

## **Applicazione dell’Analisi FMEA a sistemi di accumulo elettrochimico realizzati con tecnologie Litio-ione**

**Roberto Bubbico<sup>1</sup>, Viviana Greco<sup>2</sup>, Carla Menale<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Professore associato, Università degli Studi di Roma “Sapienza”, DICMA, Facoltà di Ingegneria, [roberto.bubbico@uniroma1.it](mailto:roberto.bubbico@uniroma1.it)*

<sup>2</sup> *Ingegnere tecnico commerciale, KCE Europe*

<sup>3</sup> *Assegnista di ricerca, Università degli Studi di Roma “Sapienza”, DICMA, Facoltà di Ingegneria, [carla.menale@uniroma1.it](mailto:carla.menale@uniroma1.it)*

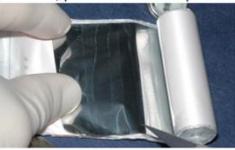
### **SOMMARIO:**

Nel presente sommario sono descritte le attività di ricerca finalizzate alla definizione di una procedura operativa per la identificazione degli scenari di pericolo associati all’impiego di sistemi di accumulo elettrochimico di energia per impianti fissi. In particolare l’obiettivo finale è stato, più che lo sviluppo di nuove tecniche, l’applicazione di tecniche standardizzate di analisi di rischio già disponibili nella letteratura tecnico-scientifica, ad un sistema di accumulo campione. Nonostante la relativa “maturità” di tali impianti tecnologici infatti, la necessità dello sviluppo di una metodologia più integrale deriva dal continuo accadimento di incidenti, di gravità variabile, associati all’utilizzo di tali sistemi anche in tempi recentissimi.

A tale scopo è stata svolta innanzitutto un’analisi critica delle principali e più comuni tecniche di identificazione degli incidenti, evidenziandone vantaggi, svantaggi, tipo e quantità di informazioni richieste per la loro effettiva applicazione, possibilità di estendere l’analisi a diversi stadi/fasi del ciclo di vita del sistema da analizzare, tempi richiesti e così via. Successivamente sono state caratterizzate le principali tipologie di sistemi di accumulo elettrochimico, con particolare riferimento ai sistemi a litio-ione, identificando le principali problematiche generate da guasti, difetti o malfunzionamenti del sistema. Queste informazioni sono state poi utilizzate per individuare, mediante criteri di scelta che hanno preso in considerazione tutti gli aspetti del sistema integrato in cui si colloca il sistema di accumulo, le tecniche più idonee alla identificazione degli scenari di pericolo caratteristici dell’impiego delle celle elettrochimiche.

L’analisi critica delle principali e più comuni tecniche di identificazione degli incidenti, ha portato ad individuare la FMEA come tecnica ottimale (ma non l’unica possibile) da impiegare in particolare per lo studio del sistema di accumulo stesso. Considerando che in generale la cella più ‘debole’ è quella che determina le performance dell’intera batteria si rende necessaria un’analisi delle condizioni dell’intero sistema a partire dalle singole celle che lo costituiscono: la tecnica FMEA è stata quindi elaborata in maniera “modulare” potendo analizzare le diverse componenti di un sistema, a partire dalla singola cella, passando poi al singolo modulo ed infine al Sistema complessivo. Pur essendo stata sviluppata per una generica installazione, come sistema di riferimento, è stato scelto per applicare la procedura di analisi di rischio selezionata, quello che alimenta la funicolare di San Vigilio a Bergamo. La particolarità della Funicolare di San Vigilio è quella di essere costituita da una sola vettura, pertanto, non avendo un contrappeso, l’azionamento elettrico dell’impianto deve fornire potenza ed energia nella fase di trazione ed assorbirne nella fase di frenatura: questa particolarità rende l’impianto ideale per l’introduzione di un accumulo elettrochimico stazionario. L’accumulo è posto all’interno di una stanza sotterranea, ventilata e che garantisce una temperatura ambiente variabile tra 15 e 20 °C sia d’inverno che d’estate. Il sistema è costituito da 480 celle EiGC020 (con chimica catodica NMC), suddivise in 10 moduli da 48 celle ciascuno; i moduli realizzati per l’autotrazione sono stati opportunamente modificati per l’uso in condizioni statiche.

Si è riscontrato come, a seconda di diversi parametri da specificare caso per caso, quali gli obiettivi sensibili selezionati, ovvero gli specifici bersagli di interesse suscettibili di danno, il contesto esterno nel quale il SA si inserisce (tipo e caratteristiche dell’impianto di utilizzo), e così di seguito, la FMEA necessita di una specifica fase di adattamento al particolare sistema analizzato.

Element	Failure Mode	Failure Cause	Consequences	Effects	Risk Mitigation Measures
					

**Elaborazione della tecnica FMEA per le batterie**

**CASO STUDIO: sistema di accumulo stazionario della funicolare di San Virgilio a Bergamo**

Questa sua facile adattabilità, inoltre, ne consente, a seguito di ulteriori adattamenti, anche l'impiego nelle diverse fasi del ciclo di vita del sistema di accumulo (stoccaggio, trasporto, fase operativa, installazione, ecc.). Allo stesso tempo, nell'ottica di un miglioramento generale del livello di sicurezza dell'intera attività operativa nella quale l'utilizzo del SA si inserisce, risulta opportuno integrare la FMEA con altre tecniche di identificazione, quale ad esempio la check-list analysis. A valle di tali considerazioni ne è derivata la definizione di una procedura generale di analisi di rischio, che può essere adattata in maniera semplice ed efficace a qualunque sistema di interesse.

Naturalmente, come sempre per queste tecniche, ma in particolare in questo caso come si è visto, quello sviluppato è un sistema "aperto" che deve essere continuamente aggiornato a seguito di nuove informazioni disponibili, ad esempio circa le modalità di guasto delle celle, le procedure operative di installazione/manutenzione, il sistema alimentato, ecc.

**Carla Menale** è attualmente assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma "Sapienza". Ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Chimica nel 2012 con votazione finale di 110/110 ed il titolo di dottore di ricerca in Ingegneria Chimica e dei Processi il 26/02/2016 con il massimo dei voti e con la menzione di Doctor Europaeus. Le esperienze di ricerca riguardano lo scambio termico con nanofluidi con particolare riguardo ai fenomeni di erosione e corrosione, l'ottimizzazione di sistemi di raffreddamento per batterie agli ioni di litio e l'accumulo di energia termica con materiali a cambiamento di fase. Svolge attività di ricerca dal 2012 presso il Laboratorio Sviluppo Processi Chimici e Termofluidodinamici per l'Energia dell'ENEA – C.R. Casaccia.



# STUDIO SULLA CARATTERIZZAZIONE DEI VARI LIVELLI DI PROTEZIONE DI SISTEMI DI ACCUMULO LITIO-IONE PER USO AUTOMOTIVE, MEDIANTE “LAYER OF PROTECTION ANALYSIS (LOPA) E APPLICAZIONE DELL’HAZOP: STUDI PRELIMINARI

**Martino Schiavetti<sup>1</sup>, Tommaso Pini<sup>2</sup>, Marco N. Carcassi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Collaboratore, Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, [martinoschiavetti@gmail.com](mailto:martinoschiavetti@gmail.com), [martino.schiavetti@ing.unipi.it](mailto:martino.schiavetti@ing.unipi.it)

<sup>2</sup> Borsista, Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale [tms.pini@gmail.com](mailto:tms.pini@gmail.com)

<sup>3</sup> Professore, Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, [carcassi@ing.unipi.it](mailto:carcassi@ing.unipi.it)

## SOMMARIO:

ENEA ha stipulato un accordo di collaborazione con l’Università di Pisa per quanto attiene all’Area D, Progetto 14. “MOBILITÀ ELETTRICA SOSTENIBILE”, Linea di ricerca A “Tecnologie e infrastrutture di ricarica di veicoli elettrici, dimensionamento in funzione della diffusione della mobilità elettrica”, Attività A3: “Sicurezza accumulo al litio”.

Sulla base delle attività previste, prendendo a riferimento una cella Litio-ione commerciale, applicando la tecnica di analisi di rischio HAZOP, sono state individuate le deviazioni dal normale funzionamento dei parametri significativi del processo nelle varie fasi di utilizzo (carica, stoccaggio e scarica), con l’intenzione di identificare cause e conseguenze delle sequenze incidentali allo scopo di verificare i diversi livelli di protezione, anche tenendo conto della presenza del BMS.

In particolare sono state individuate le fenomenologie di base che possono produrre sequenze incidentali potenzialmente pericolose (incendio, esplosione e rilascio tossico). Le sequenze incidentali individuate sono state poi caratterizzate attraverso l’inclusione dei vari livelli di protezione attraverso l’applicazione della Layer of Protection Analysis (LOPA).

La sicurezza dell’intero sistema, e la tipologia di eventi indesiderati che lo stesso potrebbe trovarsi a fronteggiare, sono risultati dipendenti sia dalle caratteristiche elettrochimiche della cella impiegata sia dalle caratteristiche del sistema di gestione del pacco nonché dalle caratteristiche di impiego del sistema.

Parte considerata:		ANODO								
Id #	Elemento	Caratteristica	Parola Guida	Deviazione	Possibile causa	Conseguenza	Severità del danno	Sistemi di sicurezza	Commenti	R ef #
5	Collettore di rame	Densità di corrente	MORE	Aumento della densità di corrente	Corto circuito esterno generato da un impatto del veicolo	Alta produzione di calore per effetto Joule e superamento dei limiti di stabilità termica della cella. Rigonfiamento del case delle celle. Drastica riduzione del voltaggio del modulo. Potenziale thermal runaway del modulo.	Alta	BMS	Il BMS è progettato per interrompere l'utilizzo del modulo nel caso di superamento di una soglia prestabilita di corrente. A seguito di un impatto il BMS potrebbe non essere attivo o in grado di svolgere l'azione richiesta	

Figura 1 – Estratto della tabella contenente i risultati dell’analisi HAZOP

Id #	Descrizione dell'evento impattante	Causa iniziatrice	BPCS	Allarmi	Mitigazioni aggiuntive	M.A. IPL	Note
1, 9, 13, 30	Reazione di corrosione chimica e dissoluzione del rame. Per potenziali di cella bassi (circa 1 V), il potenziale al collettore di corrente aumenta fino al punto in cui il rame inizia ad ossidarsi e si diffonde sotto forma di ioni all'interno dell'elettrolita. Alla seguente ricarica gli ioni di rame si accumulano sulla superficie dell'elettrodo negativo riducendo la permeabilità e rendendo la cella suscettibile alla deposizione di litio (Lithium plating). Il meccanismo accelera la degradazione della cella. Il fenomeno può portare nei casi più gravi a thermal runaway a seguito di un corto circuito interno.	Sovra scarica della cella	Il BMS è progettato per interrompere l'utilizzo del modulo al raggiungimento di un potenziale minimo sulla cella a potenziale minore.		Il BMS potrebbe includere funzioni per il riconoscimento del livello di carica e quindi identificare la sovrascarica della cella anche quando questa si verifica a seguito di un prolungato inutilizzo	- Shut down separatore - Sistema di venting	Il BMS dovrebbe essere dotato di un sistema di "autocontrollo" in modo da identificare malfunzionamenti ed interrompere qualsiasi tipo di operazione sulle batterie
3, 38	Alta produzione di calore per effetto Joule e superamento dei limiti di stabilità termica della cella. Rigonfiamento del case della cella. Drastica riduzione del voltaggio della cella. Potenziale thermal runaway.	Corrosione esterna dei terminali dei collettori e corto circuito per presenza di umidità				- Shut down separatore - Sistema di venting - Alcune progettazioni prevedono fusibili a proteggere ogni cella	Nel caso la presenza di umidità sia generata da una perdita del sistema di raffreddamento esiste la possibilità che il sistema di controllo possa identificare la presenza dell'anomalia.

Figura 2 – Estratto della tabella contenente i risultati dell'applicazione della LOPA

### Breve CV gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro, composto dagli ingegneri Pini e Schiavetti, e guidato dal Prof Marco Carcassi, ha esperienza in sicurezza industriale, con particolare riferimento alla applicazione di tecniche di analisi del rischio quali HazOp, Fault tree ed Event tree, e alla simulazione di scenari incidentali, in settori industriali diversi (impianti industriali, laboratori, pipeline networks, stazioni di rifornimento carburanti alternativi)  
Il gruppo di lavoro partecipa attivamente a progetti di ricerca sperimentale riguardanti gli effetti delle esplosioni di gas ed in particolare di idrogeno.

### Ing. Martino Schiavetti

Laureato in Ingegneria Nucleare (Sicurezza industriale e nucleare) nel 2006, libero professionista dal 2010, collabora dal 2006 con l'università di Pisa e con diversi studi di Ingegneria su tematiche legate all'analisi del rischio e sicurezza industriale nonché su progetti di ricerca relativa alle esplosioni di gas.

Tecnico abilitato alla prevenzione incendi, iscritto negli elenchi del Ministero dell'interno di cui all'articolo 16 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139 dal 2013.



# IL BATTERY MANAGEMENT SYSTEM: AFFIDABILITÀ E RATEI DI GUASTO

**Roberto Roncella<sup>1</sup>, Federico Baronti, Andrea Carloni,  
Roberto Di Rienzo, Roberto Saletti**

<sup>1</sup> *Professore associato, Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII),  
[roberto.roncella@unipi.it](mailto:roberto.roncella@unipi.it)*

## SOMMARIO:

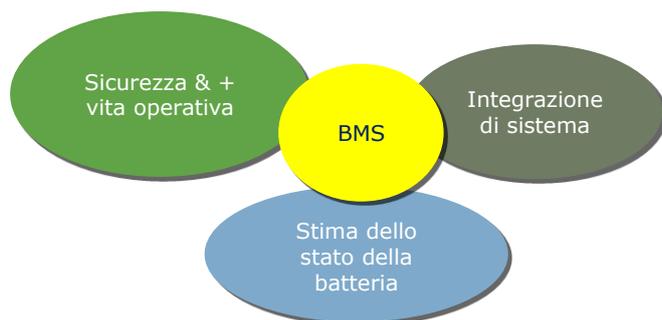
La possibilità di funzionamento in sicurezza di un sistema di accumulo energetico basato su celle agli ioni di litio è di norma affidata a un sistema elettronico di monitoraggio e controllo (BMS). Nelle intenzioni dei progettisti, tra le altre cose, il BMS misura costantemente: tensioni, correnti e temperature e agisce sull'erogazione di potenza in modo da mantenere gli elementi al litio all'interno della loro area sicura di funzionamento. Nel presente intervento sono esaminate le problematiche dovute al fatto che le capacità del BMS non sono spesso conosciute nel dettaglio, oppure sono sovrastimate e in molti casi non si tengono nel conto dovuto i possibili guasti che, senza una adeguata diagnostica, possono alterare una o più funzionalità essenziali al mantenimento della sicurezza. Sono esaminati infine i possibili guasti del BMS che, in particolari circostanze, possono determinare direttamente situazioni di pericolo.

### Parte 1: funzionalità del BMS

I circuiti elettronici presenti in una batteria agli ioni di litio, indicati con l'acronimo BMS (Battery Management System), possono svolgere molteplici compiti, sinteticamente raggruppati in 3 aree secondo la Figura 1. Ai fini della sicurezza della batteria stessa e anche con la finalità di aumentare la vita operativa, un BMS *ideale* esegue il monitoraggio di tensione e temperatura a livello di singola cella e misura la corrente complessiva, constatando che i parametri operativi siano all'interno dell'area di funzionamento sicuro (SOA) definita dal produttore della cella. Nel caso in cui sia rilevata una tendenza all'uscita dalla SOA, il BMS attiva segnalazioni di preallarme a vari livelli ed eventualmente, anticipando situazioni di potenziale degenerazione della cella o peggior di fuga termica, interviene direttamente sul circuito, aprendolo o - in sistemi più sofisticati - riconfigurandolo. Occorre tenere presente che l'analisi di parametri operativi rispetto alla SOA può essere complicata dal fatto che alcune condizioni (per esempio correnti massime superiori al valore normale) possono essere tollerate per tempi limitati e che la valutazione delle tensioni di intervento per sovraccarica e sottoscarica può essere influenzata dalle cadute di tensioni ad alte correnti su connessioni e contatti. Il BMS si trova quindi a operare scelte di compromesso per non penalizzare eccessivamente le prestazioni. Una seconda area funzionale riguarda la capacità del BMS di eseguire stime dello stato di carica, dello stato di salute e del tempo operativo residuo della batteria. Queste importanti funzionalità hanno un impatto indiretto sulla sicurezza della batteria e del veicolo, in quanto orientano le decisioni di alto livello sulle modalità di erogazione di potenza. In sistemi in cui la sicurezza funzionale complessiva è dominante sulla sicurezza del sottosistema di accumulo (per esempio quelle aeronautiche) le funzionalità di stima assumono un ruolo essenziale. Infine, una terza area funzionale riguarda l'interfaccia del BMS con il sistema e la capacità di interagire autonomamente con gli altri sottosistemi. In numerose applicazioni infatti parte delle funzionalità di sicurezza, come la riduzione o l'azzeramento della potenza in ingresso o in uscita all'accumulatore sono demandate al sottosistema di ricarica o di utilizzazione. Inoltre, rispetto ad alcune tipologie di guasto delle celle (fuga termica indotta da cortocircuito interno) il BMS ha limitate capacità diagnostiche e per il mantenimento della sicurezza sono possibili solo interventi di confinamento.

Occorre tenere bene in mente che non tutti i BMS esistenti e utilizzati su veicoli (comprese biciclette a pedalata assistita, ciclomotori, motoveicoli, quadricicli fino ad arrivare ad auto, autocarri e autobus) implementano tutte le possibili funzioni di un BMS *ideale* e con il medesimo livello di affidabilità. La conoscenza dei sistemi utilizzati in pratica e dei livelli di funzionalità implementati effettivamente è quindi fondamentale per chi ha un ruolo nella prevenzione degli incidenti o negli interventi per mitigarne gli effetti.

**Figura 1**



**Fotografia 2**



### Parte 2 - Guasti che hanno effetti sulla sicurezza

Naturalmente tutti i guasti, e particolarmente quelli non autodiagnosticati, che hanno effetto sulle funzionalità di sicurezza saranno causa di rischio e richiederanno metodologie progettuali in grado di aumentare l'affidabilità e ridurre i ratei di guasto a livelli "accettabili".

### Parte 3 - Guasti che producono direttamente situazioni di pericolo

Se in genere è vero che la maggior parte dei guasti del BMS non ha conseguenze catastrofiche immediate sulla sicurezza, viste le ridotte dimensioni e le proprietà autoestinguenti dei materiali usati per l'assemblaggio elettronico, alcune categorie di guasto, relative a circuiti e componenti direttamente connessi alle celle, costituiscono una eccezione significativa.

Nella maggior parte delle architetture, le tensioni delle singole celle vengono portate direttamente all'elettronica di misura e in alcuni casi queste connessioni sono usate anche per il bilanciamento di carica tra le celle. In questo secondo caso, per migliorare le prestazioni del sistema di bilanciamento (tempi) si tende a usare connessioni in grado di portare correnti significative e, a volte, a rinunciare a una protezione passiva tramite fusibile. In funzione del tipo di bilanciamento scelto possono inoltre essere previsti interruttori a stato solido in grado potenzialmente di connettere con percorsi a bassa impedenza punti della batteria a potenziali diversi.

Nella fotografia 2 possiamo vedere le gravi conseguenze di un errore procedurale in sede diagnostica (riprogrammazione della scheda con batterie connesse), che ha determinato un cortocircuito (in questa architettura non protetto da fusibile) tra tutte le celle con la nascita di un conseguente principio di incendio.

**Il Prof. Roberto Roncella** ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Pisa nel 1984. Nel 1989 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca. Ha poi prestato servizio come borsista del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CSMDR, Pisa). Dal 1990 presta servizio presso il "Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione" (DII) dell'Università di Pisa, prima come Ricercatore e dal 1998 come professore associato. Nel 2017 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale a professore ordinario. Svolge attività come referee per diverse riviste internazionali.



Le sue attività di ricerca sono orientate al progetto e collaudo di circuiti integrati ad alta prestazione, quali circuiti per linee di ritardo ad alta risoluzione o circuiti a bassa dissipazione di potenza, alla proposta di nuove architetture VLSI per l'elaborazione numerica dei segnali e più recentemente, alla realizzazione di sistemi elettronici per la gestione e la sicurezza di sistemi basati su accumulatori al litio. In collaborazione con ENEA, è stato responsabile dello sviluppo di un sistema di "battery management system" per un modulo costituito da celle al litio destinato ad applicazione in veicoli "off-road". Nell'ambito di ricerche con finanziamento industriale, si occupa della progettazione di sistemi innovativi applicati all'ambito biomedicale, automobilistico, con particolare riferimento ai sistemi elettronici per le due ruote, e relativi alla gestione di sistemi di "energy storage" basate su accumulatori con chimica al litio per diverse applicazioni. Sulle proprie attività ha pubblicato più di cento lavori su riviste o atti di congressi internazionali.

- <http://ieeexplore.ieee.org/document/6708416/>
- <http://ieeexplore.ieee.org/document/6327671/>
- <http://ieeexplore.ieee.org/document/7981623/>
- <http://ieeexplore.ieee.org/document/7981558/>
- <http://ieeexplore.ieee.org/document/7841433/>

# Caratterizzazione e simulazione del comportamento termico: capacità termica, calore generato e distribuzione della temperatura in condizioni di normale funzionamento

**Francesco D'Annibale<sup>1</sup>, Carla Menale<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Primo ricercatore, ENEA CR Casaccia, Laboratorio DTE-PCU-SPCT, [francesco.dannibale@enea.it](mailto:francesco.dannibale@enea.it)*

<sup>2</sup> *Assegnista di ricerca Università di Roma "Sapienza", DICMA, [carla.menale@uniroma1.it](mailto:carla.menale@uniroma1.it)*

## **SOMMARIO:**

Le batterie agli ioni di Litio possono andare incontro ad innalzamenti indesiderati di temperatura che ne compromettono il funzionamento ottimale, per cui si ha la necessità di rimuovere in maniera efficace il calore prodotto. Questo aspetto è importante non solo per il corretto funzionamento delle batterie, la cui vita media diminuisce notevolmente all'aumentare della temperatura di funzionamento, ma soprattutto ai fini della sicurezza. Il superamento della temperatura massima ammissibile può portare all'innescarsi di reazioni esotermiche distruttive con ulteriore rapido aumento della temperatura, non più controllabile. Questa situazione incidentale, definita "thermal runaway", già pericolosa in sé per lo svilupparsi di grandi quantità di calore da una singola cella, può ulteriormente divergere con la propagazione alle altre celle del modulo, fino all'incendio o l'esplosione dell'intero pacco batterie.

Le due principali cause dello sviluppo di calore sono l'effetto joule dovuto al passaggio di corrente nella resistenza interna (calore irreversibile) e le variazioni di entropia nelle reazioni elettrochimiche (calore reversibile). All'aumentare della corrente il secondo cresce molto meno del primo diventando trascurabile per le correnti di interesse nelle analisi di sicurezza.

Per il calcolo del comportamento termico di una batteria in condizioni di normale funzionamento, oltre alla conoscenza del calore generato (e quindi della resistenza interna), sono necessari alcuni altri parametri caratteristici della batteria come la capacità termica, la conducibilità termica e il coefficiente di scambio termico tra la parete e il fluido di raffreddamento, che normalmente non sono disponibili e devono essere ottenuti con misure sperimentali. Bisogna inoltre tenere presente che questi parametri dipendono, per una stessa batteria, anche da altri aspetti quali l'invecchiamento, lo stato di carica e la non uniformità spaziale, che rendono ancora più complessa la loro misura.

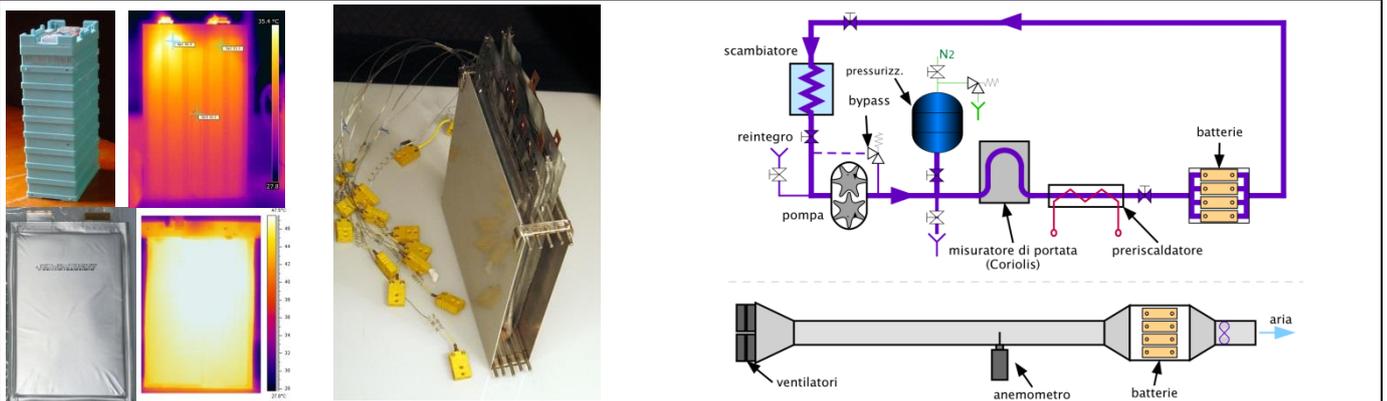
Ad esempio il calore generato, oltre a dipendere dalla temperatura e dallo stato di carica, aumenta con l'invecchiamento e di solito presenta delle zone più calde. La capacità termica, cioè quantità di calore da accumulare per un grado di aumento di temperatura, dipende dai materiali che compongono la batteria che normalmente non sono tutti noti. Anche la conducibilità termica, che misura la rapidità con cui il calore attraversa uno spessore, dipende dai componenti e dalla loro disposizione. Si vede quindi come per prevedere il comportamento termico nelle varie condizioni di esercizio e valutare le prestazioni delle diverse modalità di asportazione del calore, bisogna dapprima caratterizzare la batteria con misure delle varie proprietà fisiche.

E' necessario poi poter calcolare il coefficiente di scambio termico con il fluido, che dipende da moltissimi fattori sia relativi al fluido che alla superficie e alla geometria del canale.

Per la valutazione complessiva delle prestazioni di un sistema di raffreddamento si ha quindi la necessità di un calcolo locale (normalmente con metodi agli elementi finiti) dei passaggi di calore all'interno della batteria e verso il fluido, da iterare poi per tutta la durata della fase da simulare, che può essere anche di ore. Considerando quindi che tale valutazione può essere molto complessa, si rende necessario poter effettuare alcune prove sperimentali che permettano di validare i modelli e le correlazioni usate.

Per ottenere una buona affidabilità di queste simulazioni si sta procedendo con diverse azioni:

- Per la simulazione numerica bisogna tenere presente che l'uso di codici CFD, oltre all'elevato tempo di calcolo, comporta in molti casi un notevole lavoro di sviluppo per ogni variazione, limitando quindi il numero di casi da valutare. E' stato allora sviluppato ed implementato un modello termico della cella e del canale di raffreddamento, realizzando un programma che permette di simulare i transitori termici in modo semplice e veloce sia nell'impostazione che nel calcolo.



*Nelle figure sono mostrate termografie di batterie, l'emulatore di celle nel contenitore e gli schemi dei circuiti sperimentali.*

La sua validazione sarà effettuata con i dati sperimentali per diverse condizioni (ottenuti sia per i singoli aspetti che per l'oggetto completo), ed anche con l'analisi delle eventuali discrepanze attraverso alcune simulazioni CFD che permettano di controllare il peso delle diverse semplificazioni adottate.

- Per le prove sperimentali, viste le difficoltà e i tempi necessari per eseguirle su batterie vere, si è realizzato un emulatore in piena scala di un pacco di celle con cui misurare rapidamente il coefficiente di scambio e l'evoluzione termica in vari transitori di potenza. Questo permetterà di disporre di una buona casistica per il confronto e l'affinamento delle simulazioni numeriche. Tale emulatore è installato in un impianto sperimentale che permette di testare diversi metodi di raffreddamento.

Per assicurare una buona affidabilità dei dati sperimentali ottenuti, è necessario disporre di misure precise soprattutto per le temperature. E' stato quindi realizzato un sistema di taratura per le termocoppie che permette di calibrare la catena di misura completa (sensori, cavi e schede), ottenendo in maniera automatica un cospicuo numero di punti nell'intervallo di temperatura di interesse.

I primi sistemi di raffreddamento da testare saranno:

- Aria (basso costo e facile manutenzione, ma non uniformità di temperatura e rimozione di calore non efficace in condizioni di abuso);
- Oli dielettrici in contatto diretto (potenzialmente molto efficaci, da valutare attentamente);
- Materiali a cambiamento di fase (temperatura costante al punto di fusione, ma risposta lenta e possibile pericolosità dei materiali);
- Acqua circolante in piastre (maggiore uniformità, ma rischi di cortocircuito in caso di rotture).

**Francesco D'Annibale**, laureato nel 1983 in Ingegneria Nucleare presso l'Università di Roma "La Sapienza", alla fine del 1984 (dopo il servizio militare di leva e una collaborazione con il Dipartimento Energetica dell'Università di Roma "La Sapienza") è stato assunto all'ENEA, dove ha lavorato su vari aspetti dello scambio termico e termoidraulica: efflussi critici bifase, crisi termica, condensazione ed ebollizione per contatto diretto, misura della conducibilità termica, scambio termico in convezione mista, raffreddamento di fumi ad alta temperatura, forze di getto, moto delle bolle, drenaggio di sali fusi, ebollizione in assenza di gravità, scambio termico e corrosione dei nanofluidi, accumulo di energia termica con PCM (materiali a cambiamento di fase), gestione termica delle batterie al litio.

Attualmente è Primo Ricercatore presso il Laboratorio Sviluppo Processi Chimici e Termofluidodinamici per l'Energia dell'ENEA – C.R. Casaccia.

E' coautore di oltre 60 pubblicazioni su riviste internazionali e/o presentate in congressi nazionali e internazionali.

