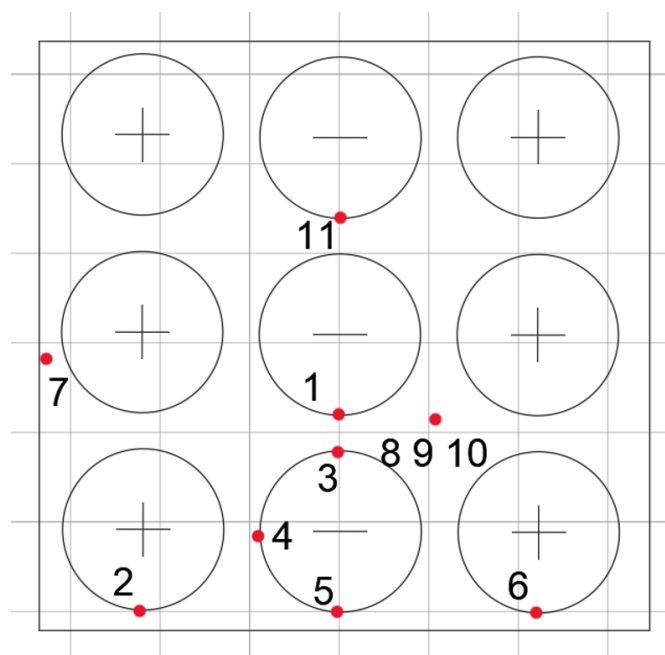


Figura 3.5 – Disposizione delle sonde di temperatura sul pacco batterie

Al fenomeno di generazione di potenza utile in una cella agli ioni di litio, a causa di inefficienze interne, si accompagna inevitabilmente produzione di calore. Questa viene valutata nel modello attraverso l'approccio a parametri concentrati (lumped), basato sul potenziale a circuito aperto. L'equazione, già introdotta in precedenza, è la seguente:

$$\dot{Q} = I(V - E_{OCV}) + IT \frac{\partial E_{OCV}}{\partial T}$$

Per la sua applicazione, il modello richiede l'introduzione dei valori del potenziale a circuito aperto ad una temperatura di riferimento e della loro derivata fatta rispetto alla temperatura, che sono stati ricavati dalle prove sperimentali effettuate nel lavoro già citato [1].

Per ottenere il reale potenziale della cella in condizioni operative, al potenziale a circuito aperto bisogna sottrarre tre perdite di voltaggio che si verificano quando alla cella viene applicata corrente:

$$E_{cell} = E_{OCV}(SoC, T) + \eta_{ohm} + \eta_{act} + \eta_{conc}$$

Le tre perdite di voltaggio sono:

- Sovrapotenziale ohmico  $\eta_{ohm}$ : rappresenta le perdite dovute alle resistenze interne della cella, che aumentano in modo direttamente proporzionale con la corrente di scarica:

$$\eta_{ohm} = \eta_{ohm1C} \frac{I_{cell}}{I_{1C}}$$

Dove  $\eta_{ohm1C}$  è il sovrapotenziale ohmico di una scarica a 1C,  $I_{cell}$  è la corrente continua di scarica e  $I_{1C}$  è la corrente di scarica a 1C

- Sovrapotenziale di attivazione  $\eta_{act}$ : rappresenta le perdite necessarie per superare l'energia di attivazione (energia libera di Gibbs), affinché avvengano reazioni di ossidoriduzione all'interno della cella
- Sovrapotenziale di concentrazione (o di polarizzazione)  $\eta_{conc}$ : rappresenta le perdite legate alla differenza di polarizzazione di carica tra l'elettrolita direttamente a contatto con l'elettrodo solido e quello più distante. Questa differenza crea difficoltà al passaggio degli ioni di litio, e al passaggio di corrente.

Nella simulazione è stata introdotta solo la perdita dovuta al sovrapotenziale ohmico, che comprende anche le altre due. A tale valore è stata posta particolare attenzione, in quanto può portare ad errori nella valutazione della temperatura, poiché il programma moltiplica il sovrapotenziale ohmico registrato durante una scarica 1C per il C-rate. Ad esempio, nel caso di una scarica a 3C, il sovrapotenziale 1C viene moltiplicato per 3. Tuttavia, i risultati sperimentali hanno evidenziato che non vale questa relazione di linearità.

Oltre all'interfaccia lumped battery, è stata utilizzata anche quella di flusso laminare, assegnata al dominio fluido nel quale è immerso il pacco batterie, a cui sono stati assegnati i materiali aria e Novec 7000 nelle due simulazioni. All'interno della libreria dei materiali del software utilizzato non è presente il materiale Novec 7000, per cui è stato utilizzato un materiale vuoto a cui sono state assegnate le caratteristiche richieste dal programma per effettuare la simulazione, ricavandole dal suo datasheet.

L'obiettivo della ricerca all'interno della quale si inserisce questo lavoro di tesi, è quello di verificare se il Novec 7000, grazie al cambiamento di fase, è in grado di assorbire i

picchi di potenza termica che il pacco batterie di una bici a pedalata assistita sviluppa durante il suo funzionamento. Per questo motivo, è necessario riprodurre all'interno del modello un comportamento di tale fluido il più possibile vicino alla realtà. Il Novec 7000 è stato quindi definito come materiale in cambiamento di fase. Ciò ha permesso di impostare la temperatura a cui avviene l'ebollizione, pari a 34°C, distinguendo tra due fasi, a ciascuna delle quali sono stati assegnati i valori corrispondenti ricavati dal datasheet.

Inoltre, diversamente dalla simulazione eseguita in aria, in quella con il Novec 7000 è possibile osservare anche come le due fasi si distribuiscono nel volume fluido. In particolare, l'ebollizione interessa prima la zona dove sono disposte le celle, dove la temperatura aumenta più rapidamente, e successivamente si estende senza però interessare tutto il volume, rimanendo confinata nelle zone prossime al pacco batterie.

Le fisiche necessarie a descrivere il problema vengono accoppiate in una multifisica. Il modello lumped applicato a ciascuna delle celle che costituisce il pacco viene accoppiato alla trasmissione di calore nei solidi e nei fluidi. Tale accoppiamento impone che il calore sviluppato da ogni cella si trasferisce per conduzione all'interno dei domini solidi e, successivamente, all'interno del fluido per convezione. Per il trasferimento di calore per conduzione, viene risolta la seguente equazione.

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + G = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

In cui  $k$  è la conducibilità termica del materiale, e viene moltiplicata per la derivata seconda della temperatura rispetto alle tre direzioni dello spazio,  $G$  è la generazione di potenza termica interna alla cella e  $\rho \cdot C_p$  è la capacità termica della stessa, ottenuta dal prodotto tra densità e calore specifico. La capacità termica viene moltiplicata per la derivata della temperatura fatta rispetto al tempo, ottenendo il termine che rappresenta l'accumulo di potenza termica all'interno della cella.

I due modelli fisici accoppiati danno origine al riscaldamento elettrochimico, il quale sostituisce alla potenza termica generata internamente  $G$  la potenza ottenuta dal modello a parametri concentrati delle celle, e aggiunge un termine di potenza dispersa dovuta alle perdite interne alle stesse.

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q}_{\text{gen}} + \dot{Q}_h = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dove  $\dot{Q}_h$  è la potenza termica persa internamente durante il funzionamento, costituita dai tre contributi già citati e ridotti per semplicità alla sola perdita dovuta alle resistenze interne della cella.

Infine, viene risolto lo scambio termico con l'aria esterna, e poi con il Novec 7000, per convezione naturale, applicando la seguente equazione:

$$q_0 = h (T_{\text{ext}} - T)$$

In cui  $q_0$  è la potenza termica scambiata con l'esterno,  $h$  è il coefficiente di scambio termico convettivo e  $T_{\text{ext}}$  è la temperatura ambiente.

Prima di eseguire il calcolo, il dominio continuo di partenza viene discretizzato mediante l'uso di elementi di forma semplice. Rendendo la discretizzazione più fitta sul dominio, ovvero diminuendo la dimensione degli elementi, aumenta il tempo di calcolo e la soluzione si avvicina alla situazione reale, senza per forza raggiungerla, in quanto si tratta pur sempre di un metodo approssimato.

Lo studio del problema fisico è basato sulla transitorietà del problema, cioè sulla sua dipendenza dal tempo. Ogni cella è stata scaricata con una corrente costante di 5.4 A, pari a tre volte la sua capacità, essendo questa pari a 1.8 Ah per ogni cella. Il tempo di

scarica è stato quindi impostato pari a un terzo di un'ora, cioè 20 minuti o 1200 secondi. Una corrente di 5.4 A è la massima corrente di scarica continua che può essere sopportata dalle celle in esame, oltre ad essere la più rilevante dal punto di vista termico. Alle celle è stato applicato tale valore, ed è stato mantenuto costante per tutta la durata della prova.

Al termine del calcolo, il modello restituisce gli andamenti di voltaggio, potenza termica generata, corrente e delle undici sonde di temperatura poste secondo lo schema già illustrato in funzione dello stato di carica durante tutta la fase di scarica. Inoltre, il programma costruisce i campi bidimensionali e tridimensionali di temperatura, delle isoterme e della distribuzione di velocità nei diversi domini.

## 4 RISULTATI NUMERICI

---

Dopo l'attività di allestimento del banco per la sperimentazione, sono state eseguite simulazioni numeriche della fase di scarica costante di un pacco batterie formato da tre serie di tre celle in parallelo. In questo capitolo, vengono presentati i risultati ottenuti dal modello numerico già impostato in precedenza, ponendo maggiore attenzione alla scarica simulata in aria. Inoltre, verrà eseguito un confronto con i risultati delle prove sperimentali eseguite sullo stesso pacco. Nel modello è stata posta particolare attenzione per riprodurre le stesse condizioni delle prove sperimentali.

Il pacco batterie immerso in aria è stato scaricato applicando ad ogni cella una corrente costante di 5.4 A, pari a tre volte la sua capacità, essendo questa pari a 1.8 Ah per ogni cella. Il tempo di scarica è stato quindi impostato pari a un terzo di un'ora, cioè 20 minuti o 1200 secondi. Una corrente di 5.4 A è la massima corrente di scarica continua che può essere sopportata dalle celle in esame, ed è la più interessante per osservare il comportamento termico del pacco batterie. Alle celle è stato applicato tale valore, ed è stato mantenuto costante per tutta la durata della prova.

Al termine del calcolo, il modello restituisce gli andamenti di voltaggio, della potenza termica generata, della corrente e delle undici sonde di temperatura poste secondo lo schema già illustrato in funzione dello stato di carica durante tutta la fase di scarica. Inoltre, il programma costruisce i campi bidimensionali e tridimensionali di temperatura, delle isoterme e della distribuzione di velocità nei diversi domini. Ognuno di questi viene qui di seguito analizzato.



## 4.1 PROVE DI SCARICA COSTANTE

Per primo, viene analizzato l'andamento del voltaggio in funzione dello stato di carica. Questo viene calcolato a partire dall'equazione del modello a parametri concentrati, già presentata in precedenza e riportata di seguito.

$$E_{OCV}(SoC, T) = E_{OCV}(SoC, T_{ref}) + (T - T_{ref}) \frac{\partial E_{OCV}}{\partial T}$$

Per la sua applicazione, è necessario introdurre i valori del potenziale a circuito aperto ad una temperatura di riferimento e della loro derivata rispetto alla temperatura. Il reale potenziale in condizioni operative, graficato in figura 4.1, si ottiene sottraendo al risultato di questa equazione il sovrapotenziale ohmico che rappresenta le perdite dovute alle resistenze interne della cella, e che contiene anche i sovrapotenziali di attivazione e di concentrazione, più difficili da valutare sperimentalmente. Nella stessa figura, viene sovrapposto il voltaggio ottenuto dalle prove sperimentali. Si nota una buona compatibilità tra numerico e sperimentale nella fase centrale di scarica che va dall'80% al 20% di SoC, e una differenza nella fase iniziale e soprattutto nell'ultimo 10% di SoC, dovuta al fatto che il modello non riesce a riprodurre la repentina caduta di voltaggio che si verifica nel caso reale.

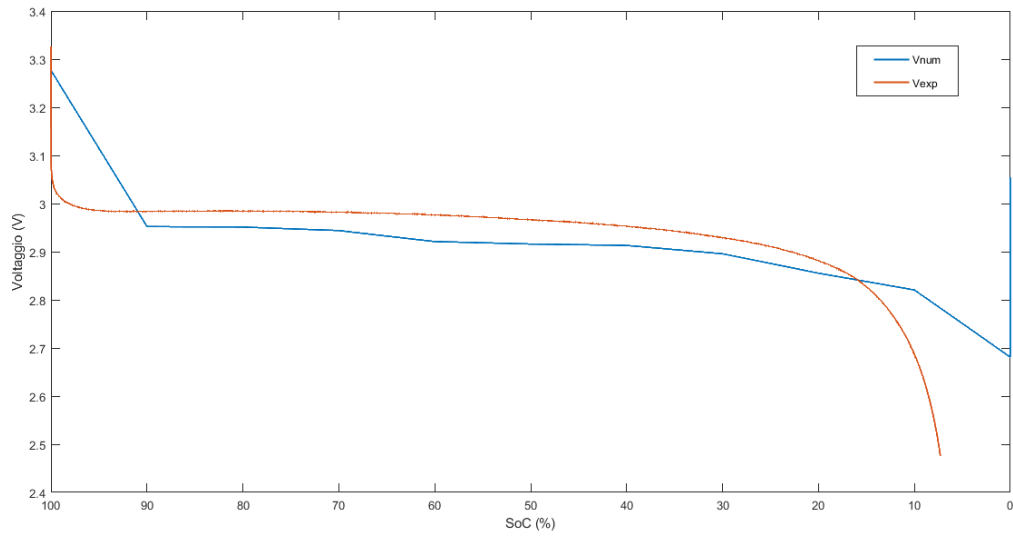


Figura 4.1 – Voltaggio sperimentale e numerico in funzione dello stato di carica

Per conoscere il voltaggio totale del pacco, ottenuto dalle tre serie, è sufficiente moltiplicare l'andamento riportato, che vale nel caso di una singola cella, per tre. Infatti, ad ogni cella è stata applicata la stessa fisica e il comportamento calcolato dal programma è lo stesso per ciascuna di esse.

È fondamentale per la gestione termica di un pacco batterie valutare la potenza termica generata da questo durante il funzionamento a causa di perdite interne alle celle. Per il suo calcolo, il programma utilizza l'approccio a parametri concentrati. Il modello non permette di distinguere tra i due contributi, entropico e irreversibile, che costituiscono la potenza totale.

Fino a circa il 90% di SoC, la temperatura della cella varia in modo contenuto e la potenza generata dipende delle resistenze interne. Il contributo di queste ultime rimane costante e viene assorbito dal termine entropico che diventa negativo. Al 20% di SoC, il termine entropico cambia segno e diventa positivo, e il termine irreversibile aumenta; la potenza totale aumenta fino al termine della scarica. Il suo andamento, in funzione dello stato di carica, viene riportato di seguito.

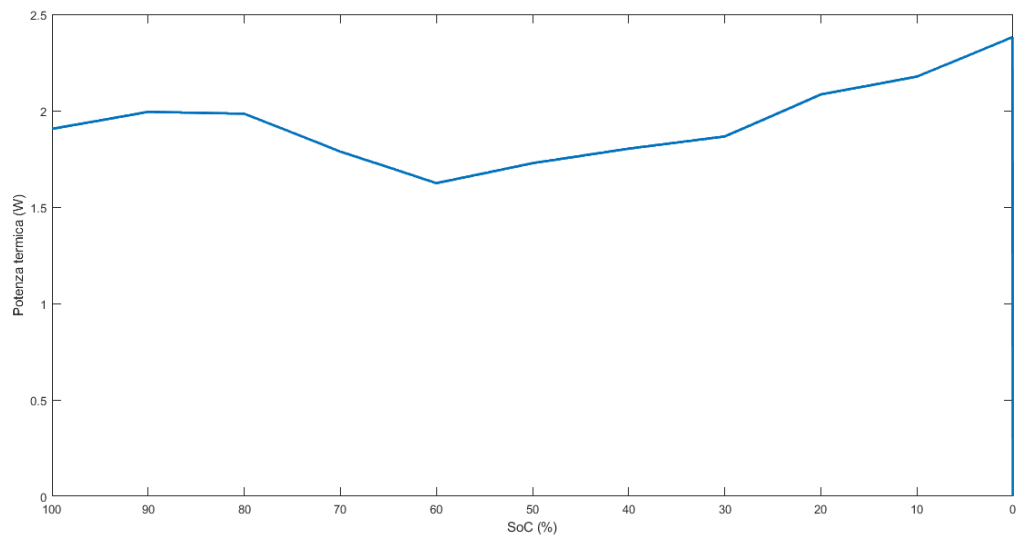


Figura 4.2 - Potenza termica generata durante la scarica a 3C

Il modello calcola la temperatura negli undici punti del pacco batterie scelti secondo lo schema già mostrato. Vengono riportate in figura 4.3 le differenze tra le temperature calcolate e la temperatura iniziale, in funzione dello stato di carica. Questo permette di slegarsi dal valore di temperatura ambiente che, nelle prove sperimentali di confronto, può variare di volta in volta. Oltre alla temperatura superficiale delle celle, viene misurata la temperatura dell'aria, in prossimità della parete del volume fluido e tra le celle. In quest'ultimo caso, la temperatura dell'aria viene misurata lungo la verticale, a tre altezze differenti.

Le temperature superficiali delle celle e la temperatura dell'aria tra queste presentano andamenti del tutto sovrapponibili, tanto che non è possibile distinguerle. Al termine della scarica, raggiungono una differenza rispetto alla temperatura iniziale di oltre 37 °C. Diversamente da come ci si aspetterebbe, la cella centrale non è quella con temperatura maggiore; ciò potrebbe essere dovuto al fatto che non è stato considerato nel modello l'irraggiamento tra le celle stesse.

L'unica sonda che si distacca da questi andamenti è quella che misura la temperatura dell'aria in corrispondenza della parete del dominio fluido. Essa impiega un tempo maggiore per risentire dell'aumento di temperatura, per cui nella fase iniziale ha una pendenza inferiore, per poi correre quasi parallelamente alle altre sonde, presentando comunque un aumento significativo, fino a raggiungere una differenza di temperatura rispetto alla temperatura iniziale appena inferiore agli altri valori. Tutte le sonde di temperatura presentano un andamento abbastanza lineare, ad eccezione di quella posta in corrispondenza della parete del dominio fluido, in cui sono presenti delle fluttuazioni, che si accentuano soprattutto nell'ultimo 10% di stato di carica, che potrebbero anche essere dovute ad un problema di calcolo del programma.

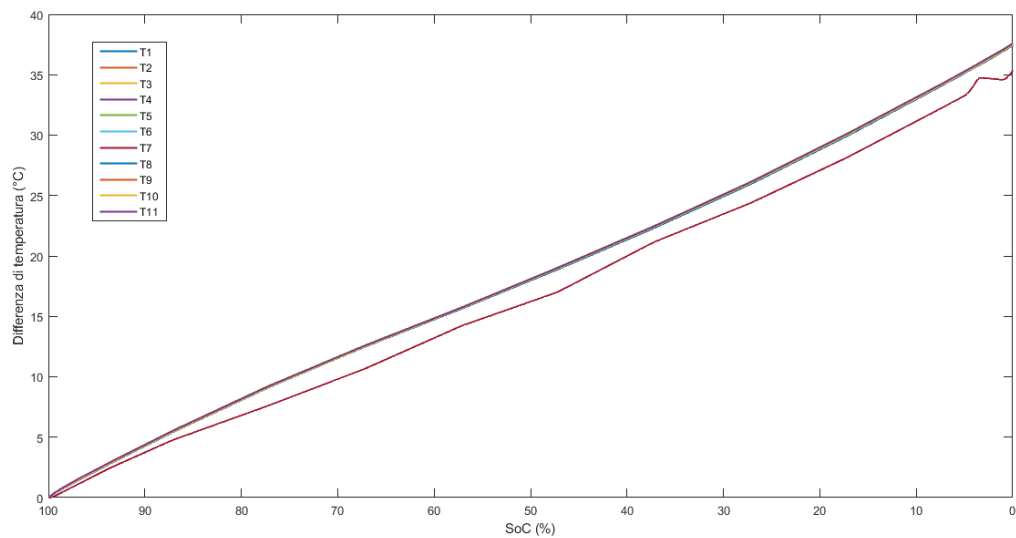


Figura 4.3 – Andamento delle differenze di temperatura in funzione dello stato di carica

In figura 4.4, viene riportato il confronto tra la differenza di temperatura numerica e sperimentale del punto uno, posto sulla superficie della cella al centro del pacco batterie, quella che dovrebbe essere nella condizione più sfavorita.

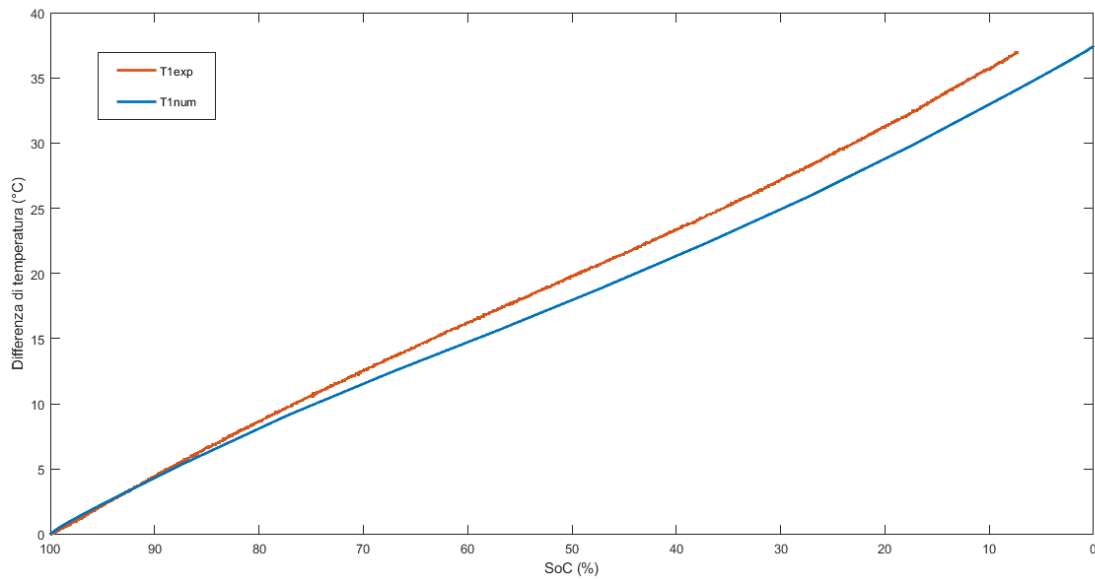


Figura 4.4 – Confronto tra la differenza di temperatura numerica e sperimentale del punto 1

Nel modello, a differenza del caso sperimentale, si riesce a simulare una scarica completa, per cui le due curve terminano in punti differenti. Per tutta la durata della scarica, il modello rappresenta con buona approssimazione la temperatura misurata dalla termocoppia posta sullo stesso punto del pacco batterie. Infatti, si verificano cambiamenti di pendenza delle due curve in corrispondenza dello stesso stato di carica. Le due curve si allontanano maggiormente nella fase finale della scarica, anche se la differenza massima è di circa 3 °C, dove il modello risulta meno affidabile perché quest'ultimo non riesce a riprodurre la repentina caduta di voltaggio, e la temperatura numerica si mantiene più bassa di quella sperimentale.

Vengono ora analizzati i campi bidimensionali e tridimensionali di temperatura, delle isoterme e della distribuzione di velocità che il programma costruisce nei diversi domini. Per osservare la distribuzione di temperatura, è stato costruito un piano verticale che passa per il centro della fila centrale di tre celle. All'istante iniziale, tutti i domini si trovano alla stessa temperatura, pari a quella ambiente, impostata come condizione al contorno. Non appena viene applicata la corrente di scarica alle celle e queste iniziano a scaricarsi, la temperatura aumenta. Il calore viene trasmesso per conduzione all'interno delle celle, i primi domini interessati dall'aumento di temperatura, fino a raggiungere il fluido in loro prossimità. Il calore viene trasmesso lateralmente alle celle, senza propagarsi in maniera rilevante verso l'alto e verso il basso a causa della presenza dei distanziali, che si oppongono al flusso termico, essendo in materiale plastico. La temperatura aumenta ancora e l'aria che circonda lateralmente le celle diventa più leggera perché meno densa e sale verso l'alto passando nel volume compreso tra i distanziali e la parete interna del dominio fluido. L'aumento di temperatura si estende interessando anche la zona superiore del dominio fluido compresa tra i distanziali e la parete superiore. Nelle figure 4.5, 4.6 e 4.7 viene riportata la distribuzione di temperatura lungo il piano già citato. In particolare, la prima figura corrisponde ad un tempo di 50 secondi dopo l'inizio della scarica, come riportato in alto a sinistra, mentre la seconda e la terza rispettivamente a 500 e 1200 secondi. Sulla destra di ogni figura viene riportata la scala.



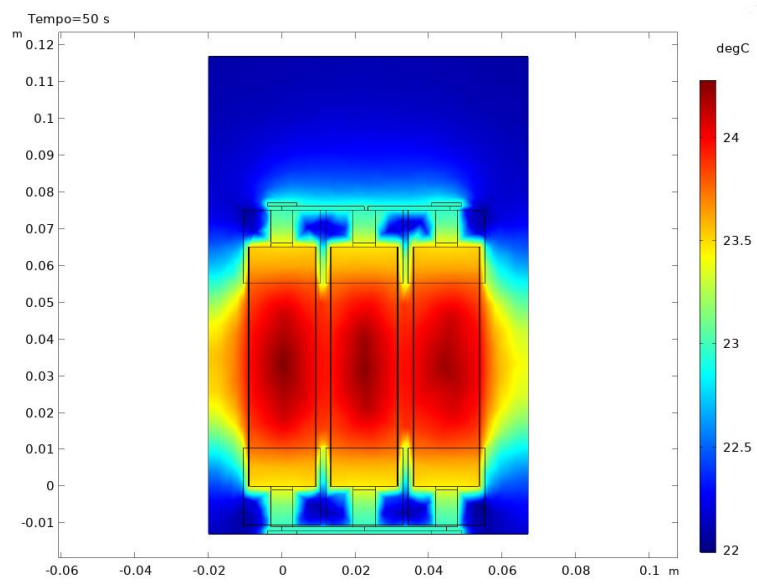


Figura 4.5 – Distribuzione di temperatura a 50 s

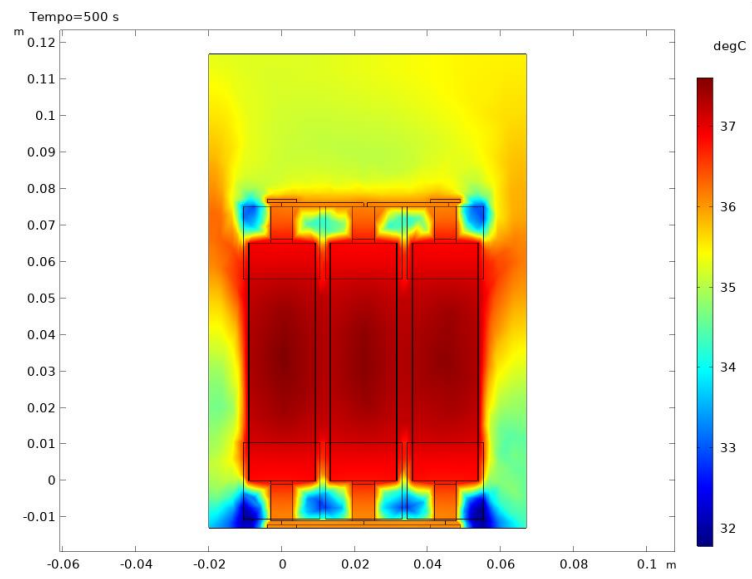


Figura 4.6 – Distribuzione di temperatura a 500 s

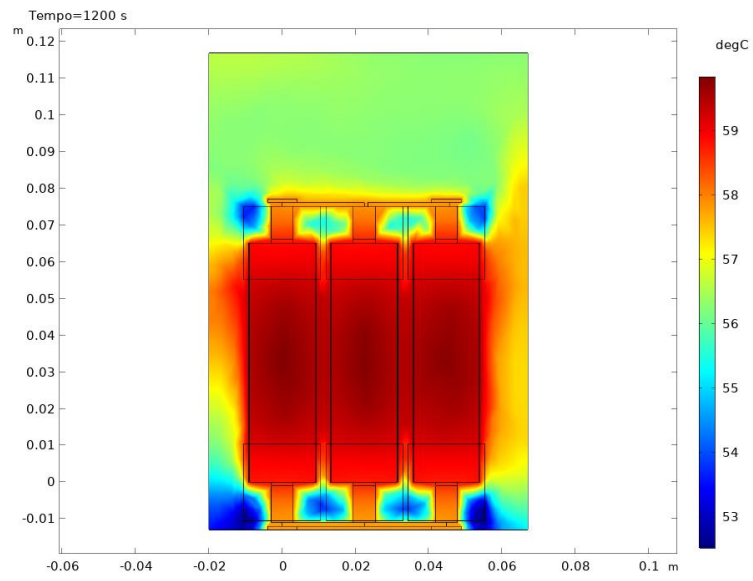


Figura 4.7 – Distribuzione di temperatura a 1200 s

Anche le isoterme sullo stesso piano evidenziano lo stesso andamento, come mostrato in figura 4.8.

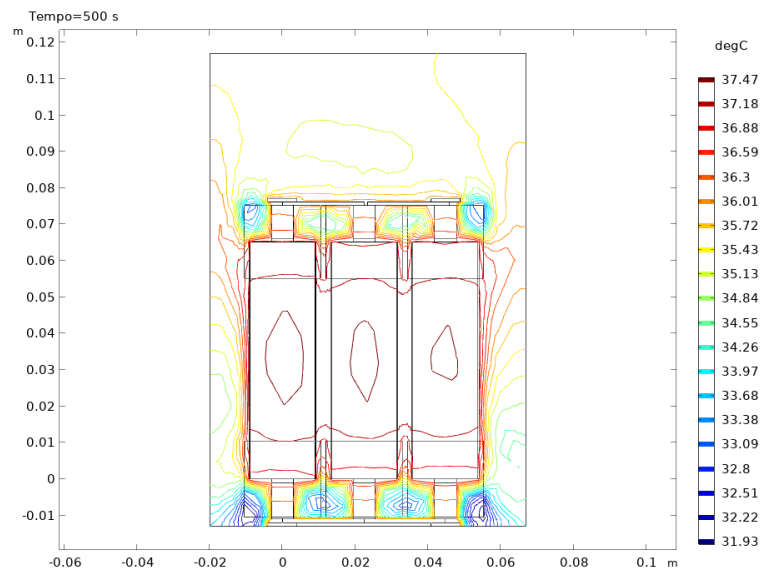


Figura 4.8 – Isotherme a 500 s

Viene riportato in figura 4.9 l'andamento di temperatura in un piano orizzontale che divide le celle in corrispondenza della loro altezza media, all'ultimo istante di tempo, 1200 secondi. Diversamente da come ci si aspetterebbe, la cella centrale non è quella con temperatura maggiore; ciò potrebbe essere dovuto al fatto che non è stato considerato nel modello l'irraggiamento tra le celle stesse.

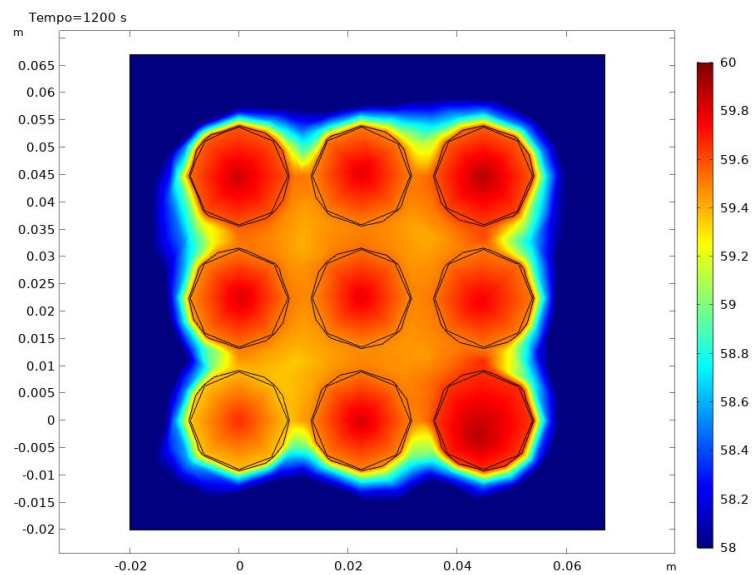


Figura 4.9 – Distribuzione di temperatura su piano orizzontale

Viene riportata in figura 4.10 anche la distribuzione di temperatura nello spazio tridimensionale, al termine della scarica, cioè a 1200 secondi.

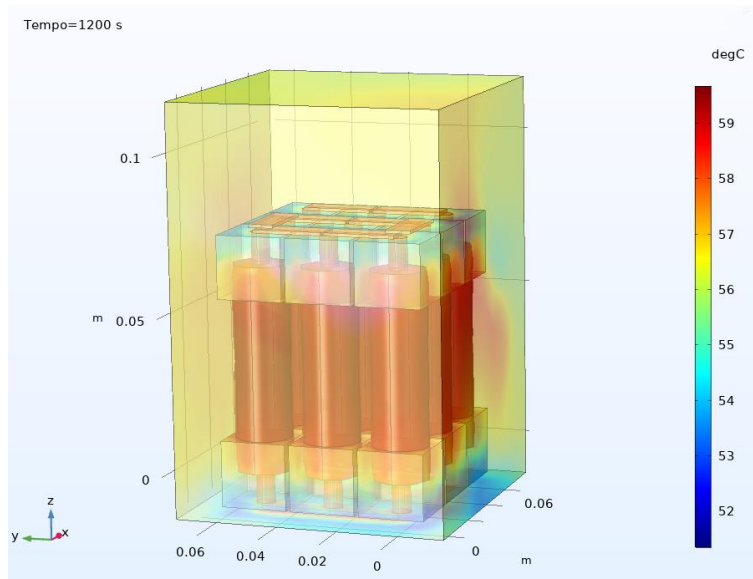


Figura 4.10 – Distribuzione tridimensionale di temperatura a 1200 s

Viene ora analizzata la distribuzione di velocità, attraverso i vettori generati dal modello all'interno del dominio fluido. La dimensione di ogni vettore disegnato è proporzionale al modulo della velocità che, non appena l'aumento di temperatura durante la scarica delle celle induce movimentazioni significative del fluido, è dell'ordine di qualche centimetro al secondo, e rimane tale fino alla fine della simulazione.

La condizione al contorno sulla velocità imposta al fluido all'istante iniziale è di velocità nulla. Per questo, nella prima parte della simulazione non è possibile osservare l'instaurazione di moti dell'aria dato che le velocità sono molto basse, e occorre aspettare del tempo affinché vengano indotti movimenti dell'aria da aumenti di temperatura.

Il flusso si sviluppa principalmente nel volume laterale compreso tra la superficie esterna delle celle e la parete interna del dominio fluido in cui è immerso lo stesso, non tra le celle dove il movimento è più limitato perché gli spazi sono molto ristretti. L'ostacolo maggiore è rappresentato dai distanziali che non permettono all'aria di salire verticalmente.

Quello che è possibile osservare è che l'aria a contatto con la cella centrale di una fila di tre celle esterne al pacco si scalda, diventa più leggera perché la sua densità si riduce e sale. Una volta raggiunta la parete superiore del dominio fluido, il flusso, non potendo proseguire, si divide in due, scendendo in corrispondenza dei due spigoli adiacenti. In ogni spigolo, il flusso è alimentato da due flussi creati dai due lati su cui insiste lo spigolo stesso. Per questo, il flusso che scende in corrispondenza di ogni spigolo ha un valore del modulo di velocità maggiore, come evidenziato dalla dimensione superiore dei vettori di velocità. La velocità dell'aria ha, invece, i valori più bassi in corrispondenza della zona al di sopra del pacco. Una volta che il flusso ha percorso l'intera lunghezza dello spigolo e ha raggiunto la parete inferiore, questo si suddivide nuovamente in due, alimentando il flusso in salita in corrispondenza delle celle centrali delle due file esterne adiacenti. Questo movimento crea due celle di ricircolo.

Data la simmetria del problema, il campo di velocità che si sviluppa allo stesso modo anche nelle altre zone, creando due celle di ricircolo in corrispondenza di ciascuno spigolo, per un totale di otto celle di ricircolo. Tale movimento si ripete per tutta la durata della simulazione. In figura 4.11 è possibile osservare l'andamento descritto all'istante di tempo di 500 secondi.



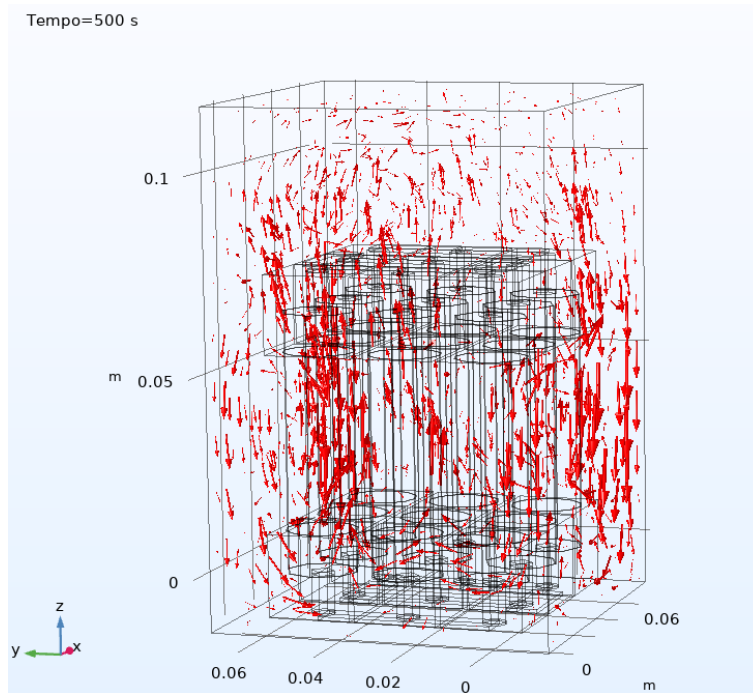


Figura 4.11 – Distribuzione tridimensionale della velocità

## 5 CONTROLLO TERMICO DELLA BATTERIA

---

Dopo aver simulato il comportamento del pacco batterie formato da tre serie di tre celle in parallelo immerse all'interno di un dominio fluido costituito da aria, si ripete la stessa prova assegnando al dominio le caratteristiche del Novec 7000. Anche in questo caso, i risultati della modellazione numerica vengono confrontati con quelli sperimentali.

L'obiettivo è quello di valutare i possibili effetti sulla temperatura superficiale delle celle che costituiscono il pacco batterie in seguito all'immersione nel Novec 7000, attraverso il confronto dei risultati ottenuti durante la precedente prova di scarica eseguita in aria.

Il Novec 7000 non è presente all'interno della libreria dei materiali del software utilizzato, per cui è stato utilizzato un materiale vuoto a cui sono state assegnate le caratteristiche richieste dal programma per effettuare la simulazione, ricavandole dal suo datasheet.

Il modello utilizzato per la simulazione viene mantenuto del tutto identico a quello già descritto nel caso dell'aria, fatta eccezione per il materiale in cui è immerso il pacco, e sono state misurate nuovamente le stesse grandezze seguendo lo schema precedente.

## 5.1 IL NOVEC 7000

Il Novec 7000 (metossieptafluoropropano  $C_3F_7OCH_3$ ) è un fluido basso bollente, con temperatura di ebollizione di 34 °C, e dielettrico, con costante dielettrica di 7,4. Queste caratteristiche lo rendono adatto ad essere utilizzato nel controllo termico di componenti elettronici.

In figura 5.1 vengono riportate le sue principali caratteristiche fisiche a 25 °C.

Properties	Units	3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid
Boiling Point (@ 1 atm)	°C	34
Freeze/Pour Point	°C	-122
Molecular Weight	g/mol	200
Critical Temperature	°C	165
Critical Pressure	MPa	2.48
Vapor Pressure	kPa	65
Latent Heat of Vaporization	kJ/kg	142
Liquid Density	kg/m <sup>3</sup>	1400
Coefficient of Expansion	K <sup>-1</sup>	0.0022
Kinematic Viscosity	cSt	0.32
Kinematic Viscosity (@ -80°C)	cSt	2.0
Kinematic Viscosity (@ -120°C)	cSt	17
Absolute Viscosity	cP	0.45
Specific Heat	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	1300
Thermal Conductivity	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	0.075
Surface Tension	dynes/cm	12.4
Solubility of Water in Fluid	ppmw	~60
Solubility of Fluid in Water	ppmw	<5
Solubility of Air in Fluid	Vol%	~31
Dielectric Strength (0.1" gap)	kV	>25
Dielectric Constant	–	7.4
Volume Resistivity	Ohm-cm	10 <sup>9</sup>

Figura 5.1 – Principali caratteristiche fisiche del Novec 7000 a 25 °C.

Un'altra importante caratteristica di tale fluido è la sua alta volatilità. Infatti, possiede un residuo non volatile inferiore a 25 ppm.

I parametri da cui dipende il comportamento termico ed elettrico del Novec 7000 vengono di seguito analizzati. Inoltre, vengono riportati gli andamenti di conducibilità termica, densità e calore specifico in funzione della temperatura nelle figure 5.2, 5.3 e 5.4.

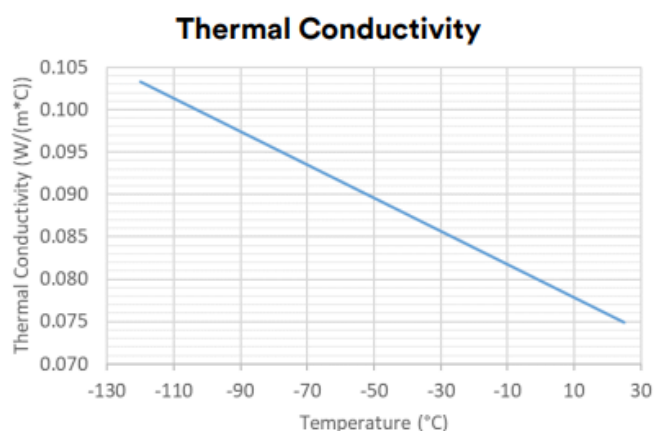


Figura 5.2 – Andamento della conducibilità termica in funzione della temperatura

La conducibilità termica rappresenta la capacità del liquido di trasferire al suo interno calore per sola conduzione e diminuisce all'aumentare della temperatura. Attorno alla temperatura ambiente, in cui si svolge la sperimentazione, la conducibilità termica assume i valori più bassi, che rendono il fluido paragonabile ad un isolante termico.

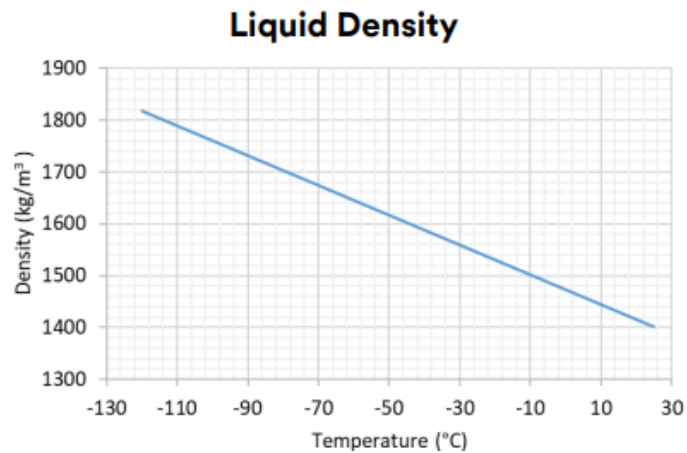


Figura 5.3 – Andamento della densità in funzione della temperatura

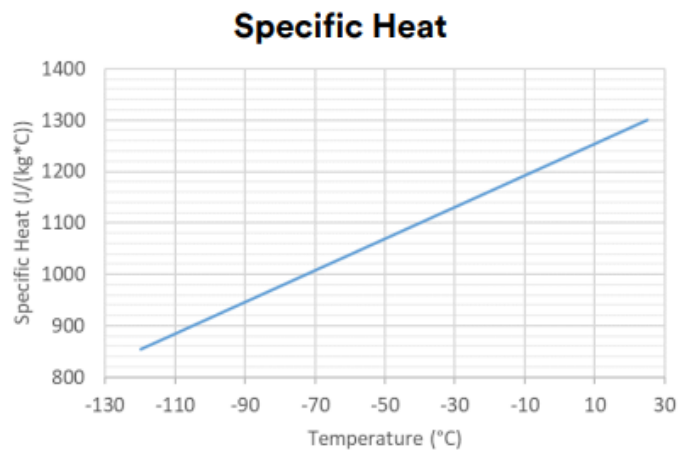


Figura 5.4 – Andamento del calore specifico in funzione della temperatura

La densità diminuisce all'aumentare della temperatura, mentre il calore specifico aumenta. Il prodotto di calore specifico e densità è la capacità termica, e indica l'attitudine del materiale ad immagazzinare calore, aumentando la sua temperatura. Il rapporto tra la conducibilità termica e la capacità termica viene definito diffusività termica. Tale parametro permette di descrivere quanto velocemente si propaga il calore all'interno di un materiale in condizioni non stazionarie, e fornisce un'indicazione sullo

spessore dello strato limite termico sulla superficie delle celle. Se la conducibilità termica è alta e la capacità termica è bassa, la diffusività termica è alta e il calore viene trasmesso velocemente, piuttosto che immagazzinato dal materiale. A temperatura ambiente, la diffusività termica del Novec 7000 è piuttosto bassa. Per questo, in condizioni non stazionarie, quali quelle sperimentali in cui il calore generato dal pacco batterie varia nel tempo, il fluido tende ad immagazzinare il calore, piuttosto che a trasferirlo.

Inoltre, presenta un basso valore di viscosità cinematica a temperatura ambiente, che determina una bassa capacità di asportare calore per convezione, in quanto non viene creato uno strato limite cinematico sufficientemente spesso sulla superficie delle celle durante i moti convettivi indotti dalle variazioni di temperatura.

## 5.2 PROVE DI SCARICA COSTANTE

Vengono ora riportati i risultati della simulazione di una scarica costante a 3C del pacco batterie formato da tre serie di tre celle in parallelo immerso in un dominio fluido a cui sono assegnate le caratteristiche del Novec 7000.

Nel precedente lavoro di tesi già citato [1], è stato osservato un aspetto che necessitava di essere ulteriormente indagato. Infatti, durante le prove di scarica, si è notato un abbassamento della curva di voltaggio della cella immersa nel Novec 7000 rispetto a quella in aria, che portava ad una interruzione anticipata delle prove. Ciò ha messo in evidenza che tale fluido ha una cattiva influenza sulle prestazioni elettriche delle celle, del tutto inaspettata date le ottime caratteristiche dielettriche che possiede, che porta ad una riduzione della potenza che le stesse possono erogare.

Nel modello numerico non è possibile verificare quale possa essere la causa, dato che la fisica applicata ad ogni cella non viene modificata assegnando il materiale Novec 7000 al dominio fluido che le circonda. Pertanto, gli andamenti di voltaggio sono gli stessi sia nel caso in aria che a seguito dell'immersione nel Novec 7000.

Anche con l'andamento della potenza termica in questa simulazione rimane del tutto uguale a quello ottenuto durante la simulazione del pacco in aria. Pertanto, l'attenzione maggiore è stata posta sulle differenze di temperatura nelle due simulazioni. Infatti, le temperature nella simulazione con Novec 7000 vengono calcolate negli stessi undici punti di quella con aria, ed è possibile eseguire un confronto. Anche in questo caso, vengono riportate le differenze tra le temperature calcolate e la temperatura iniziale, in funzione dello stato di carica, in figura 5.5.

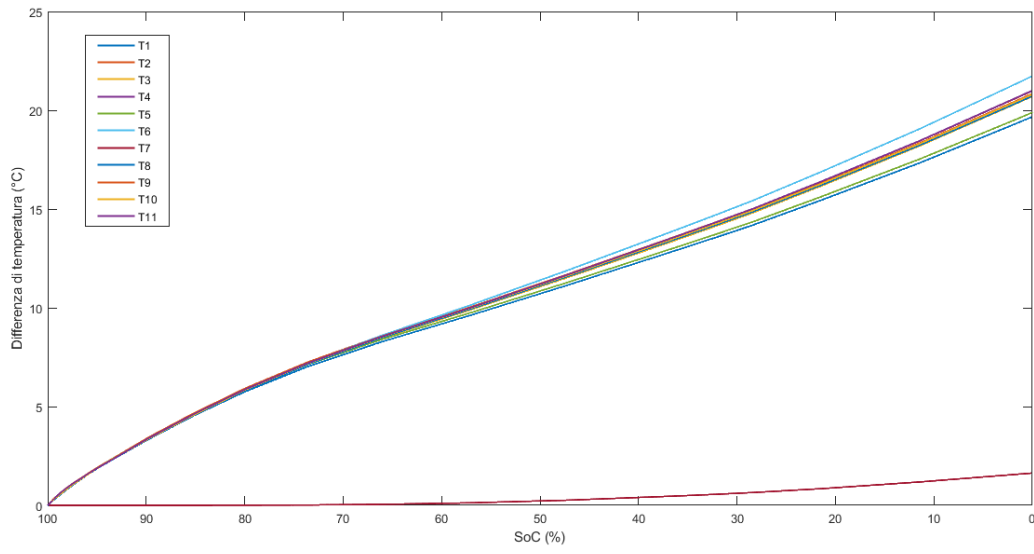


Figura 5.5 – Andamento delle differenze di temperatura in funzione dello stato di carica



Le differenze di temperatura nei punti posti sulle superfici delle celle e tra queste presentano andamenti del tutto sovrapponibili fino al 70% di SoC, quando viene raggiunta una temperatura che è prossima a quella di ebollizione del Novec 7000. A questo punto gli andamenti tendono ad allontanarsi tra loro, fino al termine della scarica, dove raggiungono la massima distanza tra loro, anche se pur sempre piuttosto contenuta, all'interno di 3°C. Tale allontanamento non è stato osservato nella precedente simulazione, in cui le temperature hanno avuto andamenti sovrapponibili per tutta la durata della scarica. Al termine della prova, la differenza di temperatura massima è compresa tra 22 e 19 °C, contro gli oltre 37 °C della simulazione in aria. Il Novec 7000 è stato in grado di mantenere la differenza di temperatura più bassa di circa 17 °C, confermando la possibilità di poter sviluppare un sistema di controllo termico basato su tale fluido anche nel caso di un pacco batterie.

La sonda che misura la temperatura in corrispondenza della parete del dominio fluido non risente della generazione di calore indotta dalla scarica delle celle fino a che queste non hanno raggiunto il 60% di SoC. Oltre tale valore, l'aumento è molto contenuto e si mantiene al di sotto di 2 °C al termine della scarica. La differenza con la stessa sonda nella simulazione in aria è evidente: quest'ultima ha subito un aumento di temperatura di 36 °C. Ciò è dovuto al fatto che il calore non riesce a propagarsi nel Novec 7000 come in aria. Inoltre, presenta un andamento molto più pulito rispetto al caso precedente, in quanto non è presente alcun tipo di fluttuazione.

In figura 5.6, viene riportato il confronto tra la differenza di temperatura numerica e sperimentale del punto uno, posto sulla superficie della cella al centro del pacco batterie, quella nella condizione più sfavorita.

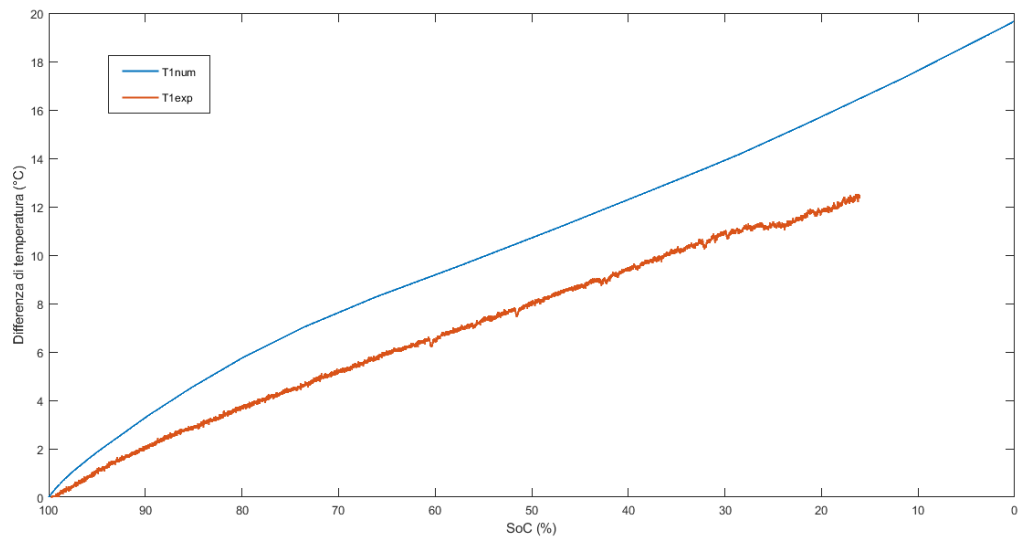


Figura 5.6 – Confronto tra la differenza di temperatura numerica e sperimentale del punto 1

Nella simulazione eseguita in aria, le due curve hanno avuto andamenti quasi sovrapponibili nella prima parte della scarica, mentre nel Novec presentano da subito una piccola differenza. Nel complesso, è possibile anche in questo caso considerare che la modellazione è in grado di rappresentare l'andamento reale ottenuto dalla termocoppia posta sullo stesso punto del pacco batterie, in quanto la differenza massima è di circa 4 °C. Tuttavia, è possibile notare che, in corrispondenza della temperatura di ebollizione, la curva sperimentale presenta un certo appiattimento che non si nota nella curva numerica, segno che il fluido sta asportando una quantità maggiore di calore che viene generato dal pacco batterie.

La curva numerica è superiore a quella sperimentale poiché il modello utilizzato non considera la formazione di bolle che si muovono nel dominio fluido, e non viene valutata la componente di convezione dovuta allo spostamento delle bolle sulla superficie della cella.

Per osservare l'andamento di temperatura, è stato costruito un piano verticale che passa per il centro della fila centrale di tre celle. All'istante iniziale tutti i domini si trovano alla stessa temperatura, pari a quella ambiente, impostata come condizione al contorno. Alle celle viene applicata la corrente di scarica e iniziano a scaldarsi. Immediatamente, è possibile osservare la differenza con la scarica eseguita in aria. Confrontando gli stessi istanti di tempo, si nota che la temperatura delle celle è inferiore, in particolare nelle parti più esterne delle stesse, che sono bagnate dal fluido, ma soprattutto che la porzione di fluido interessata dall'aumento di temperatura è molto limitata.

Nella precedente simulazione l'aria a contatto con le celle aumentava la sua temperatura, salendo verso l'alto a causa della riduzione della densità. Per questo, tutto il dominio di aria è stato interessato dall'aumento di temperatura. Diversamente, in questa simulazione, l'aumento di temperatura non è in grado di mettere in movimento il fluido e il calore non può propagarsi fino ad interessare tutto il dominio fluido. Infatti, la zona di fluido più lontana dalle celle non risente della generazione di calore indotta dalla scarica e rimane al valore di temperatura iniziale.

Nelle figure 5.7, 5.8 e 5.9 vengono riportate le distribuzioni di temperatura lungo il piano già citato dopo un tempo di 50, 500 e 1200 secondi dopo l'inizio della scarica.

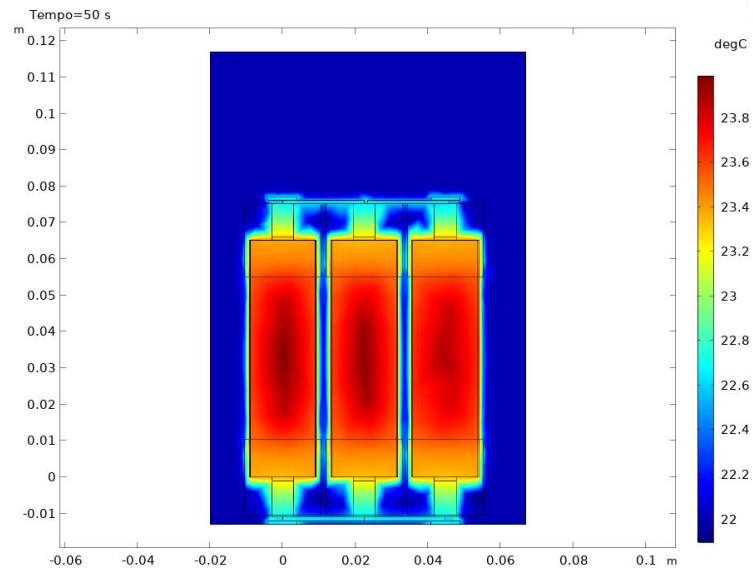


Figura 5.7 – Distribuzione di temperatura a 50 s

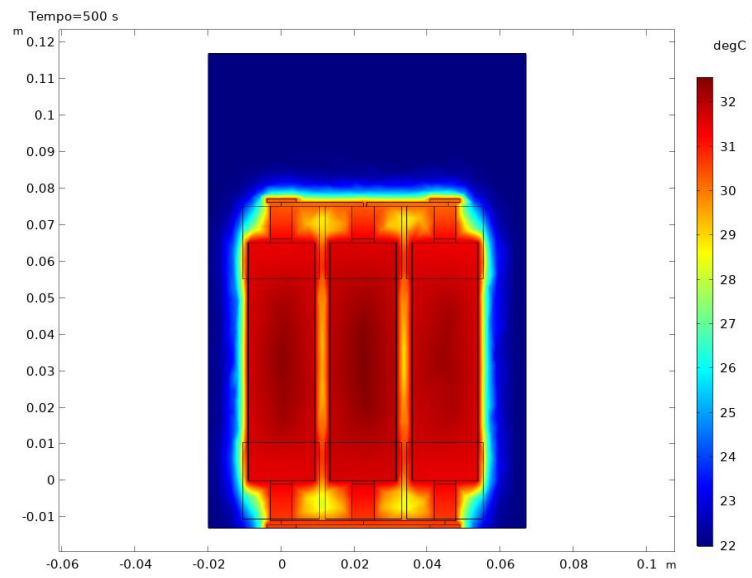


Figura 5.8 – Distribuzione di temperatura a 500 s

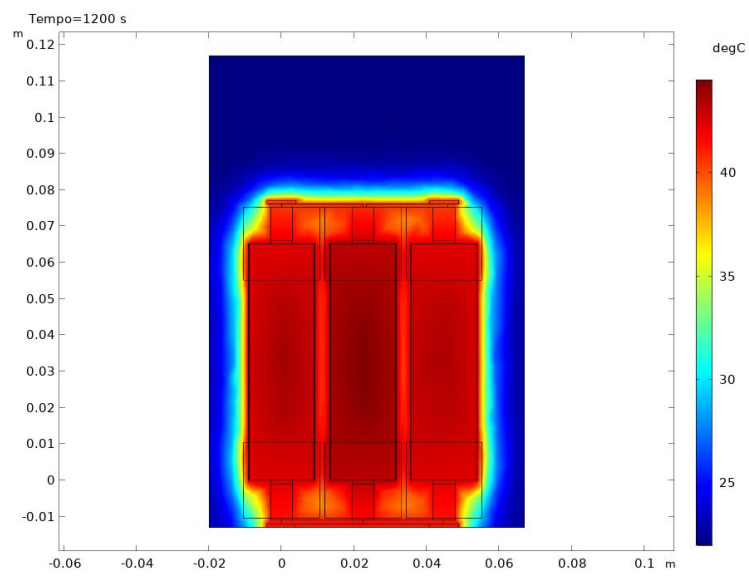


Figura 5.9 – Distribuzione di temperatura a 1200 s

Lo stesso andamento di temperatura viene confermato anche dalle isoterme sullo stesso piano, come mostrato in figura 5.10.

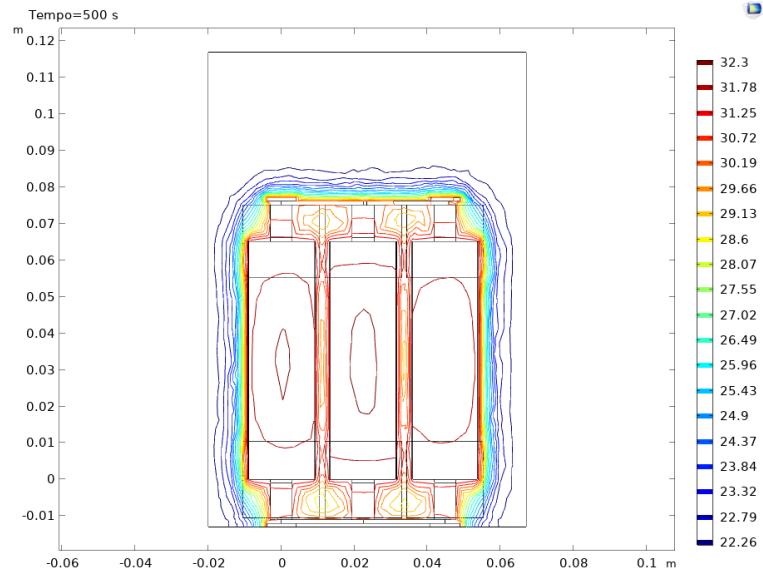


Figura 5.10 – Isotherme a 500 s

Viene riportato in figura 5.11 l'andamento di temperatura in un piano orizzontale che divide le celle in corrispondenza della loro altezza media, all'ultimo istante di tempo, 1200 secondi. La cella centrale è quella che subisce il maggior aumento di temperatura, essendo quella bagnata dalla quantità inferiore di fluido. Le celle attorno ad essa presentano una temperatura leggermente inferiore, mentre quelle più all'esterno una ancora inferiore, essendo quelle maggiormente sottoposte al raffreddamento del Novec 7000. Inoltre, è possibile osservare che è presente un gradiente di temperatura all'interno di ogni singola cella. Al centro la temperatura raggiunge il valore massimo, mentre lungo la circonferenza una temperatura più bassa perché a contatto con il Novec 7000.

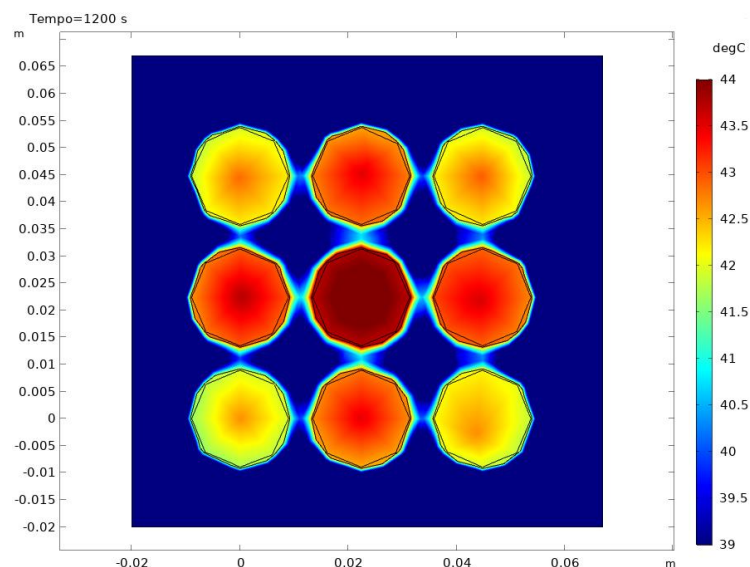


Figura 5.11 – Distribuzione di temperatura su piano orizzontale



Viene riportata in figura 5.12 anche la distribuzione di temperatura nello spazio tridimensionale, al termine della scarica, cioè a 1200 secondi.

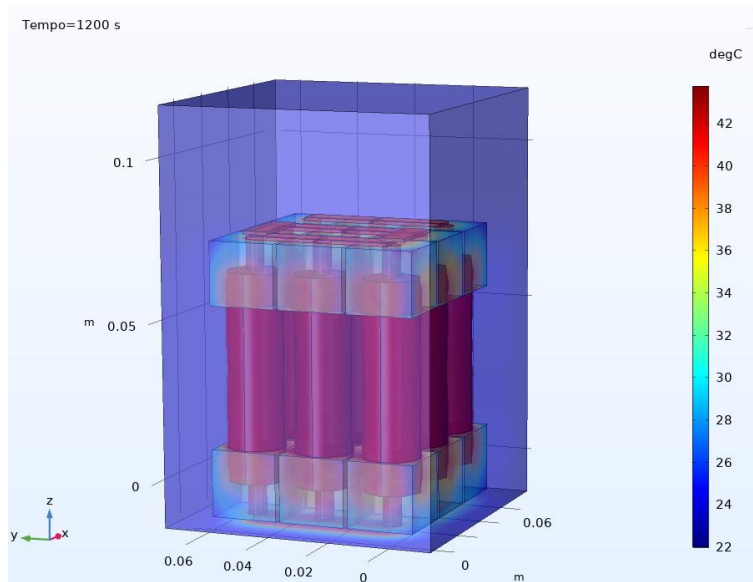


Figura 5.12 – Distribuzione tridimensionale di temperatura a 1200 s

Per quanto riguarda la velocità, diversamente dalla simulazione eseguita in aria, in questo caso non è possibile osservare l'istaurarsi di moti all'interno del dominio fluido a cui è stato assegnato come materiale il Novec 7000, ma solo andamenti casuali e valori di velocità praticamente nulli.

In questa simulazione, diversamente da quella in aria, è possibile osservare anche come le due fasi si distribuiscono nel volume fluido. In particolare, l'ebollizione interessa prima la zona dove sono disposte le celle, dove la temperatura aumenta più rapidamente. Con il progredire della scarica, una quantità sempre maggiore di fluido viene interessato dal processo di cambiamento di fase, senza però raggiungere tutto il volume e rimanendo confinata nelle zone prossime al pacco batterie anche al termine della scarica. La distribuzione viene riportata in figura 5.13, dove un valore tendente a 1 corrisponde alla fase liquido, mentre un valore tendente a 0 all'avvenuto cambiamento di fase.

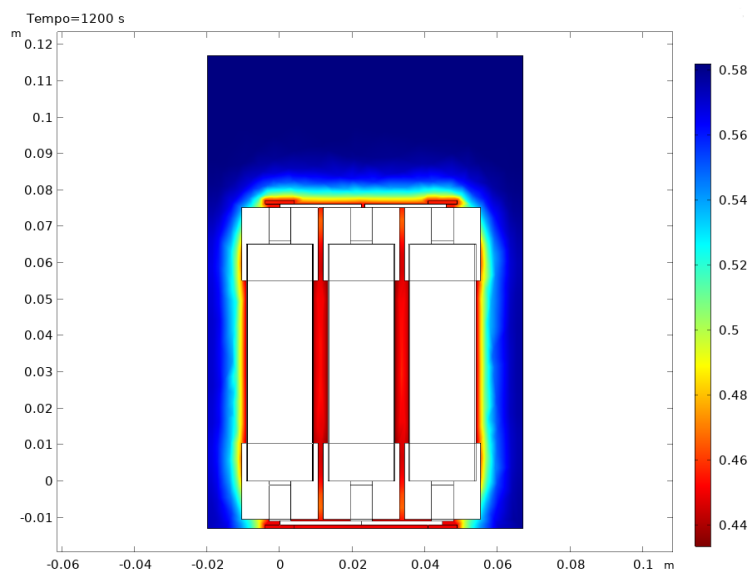


Figura 5.13 – Distribuzione delle fasi del Novec 7000

Per completezza, è stata effettuata una terza simulazione in cui il Novec 7000 non è stato definito come materiale in cambiamento di fase, per cui il calore generato dalle celle è stato asportato dal fluido mediante la sola convezione. I risultati sono molto simili a quelli ottenuti nella simulazione con cambiamento di fase, eccetto per le temperature misurate nei soliti undici punti che, naturalmente, si mantengono leggermente superiori a quelle registrate nella simulazione con ebollizione.

## CONCLUSIONI

---

Questo lavoro di tesi si inserisce in un progetto di ricerca più ampio che vuole analizzare il controllo termico di sistemi di propulsione elettrica per la mobilità sostenibile. L'obiettivo del presente studio è quello di caratterizzare il comportamento termico di batterie agli ioni di litio, gli attuali accumulatori di energia per veicoli elettrici. In particolare, si vuole valutare se un sistema di controllo termico basato su un fluido dielettrico e bassobollente, il Novec 7000, è in grado di assorbire, grazie al cambiamento di fase, i picchi di potenza termica generata da un pacco batterie, quando il motore elettrico richiede elevate correnti, come nell'applicazione presa in esame. Infatti, in una mountain bike elettrica ad alte prestazioni, durante una ripida salita, per l'elevata potenza che il suo motore deve erogare, il pacco batterie genera picchi di potenza termica.

Il Novec 7000 è stato scelto per le sue caratteristiche termiche, tra cui la temperatura di ebollizione di 34 °C, che lo rende in grado di mantenere la temperatura delle celle all'interno dell'intervallo di lavoro, nonché per le sue caratteristiche dielettriche, che lo rendono adatto ad entrare in contatto con materiale elettronico, limitando gli effetti dannosi sulle prestazioni. Inoltre, la sua compatibilità con l'alluminio, materiale scelto per la costruzione di un contenitore per il pacco batterie immerso nel Novec 7000, rappresenta un ulteriore punto di forza.

La prima parte del lavoro ha riguardato l'allestimento di un banco per la sperimentazione di un pacco batterie. È stata acquistata una mountain bike elettrica, la quale non viene alimentata dal pacco batterie di cui è equipaggiata, ma da un altro che può essere così caratterizzato sia da un punto di vista termico che elettrico. Per poter svolgere le prove all'interno del laboratorio, al posto della ruota posteriore è stato inserito un rullo interattivo, con lo scopo di simulare i percorsi reali. Per rendere la sperimentazione ripetibile, escludendo la variabilità di pedalata di una persona, è stato acquistato un motore utilizzabile per elettrificare biciclette tradizionali, collegato a

quello della bicicletta, per simulare un ciclista. Infine, è stato progettato un contenitore per il pacco batterie e il suo fluido di raffreddamento.

Terminata la prima fase di allestimento di un banco per la sperimentazione, è stata svolta la modellazione numerica di un accumulatore agli ioni di litio destinato ad alimentare bici a pedalata assistita. La modellazione è stata eseguita su un pacco batterie costituito da tre serie di tre celle in parallelo, simulando una scarica in aria e una nel Novec 7000. Ogni cella è stata scaricata con una corrente costante di 5.4 A, pari a tre volte la sua capacità, in un tempo 20 minuti.

La produzione di calore che, a causa di inefficienze interne, si accompagna inevitabilmente al fenomeno di generazione di potenza utile in una cella agli ioni di litio viene valutata nel modello attraverso l'approccio a parametri concentrati. Il calore sviluppato da ogni cella si trasferisce per conduzione all'interno dei domini solidi e, successivamente, all'interno del fluido per convezione.

Sono stati confrontati gli andamenti di temperatura in alcuni punti di interesse del pacco batterie, con aria e Novec 7000. Quest'ultimo è stato in grado di mantenere la differenza di temperatura tra le temperature calcolate e la temperatura iniziale più bassa al termine della scarica rispetto all'aria, confermando la possibilità di poter sviluppare un sistema di controllo termico basato su tale fluido anche nel caso di un pacco batterie. Inoltre, il calore non riesce a propagarsi nel Novec 7000 come in aria, e la temperatura nella zona lontano dalle celle rimane circa al valore iniziale. Per questo, non si innescano movimenti all'interno del fluido, mentre nella simulazione in aria l'aumento di temperatura ha creato celle di ricircolo che si ripetono identiche data la simmetria del problema, con velocità dell'ordine di qualche centimetro al secondo.

I risultati ottenuti dalla modellazione numerica sono stati confrontati con quelli delle prove sperimentali eseguite sullo stesso pacco batterie, a parità di condizioni, per validare il modello stesso. Il modello è adatto a descrivere la fase di scarica del pacco batterie, ma, soprattutto nell'ultimo 20% di SoC, è sempre presente una certa differenza tra i risultati numerici e sperimentali. Questa è riconducibile alla sottostima delle perdite di voltaggio all'interno del modello.

I risultati ottenuti in questo lavoro sull'analisi del comportamento del pacco batterie costituito da tre serie di tre celle in parallelo costituiscono un punto di partenza per arrivare alla sperimentazione sul pacco batterie costituito da dieci serie formate da quattro celle in parallelo, procedendo con gradualità.

Inoltre, dovrà essere conclusa la fase già iniziata di allestimento del banco sperimentale, realizzando il contenitore in alluminio per il pacco batterie progettato. Infine, occorre verificare che tutti i componenti assemblati tra loro, soprattutto quelli che permettono il collegamento meccanico tra mountain bike e motore Bafang, funzionino correttamente, senza dar luogo, ad esempio, ad eccessive vibrazioni. Inoltre, dovrà essere allestito un set up sperimentale per l'acquisizione dei valori di temperatura e voltaggio del pacco batterie. Solamente allora potranno essere svolte prove sperimentali del pacco batterie, posto all'interno del contenitore progettato e immerso nel Novec 7000, in una reale condizione di funzionamento, per poter confermare la possibilità di realizzare un controllo termico tramite Novec 7000.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Montanari F., "Caratterizzazione elettrica e termica di batterie agli ioni di litio per trazione elettrica", Tesi di Laurea, Università Politecnica delle Marche
- [2] <https://www.ilgiornale.it/news/economia/mobilit-nellera-dellelettrico-ci-sposteremo-10-anni-1887968.html>
- [3] <https://www.ilsole24ore.com/art/svolta-ue-stop-vendita-auto-benzina-e-diesel-entro-2035-AEZqmuW>
- [4] <https://blog.linear.it/codice-della-strada/bici-elettrica-e-codice-della-strada-la-normativa/>
- [5] <https://www.bicitech.it/speciale-bici-elettriche-liberta-di-movimento/il-motore-della-bici-elettrica/>
- [6] <https://www.bikeitalia.it/info-bici-elettriche/motori-bici-elettriche/>
- [7] Bettega J., "Azionamenti per cicli a pedalata assistita", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova
- [8] Pesaran, A. A., "Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions", Battery Man
- [9] Hannan, M.A., Hoque, M.M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P.J., "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations", IEEE Access
- [10] Nan Wu, Xiaolin Ye, Jiangxiao Yao, Xiao Zhang, Xuelong Zhou, Bin Yu, "Efficient thermal management of the large-format pouch lithium-ion cell via the boiling-cooling system operated with intermittent flow", International Journal of Heat and Mass Transfer
- [11] <https://www.elite-it.com/it/prodotti/app-software/my-e-training>

## RINGRAZIAMENTI

---

Queste ultime righe della tesi sono dedicate a coloro che hanno permesso la sua realizzazione.

Il primo ringraziamento va al Prof. Renato Ricci, che mi ha concesso l'opportunità di svolgere questo lavoro, e non ha fatto mai mancare la sua supervisione.

Un semplice grazie non è sufficiente nei confronti di Luca, per il tempo che mi ha dedicato e per ciò che mi ha insegnato.

Ringrazio Elena per il suo aiuto e per aver rallegrato, con la sua simpatia, ogni momento del percorso di tirocinio che ho avuto la fortuna di condividere con lei.

Infine, devo ringraziare anche il Dipartimento in cui si è svolto il lavoro, che mi ha fatto sentire da subito parte di una grande famiglia.