



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione di un modulo batteria per applicazioni Second Life

M. Pasquali, F. Vellucci, S. Constà

Progettazione di un modulo batteria per applicazioni Second Life.

S. Constà, F. Vellucci, M. Pasquali,

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.2 "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti"

Work package: *WP1 - Accumulo elettrochimico*

Linea di attività: *LA 25 - Progettazione di un modulo di second life*

Responsabile del Progetto: Ing. Giulia Monteleone

Responsabile del Work package: Dr. Pier Paolo Prosini

Indice

Sommario	4
1 Introduzione	5
2 Descrizione delle attività svolte e risultati.....	6
2.1 <i>La sicurezza dei sistemi di accumulo – Livelli di protezione</i>	6
2.1.1 Protezione a livello della cella	9
2.1.2 Protezione a livello di contenitore	10
2.1.3 Il BMS.....	11
Accumulo stazionario: il Rack e l’ambiente di installazione.....	13
2.2 <i>Impostazione del lavoro</i>	15
2.2.1 Costruzione con componentistica standard – I Rack.....	15
2.2.2 SubRack	17
2.2.3 Schede standard per circuiti stampati.....	18
2.2.4 Connettori.....	20
2.2.5 Considerazioni generali su materiali, geometria ed altre caratteristiche	22
2.2.6 Esempi di componentistica associata ai Rack.....	22
2.3 <i>Disegno del modulo</i>	25
2.3.1 Applicazione considerata e specifiche richieste al modulo	25
2.3.2 Tipologia di celle	26
2.3.3 Elettronica di controllo e connessioni di potenza	29
2.3.4 Struttura del contenitore.....	33
2.3.5 Supporto delle celle.....	35
2.3.6 Back Plane.....	37
3 Conclusioni	38
4 Riferimenti bibliografici	39

Sommario

Il presente documento descrive la progettazione di un contenitore per celle di batterie al litio ritirate da una prima applicazione, per la quale, a causa del loro invecchiamento, non possiedono più le caratteristiche idonee a quell'utilizzo specifico, ma che possono essere reimpiegate in una applicazione meno impegnativa dal punto di vista del profilo di potenza ed energia loro richiesto. Il contenitore (o "case") è stato progettato con il concetto di poterlo realizzare mediante componenti standard reperibili sul mercato e di poterlo utilizzare all'interno di armadi ospitanti telai Rack anche essi standard. Nel testo il contenitore è normalmente definito SubRack. La progettazione è stata impostata prevedendo che l'insieme delle singole celle, l'elettronica ad esso associata ed il contenitore stesso, compongano un modulo batteria, e che sia possibile assemblare più moduli gemelli in serie e/o in parallelo per costruire il sistema batterie completo.

La protezione del sistema di accumulo nel suo insieme, dalla singola cella ad eventualmente più armadi Rack presenti in un ambiente chiuso, viene gestita a tutti i livelli d'integrazione (dalla cella all'installazione finale) sia tramite sistemi di gestione e controllo attivi che tramite le caratteristiche dei materiali e le geometrie scelti per costruire i vari componenti. Il modulo, assemblato secondo lo standard SubRack, è parte del sistema di accumulo stesso e deve essere quindi pensato come componente integrato con gli altri: la scelta di costruirlo con componenti standard reperibili sul mercato e di integrarlo in un telaio Rack rende possibile utilizzare soluzioni progettuali e dispositivi di gestione della sicurezza già sviluppati per questa tipologia di installazioni, senza doverne ideare di nuovi. La scelta è funzionale anche alla realizzazione di una struttura che permetta una facilità di assemblaggio e manutenzione, con conseguente abbattimento dei costi di realizzazione e mantenimento.

1 Introduzione

Il presente lavoro si inserisce nelle attività svolte dall'Enea nell'ambito dell'Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico (a cui è subentrato il Ministero dello Sviluppo Sostenibile) per la Ricerca di Sistema Elettrico, in particolare in quelle che riguardano i sistemi di accumulo stazionario e lo studio del reimpiego in Second Life di celle o moduli provenienti da applicazioni per le quali non sono più adatti.

In particolare, in questo studio ci si occupa di definire le caratteristiche costruttive di un modulo costituito da celle impiegate in Second Life e adatto ad un utilizzo stazionario.

Nell'ambito delle attività relative allo studio di sistemi di accumulo stazionari ed alla Second Life, l'ENEA ha sviluppato sia le tematiche inerenti la caratterizzazione delle celle, per determinarne lo stato di salute o per implementare funzioni di gestione in sicurezza nel BMS [1],[2] che quelle relative alla progettazione e realizzazione di moduli batterie [3],[4],[5].

Il tema proposto non è quindi inedito, ma va inserito in un percorso coerente di sviluppo ed approfondimento delle problematiche ad esso connesse: in particolare in questo studio ci si proporrà di disegnare un modulo che possa essere parzialmente realizzato tramite l'utilizzo di componenti standard reperibili sul mercato e con altri componenti, come ad esempio le schede elettroniche, che a loro volta possono essere facilmente realizzati con processi che permettono di customizzarle velocemente ed economicamente per le particolari esigenze del progettista. Il modulo sarà pensato per essere collegato in serie e parallelo con moduli gemelli, avrà al suo interno l'elettronica di controllo delle celle e potrà dialogare, tramite un'interfaccia di comunicazione standard, con l'ambiente esterno.

Il modulo così pensato potrà essere inserito all'interno di telai Rack standard, che di seguito verranno indicati come Rack, ed associato a sistemi di ventilazione, a componenti elettroniche esterne (computer per es.) ed altri accessori compatibili con l'installazione nei Rack: questo approccio è totalmente inedito nelle attività di ricerca condotte dall'ENEA, inoltre costituisce la base per uno sviluppo ulteriore, che riguarda il posizionamento degli armadi realizzati con Rack all'interno di un container o di un ambiente confinato e la prevenzione/protezione/ gestione di un eventuale incendio.

Utilizzare questo approccio permette quindi al progettista sia di limitare i costi del sistema che di utilizzare soluzioni già disponibili per affrontare problematiche come il condizionamento termico, la definizione e realizzazione del cablaggio, le caratteristiche dei sistemi di prevenzione e contenimento dell'incendio ecc.

Il lavoro di progettazione del modulo è stato svolto in coordinazione con l'Università di Pisa, che inoltre si occuperà della progettazione del BMS che sarà ad esso associato: infatti l'hardware del BMS e quello del modulo costituiranno un insieme integrato e vanno quindi sviluppati in modo coerente tra loro [6].

Per fissare le idee sulle prestazioni richieste al modulo e sulla dimensione dell'intero sistema di accumulo in Second Life, si farà riferimento ad uno studio parallelamente effettuato dall'Università di Roma Due "Tor Vergata" sul dimensionamento di un sistema di accumulo per il parcheggio del Centro Ricerche "Casaccia" dell'ENEA, pensato come parcheggio per auto elettriche e considerato provvisto anche di un sistema di generazione fotovoltaico [7].

La prima applicazione delle celle costituenti il modulo è stata la Funicolare di Bergamo [5], per essere utilizzate nel nuovo modulo, le celle sono state testate per verificarne capacità residua ed omogeneità di caratteristiche.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 La sicurezza dei sistemi di accumulo – Livelli di protezione

Per definire le caratteristiche del contenitore SubRack è opportuno vedere come esso costituisca parte integrante del sistema di protezione delle batterie, non essendo solo un semplice elemento di “sostegno” o di contenimento delle celle che formano il pacco batteria stesso. Per chiarire la questione si parte dall’analisi delle cause di guasto alle batterie e delle loro possibili conseguenze, riportate schematicamente in

Figura 1.

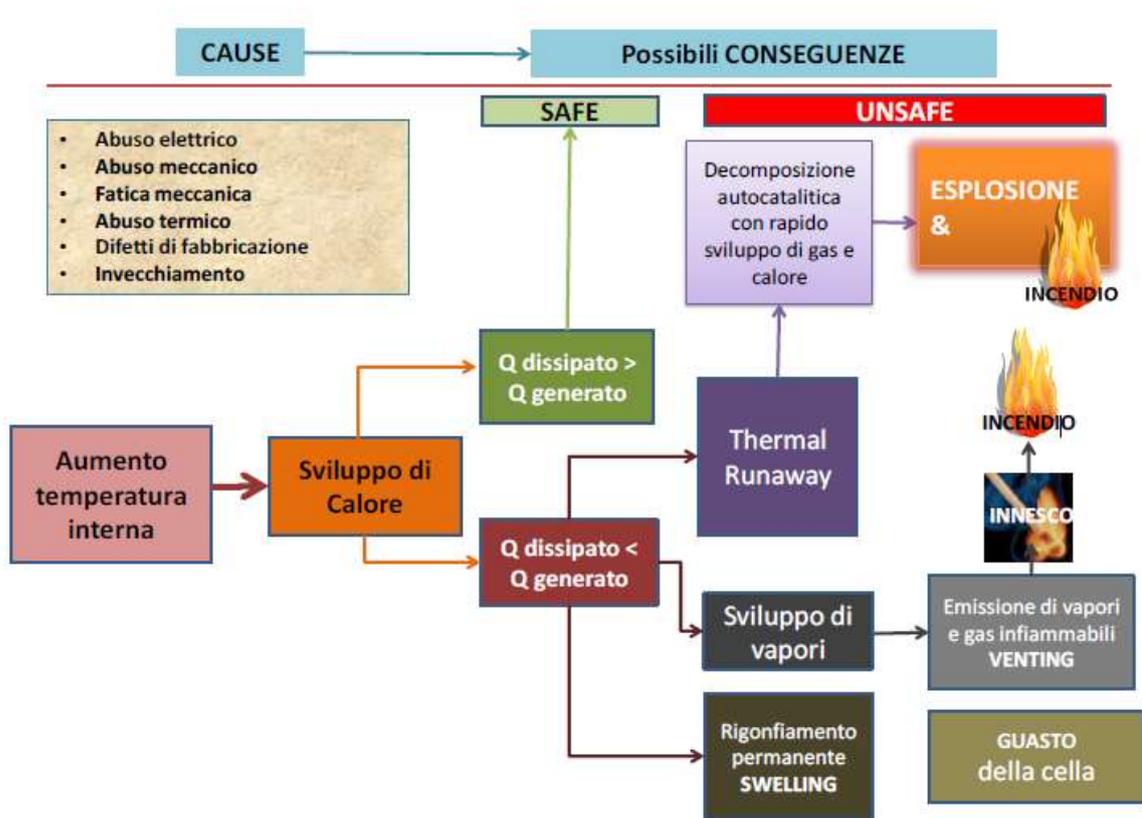


Figura 1 – Cause di guasto delle batterie e loro conseguenze

Fondamentalmente, le rare ma possibili conseguenze degli abusi sulle celle vanno dall’emissione di gas all’incendio fino all’esplosione delle celle stesse. Si sottolinea che in un pacco batterie, formato anche da migliaia di celle, il malfunzionamento di una sola di esse potrebbe compromettere la sicurezza di tutto l’insieme: una sola cella che andasse in Thermal Runaway potrebbe influenzare quelle vicine, fino a causare un effetto domino, con incendio o esplosione di proporzioni estese.

Per contenere il rischio di esplosione/incendio dell'intero pacco batterie, o anche per proteggerlo da eventi di origine esterna ad esso, si opera a vari livelli, che vanno dalla protezione della singola cella fino alla definizione delle caratteristiche dell'ambiente di installazione.

Di seguito verranno utilizzate le seguenti denominazioni:

Cella:

Elemento base che costituisce il sistema di accumulo è quella che normalmente viene indicata come pila o semplicemente batteria. La cella è reversibile (si può caricare e scaricare) ed in questo studio è caratterizzata dalla sua geometria, dalla capacità (la quantità di carica elettrica che può immagazzinare e cedere) e dagli intervalli operativi di tensione e temperatura.

Modulo:

È il contenitore delle batterie completo delle connessioni elettriche e di segnale che lo fanno funzionare.

In questo studio il contenitore (o "case") è anche indicato come SubRack.

Le celle all'interno del modulo possono essere connesse in serie o in parallelo, più in generale in gruppi di celle poste in parallelo e poi collegati in serie tra di loro.

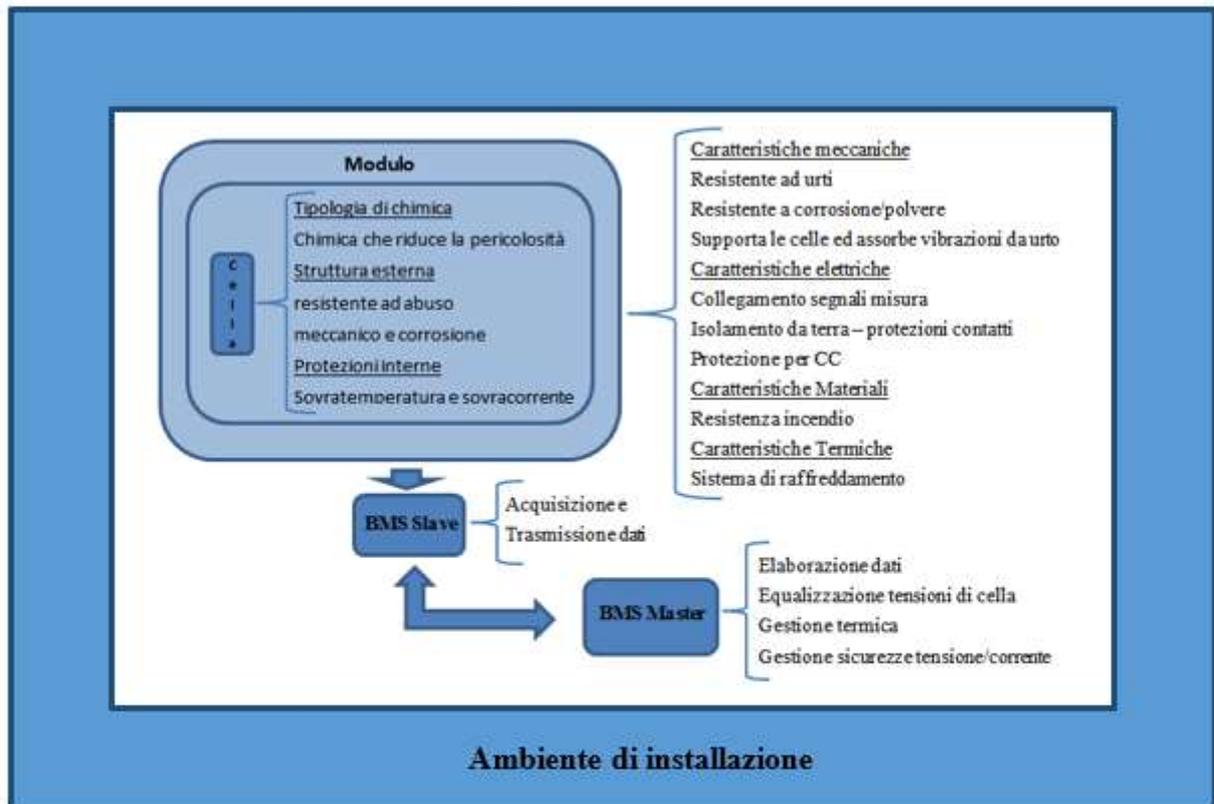
Sistema di accumulo o pacco batterie:

È costituito dall'insieme dei moduli, connessi in serie o parallelo, che realizzano il sistema finale.

BMS (Battery Management System):

È il microcontrollore che supervisiona tutto il pacco batterie (dalla singola cella al sistema di accumulo) e che ne gestisce la sicurezza e le operazioni di carica e scarica.

Secondo quanto mostrato in [Figura 2](#) la protezione del sistema di accumulo avviene ad ogni livello di realizzazione dello stesso, andando da quella della singola cella fino alla definizione delle caratteristiche dell'ambiente di installazione (ad esempio container o locali confinati).



- ✓ Sistemi di montaggio (pianale auto, Rack stazionario)
 - Caratteristiche meccaniche, scambio termico, isolamento elettrico
- ✓ Locali o container
 - Distanze tra i Rack, sistemi di contenimento incendio, aerazione, climatizzazione

Figura 2 – Livelli di protezione di un sistema di accumulo

La **Figura 2** mostra come la protezione del sistema di accumulo sia realizzata fissando l'attenzione sulle caratteristiche meccaniche, termiche ed elettriche dei componenti costituenti la cella, il modulo e l'intero sistema di accumulo. A livello di cella si opera inserendo in ognuna di esse delle protezioni realizzate tramite sistemi di interruzione della corrente, come ad esempio "fusibili", o di apertura della cella stessa (si tratta di dispositivi inseriti dal costruttore stesso delle celle, e possono essere, per esempio, zone che si aprono per sovrappressione, resistenze che crescono per sovracorrente, ecc.).

Ad ogni pacco batterie si associano sistemi evoluti di gestione e protezione, in particolare i BMS, i quali si occupano di gestire ad alto livello le fasi di carica, scarica, raffreddamento equalizzazione delle tensioni di cella, ed hanno altre funzionalità aggiuntive. In questa ottica il modulo batterie è un componente fondamentale del sistema di protezione e va disegnato in modo integrato con le caratteristiche del BMS e degli attuatori, per esempio ventole ma anche altri sistemi, che si vogliono utilizzare per gestire il sistema dal punto di vista termico.

Di seguito si forniscono brevemente delle note sui principi di gestione in sicurezza delle batterie, partendo dalle singole celle fino ad arrivare all'intero sistema di accumulo, rimandando per approfondimenti alle attività svolte dall'ENEA nella Ricerca di Sistema Elettrico e delle attività ad essa correlate (per es. [8] e [9]).

2.1.1 Protezione a livello della cella

La **Figura 3** presenta la sezione del Data Sheet di una cella al litio che ne descrive il campo di funzionamento operativo espresso in termini di tensione, corrente e temperatura ammesse di funzionamento.

Product General Specification

Mechanical Characteristics

Model	CC20
Length	217,0 ± 1 mm (excluding terminal)
Width	129,0 ± 1 mm
Thickness	7,2 ± 0,2 mm
Weight	approx. 428 g

Electrical Characteristics

Nominal Voltage	3,65 V
Nominal Capacity	20 Ah
AC Impedance (1 KHz)	< 3 mΩ
Specific Energy	174 Wh/Kg
Energy Density	370 Wh/L
Specific Power (DOD50%, 10sec)	2300 W/Kg
Power Density (DOD50%, 10sec)	4600 W/L

Operating Conditions

Charge Conditions	
Recommended Charge Method	CC/CV
Maximum Charge Voltage	4,15 V
Recommended Charge Current	0,5 C Current

Discharge Conditions	
Recommended Voltage Limit for Discharge	3,8 V
Lower Voltage Limit for Discharge	2,3 V
Maximum Discharge Current (Continuous)	up to 5 C Current
Maximum Discharge Current (Peak < 10 sec)	10 C Current

Operating Temperature	-30°C / +55°C
Recommended Charge Temperature	0°C / +40°C
Storage Temperature	-30°C / +55°C

Cycle Life at 25°C (1 C Charge / 1 C Discharge, DOD100%)	1000 Cycles to 80% Nominal Capacity
--	-------------------------------------

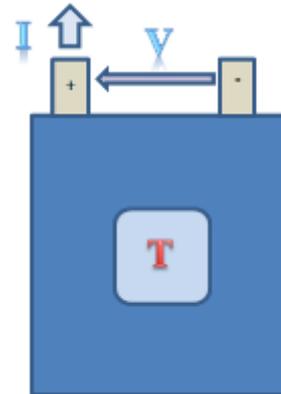


Figura 3 – Campo di funzionamento di una cella

Come si evince dalla figura, la cella deve quindi operare in un preciso intervallo di temperatura e tensione, inoltre la corrente continuativa in carica e scarica va contenuta entro limiti predeterminati mentre è possibile operare con correnti più alte solo limitandone il tempo di erogazione.

Il costruttore protegge la cella dall'azione di sostanze chimiche corrosive, o dagli urti meccanici, studiando la forma ed i materiali della superficie esterna che contiene la parte chimica, inoltre a volte inserisce nella struttura della cella stessa dei sistemi di limitazione o interruzione della corrente (che possono essere reversibili o irreversibili), è possibile poi che nella cella siano presenti anche sistemi di dissipazione di gas che si attivano in caso di sovrappressione interna.

In **Figura 4** vengono mostrati un sistema di interruzione della corrente di una cella cilindrica (che si attiva per sovrappressione o sovracorrente) e quello di dissipazione del calore di una cella prismatica, che viene ottenuta aumentando la superficie di scambio termico ed impedendo che due celle identiche siano montate con le superfici adiacenti senza che si abbia uno spazio per il passaggio dell'aria

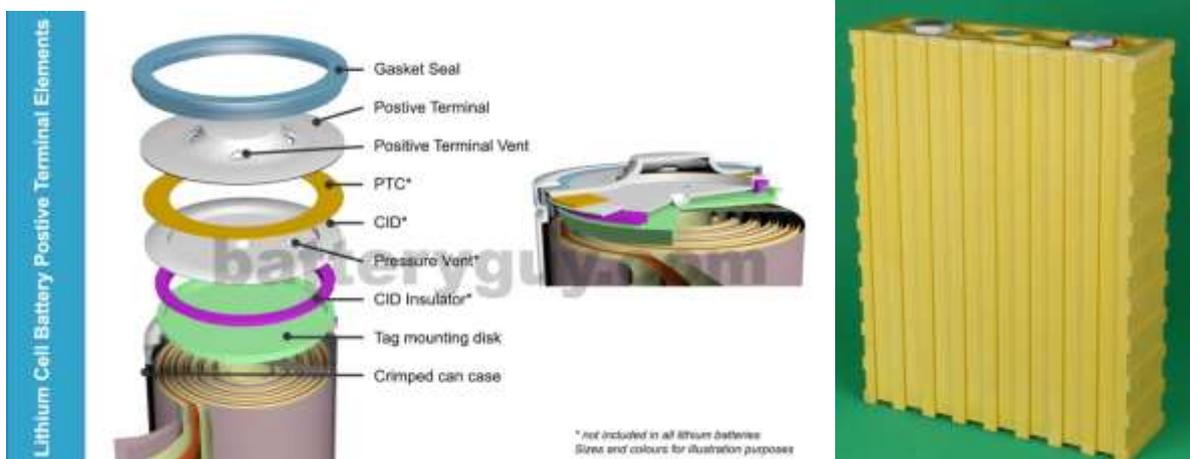


Figura 4 – Sistemi di protezione interni delle celle a) Cilindriche b) Prismatiche

Oltre ai sistemi di protezione interna previsti dal progettista, sono disponibili sul mercato dei componenti elettronici che permettono di interrompere momentaneamente il passaggio della corrente qualora si fuoriesca dall'intervallo di normale funzionamento della cella: di seguito, in

Figura 5, viene presentato un circuito integrato della Ricoh.

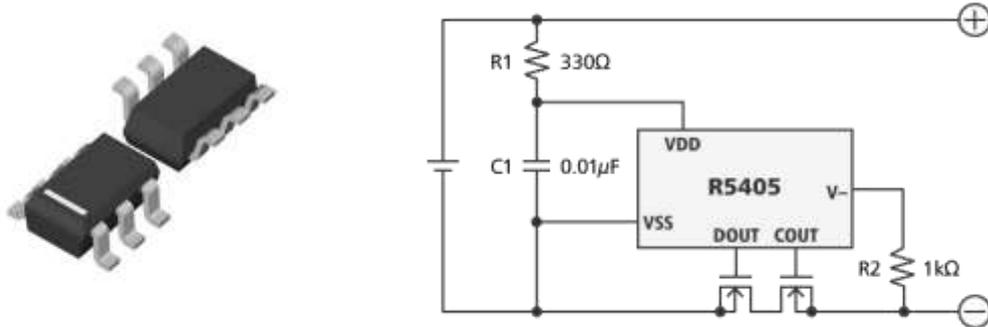


Figura 5 Componente di protezione delle celle Ricoh R5405 e schema di inserzione

Questo dispositivo è in grado di interrompere il circuito laddove verifichi che la tensione o la corrente siano al di fuori dei valori prestabiliti, inoltre è in grado di riconoscere la condizione di cortocircuito: una volta ristabilite le normali condizioni operative il dispositivo torna a permettere l'erogazione di corrente.

2.1.2 Protezione a livello di contenitore

Il contenitore delle celle è l'oggetto del presente lavoro, in [3] erano state elencate le caratteristiche ad esso richieste:

- 1) Deve essere adatto al montaggio delle celle
- 2) Deve permettere di assorbire urti e vibrazioni di tutto il complesso
- 3) Deve permettere di rendere accessibile ogni cella ad un sistema di misura della sua tensione e temperatura
- 4) Deve permettere l'eventuale passaggio dei collegamenti elettrici con dispositivi esterni al contenitore, in ogni caso deve essere compatibile con il sistema di gestione delle batterie
- 5) Deve permettere la gestione termica delle celle
- 6) Deve garantire la sicurezza elettrica del sistema
- 7) Deve essere trasportabile¹
- 8) Deve rispettare le normative di sicurezza vigenti

In aggiunta a queste caratteristiche esso dovrebbe presentarne altre

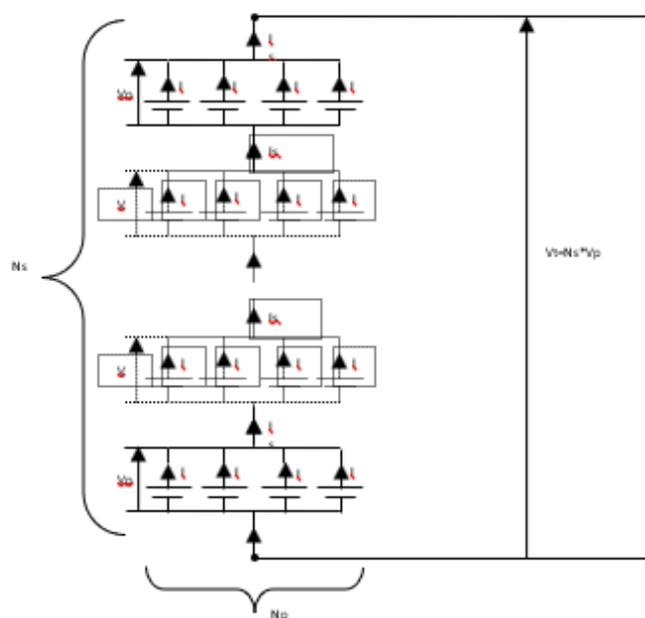
¹ Soprattutto in caso di contenitori per sistemi di accumulo stazionari

- 1) Permettere una rapida sostituzione delle celle quando si dovesse rendere necessaria tale azione.
- 2) Poter evitare l'ingresso di sostanze che possono danneggiare le batterie
- 3) Poter garantire una sicurezza passiva in caso di venting, esplosione o incendio di una cella, ovvero permettere alle sostanze di fuoriuscire senza problemi in caso di venting e costituire una prima barriera di contenimento dell'esplosione o dell'incendio esterno o interno al contenitore
- 4) L'insieme contenitore/elettronica di controllo e sistemi di gestione termica (ad esempio ventole) dovrebbe essere ottimizzato in modo da facilitarne il montaggio e l'interfacciamento
- 5) La costruzione del pacco dovrebbe essere ottimizzata anche come assemblaggio dei singoli moduli, per esempio in armadi Rack
- 6) Si dovrebbe cercare una soluzione di montaggio standardizzabile per la stessa geometria di cella, ma con caratteristiche dimensionali e chimiche diverse

Sul contenitore si tornerà in seguito in modo approfondito.

2.1.3 Il BMS

Il BMS è il sistema di gestione e controllo dei moduli/pacchi di batterie, esso si occupa di effettuare le misure di tensione di ogni singola cella, quelle di temperatura, di misurare la corrente che scorre nei gruppi di celle poste in serie, calcolare lo stato di carica delle batterie e pilotare la corrente di ricarica del sistema di accumulo. La Figura 6 sintetizza le funzionalità minime che deve avere un BMS per poter gestire un pacco batterie.



Funzioni base del BMS

- ✓ Determinazione dello SOC complessivo
- ✓ Ricarica in sicurezza delle celle
- ✓ Equalizzazione delle tensioni delle celle che costituiscono il pacco batterie
- ✓ Mantenimento del sistema nelle condizioni di lavoro raccomandate dal progettista (V, I, T)
- ✓ Interruzione di corrente in caso di malfunzionamento o condizione operativa non gestibile in modo corretto
- ✓ Scambio di informazioni con l'esterno
- ✓ Avviso di pericolo se una cella è in c.c.²

Figura 6 – Pacco batterie e funzioni del BMS

Oltre a queste funzionalità minime, il BMS normalmente ne possiede altre, quali la possibilità di pilotare il sistema di raffreddamento delle batterie, la misura del valore minimo e massimo di tensione e temperatura ed il calcolo del relativo valore medio, routine di calcolo dello stato di salute ecc.

La struttura del BMS è in genere modulare: ad ogni modulo batterie è associata una scheda di controllo che misura le tensioni di tutte le celle che lo compongono e la temperatura di tutte le celle o di alcune rappresentative del loro insieme. Se il sistema è formato da un solo modulo la scheda ha funzioni di BMS, nel caso in cui il pacco batterie sia realizzato connettendo più moduli, le singole schede di controllo vengono poste in comunicazione tra di loro e gestite da una scheda che svolge le funzioni di Master. In alcuni casi la scheda Master è diversa dalle Slave ed è separata dai moduli, in altri invece è indifferentemente una delle schede elettroniche dei moduli, a cui viene assegnata (tramite il firmware) la funzione di master.

Accumulo stazionario: il Rack e l'ambiente di installazione

In questo lavoro si prenderanno in considerazione moduli realizzati con componenti standard e pensati in modo da poter essere ospitati all'interno di un Rack: lo stesso Rack potrà essere dotato di sistemi di estinzione di un incendio, di condizionamento termico, di PC che possano collaborare con il BMS per la supervisione del funzionamento del sistema di accumulo e di altre eventuali funzionalità.

Il singolo Rack potrà poi far parte di un sistema più complesso, formato con altri Rack inseriti in appositi armadi ed ospitati all'interno di container o di box adatti alla gestione in sicurezza del complesso.

La soluzione proposta si inserisce in una linea di prodotti già consolidata, anche se il progetto Enea sarà caratterizzato, come si vedrà in seguito, da particolarità specifiche. Nella

Figura 7 è mostrata una delle soluzioni prodotte dalla Cobra [10].



Figura 7 – Sistema modulare Cobra con relativo Rack

I Rack devono essere disposti nell'ambiente ospitante facendo attenzione alla loro separazione, alla presenza di barriere antincendio e a quella di sistemi di estinzione o di condizionamento termico: in **Figura 8** si presenta un esempio di installazione di un sistema di accumulo ad alta energia realizzato con celle Second Life [11].



Figura 8 – Sistema di accumulo Second Life

Una soluzione che utilizza un container è quella proposta dalla Saft per il sistema Intensium [12].



Figura 9 - Sistema di storage Saft Intensium Max

I problemi di sicurezza da affrontare nel dimensionamento di un sistema di accumulo nel suo complesso (dalla cella all'ambiente che lo ospita) riguardano la gestione di alte tensioni/correnti, la definizione delle caratteristiche di ventilazione e condizionamento termico dell'ambiente, i modi per contenere la propagazione di un eventuale incendio, le distanze di sicurezza tra i componenti, la protezione dall'azione di agenti esterni ecc.

2.2 Impostazione del lavoro

2.2.1 Costruzione con componentistica standard – I Rack

L'idea di base che si vuole perseguire nel presente lavoro è di costruire il contenitore utilizzando componenti standard reperibili sul mercato e rendendolo in questo modo parte di un sistema di sviluppo per il quale siano disponibili una notevole varietà di prodotti ed accessori. Per questa motivazione si è presa in considerazione l'idea di costruire una struttura basata sulla componentistica standard dei Rack da 19".

Per fissare le idee, di seguito si riporta una definizione di Rack e delle unità standard ad esso associate²

"Il termine Rack nella meccanica applicata all'elettronica indica un sistema standard d'installazione di componenti costituito da una struttura modulare basata sull'unità Rack che identifica la larghezza e l'altezza degli oggetti in essa installati."

La struttura Rack si realizza mediante barre verticali parallele (sempre in coppia destra e sinistra) caratterizzate da una distanza fissa (in questo caso 19") e dalla presenza di una serie di fori distribuiti per tutta la lunghezza, associando 3 fori per ogni Unità Rack della struttura.

La struttura Rack attualmente più impiegata nell'ambito dell'elettronica ed informatica è il sistema 19".

Una unità Rack spesso abbreviata in U (Unit), RU (Rack Unit), HU (Height Unit), è un'unità di misura usata per indicare l'altezza dei componenti installati in un Rack 19 pollici. Una unità Rack corrisponde a 1,75 pollici (44,45 mm) e si caratterizza per la presenza di 3 fori a differenti distanze (3 scassi quadrati di 9,5 x 9,5 mm per dadi a gabbia nelle strutture moderne). In realtà la dimensione in altezza del pannello anteriore è inferiore di 0,031 pollici o 0,79 mm per non interferire con gli apparati già montati e permettere una agevole installazione o disinstallazione della apparecchiatura: $44,45 - 0,79 = 43,66$ mm.

I produttori di apparati a montaggio Rack indicano nelle specifiche l'ingombro in altezza dell'apparato come "1U" per una unità Rack, "2U", "3U" e così via. Questo permette di calcolare in maniera semplice ed immediata lo spazio necessario per l'infrastruttura completa.

La definizione della misura dell'unità Rack si basa sulle specifiche standard per i Rack EIA-310, CEI IEC-60297-1, IEC-60297-2, IEC-60297-3 e successive."

La profondità dei Rack non è rigidamente definita, ma solitamente non va oltre i 600 mm.

La larghezza di una struttura (di un telaio) Rack 19" è pari a 482,6 mm e si riferisce alla larghezza massima degli oggetti da montare comprese le alette laterali di fissaggio ("orecchie", "staffe"). La distanza tra il centro dei fori presenti nella barra verticale di destra ed i relativi sulla barra di sinistra è di 465 mm mentre la luce di ingresso tra le due barre verticali è di 450 mm.

La larghezza fuori tutto dei contenitori/cassetti montati internamente al telaio Rack 19", detti SubRacks, normalmente si aggira tra i 400 ed i 430 mm e viene tradotta in TE o HP – Teilungseinheit o Horizontal Pitch: un HP equivale a 0,20 pollici o 5,08 mm (nello specifico un cassetto completo montato in un Rack 19" misura

² https://www.armadi-Rack.it/glossario_armadi_Rack.asp

in larghezza interna come spazio utile al montaggio della componentistica 84 TE / HP; $84 \times 5,08 = 426,72$ mm). Alcune apparecchiature non occupano la piena larghezza del Rack, ma ne usano solo metà, in questo caso sono montabili su appositi supporti da soli o in coppia: questa misura è nota come half Rack, half length, mezza larghezza, 42TE, 42HP.

La Figura 10 mostra le principali caratteristiche geometriche di un Rack standard [13].



Figura 10 – Caratteristiche dei Rack standard 19"

Le strutture Rack possono essere completamente aperte: Open Frame o Telaio Rack, completamente chiuse Armadi Rack. Esistono anche strutture intermedie con parti chiuse ed altre direttamente accessibili, come possono essere per es. armadi con telaio rotante per applicazioni dove l'armadio stesso ha il lato posteriore obbligatoriamente appoggiato alla parete del sito che lo accoglie, vedi container o piattaforme off shore ambiti in cui lo spazio a disposizione è limitato.

L'unità Rack è l'unico elemento comune a tutte le strutture Rack che poi si differenziano per:

- ✓ Numero di unità Rack (altezza della struttura)
- ✓ Profondità della struttura
- ✓ Larghezza del SubRack (42 o 84 HP)
- ✓ Numero e tipologia di montanti Rack
(solitamente 4 per telaio Rack 4 profili e 2 per Rack singolo)
- ✓ Tipo di porte, pareti e finiture
- ✓ Grado IP di protezione (quanto l'interno è isolato rispetto all'esterno del Rack)

La **Figura 11** riporta le principali tipologie di strutture Rack presenti sul mercato [13].



Figura 11 – Tipologie di strutture Rack

La scelta di utilizzare componentistica compatibile con i Rack standard apre la possibilità di accedere a tutti i prodotti pensati per questa tipologia di mercato, comprese schede di connessione, sistemi di interfacciamento con l'elettronica che può essere presente nello stesso armadio, sistemi di climatizzazione, di contenimento di incendi ecc.

2.2.2 SubRack

La **Figura 12** mostra la struttura di due SubRack [14].

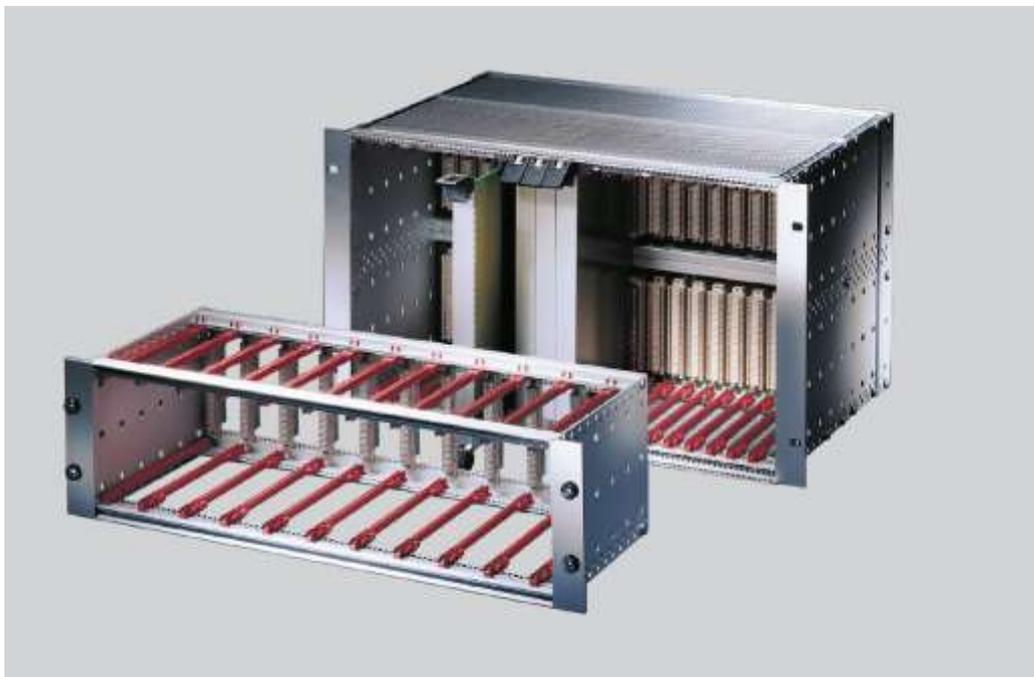


Figura 12 – Struttura dei SubRack

I SubRack sono unità componibili, come detto precedentemente la loro larghezza totale è pari a quella del Rack, l'altezza può variare in modo discreto secondo multipli di unità di altezza Rack mentre la profondità,

pur dettata anch'essa da una modularità, non è tuttavia vincolata così rigidamente come l'altezza e la larghezza.

Il SubRack può includere una serie di guide, posizionate in alto ed in basso, nelle quali le schede possono essere inserite come libri su uno scaffale. Sul retro di ciascuna scheda si trovano uno o più connettori, i quali a loro volta si inseriscono in un connettore fissato su una scheda (detta 'Backplane' o 'Back Panel') che costituisce il retro del cassetto SubRack.

Il progettista di un SubRack può scegliere le caratteristiche delle pareti (chiuse, forate, con particolari disegni per il passaggio dell'aria) e la profondità della struttura mentre per l'altezza, come si è detto, è vincolato ad utilizzare multipli della unità Rack.

La

Figura 13 mostra dei componenti normalmente utilizzati per il montaggio dei SubRack, come sistemi di fissaggio, guide, sistemi di riempimento per spazi non utilizzati (panel filler) [14].

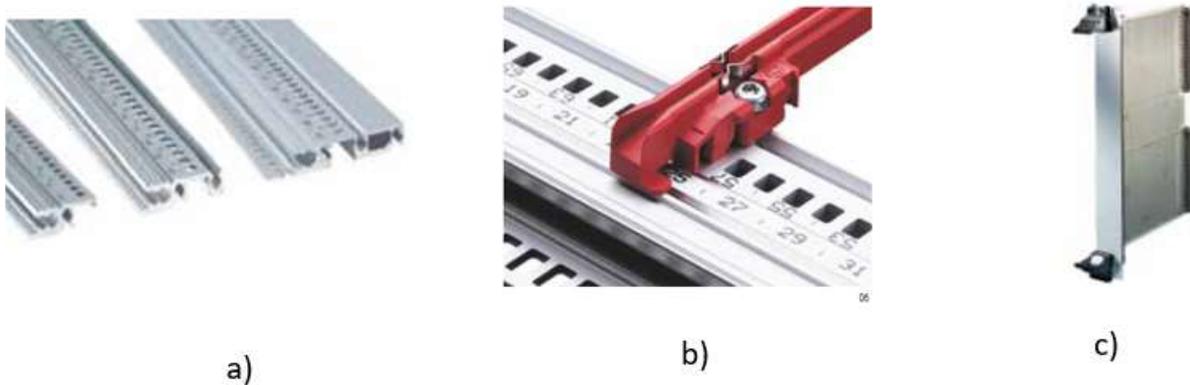


Figura 13 – Componenti per l'assemblaggio di SubRack

a) Sistemi di supporto b) Guide c) Chiusure per schede vuote (spare)

L'idea che si vuole perseguire nella costruzione del contenitore è di realizzare un supporto per le singole celle, inserendo nel SubRack il complesso cella/supporto tramite le guide. Con esso, insieme alle celle, saranno inseriti i circuiti stampati che permettono di realizzare sia le connessioni di potenza che di segnale e quelli che ospitano componenti come il BMS ed altri eventuali componenti elettronici che possono avere funzione di gestione del sistema.

2.2.3 Schede standard per circuiti stampati

I circuiti stampati, (PCB, Printed Circuit Board) sono inseriti nei SubRack tramite delle guide (Figura 12, Figura 13 b)), essi devono avere delle dimensioni standard, lo standard Europeo viene chiamato Eurocard.

La Figura 14 mostra le dimensioni di schede standard per SubRack [15], nelle schede di esempio sono previste le connessioni per un Bus dati configurabile nel Backplane.

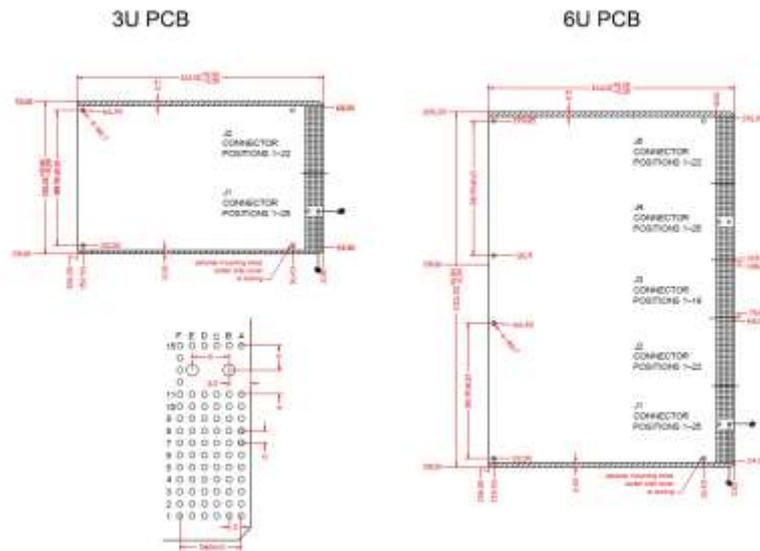
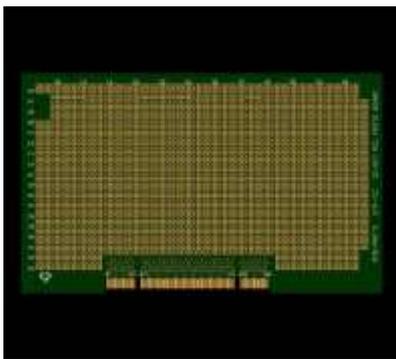


Figura 14 – Dimensioni schede standard per Rack Rittal

In Figura 15 sono mostrate una scheda millefori, che può essere utilizzata come base per costruire un circuito stampato, ed un PCB completo.



a)



b)

Figura 15 – Esempio di schede elettroniche per SubRack
A) Scheda millefori B) Circuito stampato completo di componenti

Infine, la Figura 16 mostra la composizione di un SubRack eseguita montando le schede sulle guide e collegandole alla scheda Backplane [14].

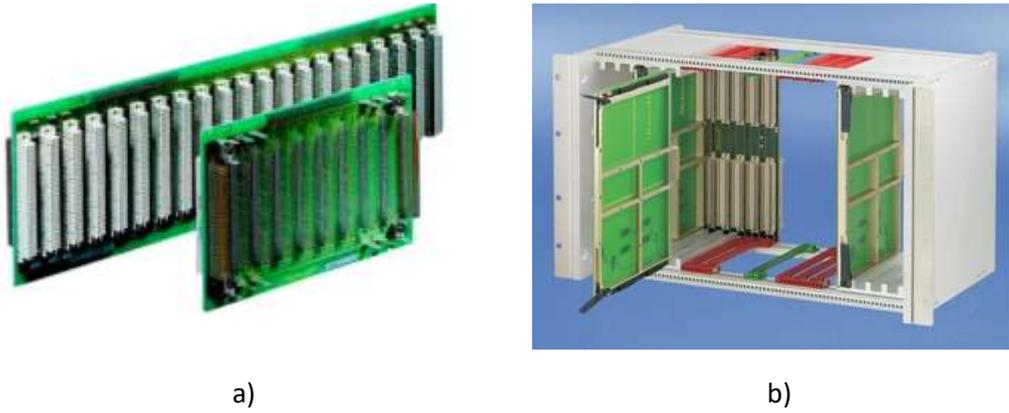


Figura 16 – A) Backplane B) composizione di un SubRack

2.2.4 Connettori

Le schede PCB possono essere dimensionate per effettuare collegamenti di segnale o di potenza (nel caso specifico, come si vedrà in seguito, si prevede di far passare su di un circuito una corrente massima impulsiva di 100 A).

La

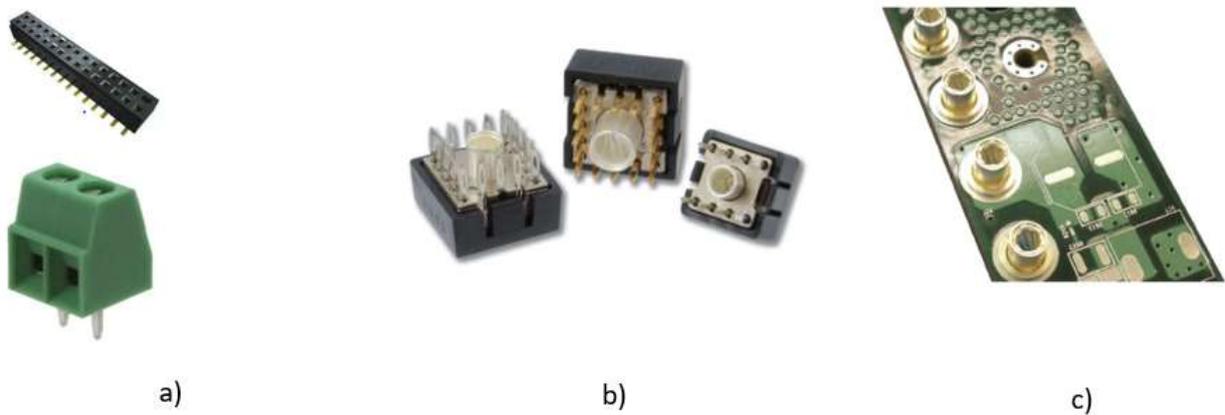


Figura 17 mostra esempi di connettori di segnale e di potenza (fino a 70 A): nella costruzione del contenitore si vogliono utilizzare soluzioni simili che, tramite circuiti stampati realizzati su scheda e adatti anche a supportare alte correnti, permettono di ottimizzare la struttura dei collegamenti.



a)



b)



c)

Figura 17 – Esempi di connettori

A) Di segnale (Phoenix Contact) B) Di potenza (Amphenol) C) loro montaggio su scheda (Amphenol)

2.2.5 Considerazioni generali su materiali, geometria ed altre caratteristiche

Come mostrato in Figura 2 il contenitore del modulo di batterie è parte integrante del sistema di protezione delle celle. La struttura, essendo nel suo insieme assimilabile ad un componente elettrico deve garantire delle prestazioni di sicurezza dal punto di vista dell'isolamento elettrico e della protezione delle persone che a vario titolo vi si avvicinano o vengono in contatto, allo stesso tempo deve anche permettere alle celle di disperdere calore e deve poter assorbire urti o vibrazioni che possano provocare guasti alle saldature, ai contatti o alle celle stesse.

Diviene quindi importante, per motivi di sicurezza e per la gestione del calore, considerare la geometria del contenitore (per esempio presenza di punti di aerazione, di alette di raffreddamento ecc.), le proprietà di trasmissione del calore dei materiali che lo costituiscono, la loro infiammabilità e la loro conducibilità elettrica.

Oltre ai materiali che costituiscono le guide, lo chassis, i connettori e gli altri componenti, va posto l'accento anche sulle proprietà delle vernici e sulle caratteristiche dell'ambiente che dovrà ospitare il modulo batterie.

2.2.6 Esempi di componentistica associata ai Rack

Uno dei vantaggi legati alla scelta di utilizzare un sistema di montaggio standard come quello costituito dai Rack è la disponibilità di accessori e componentistica progettata per essere associata a questa struttura.

Per chiarire meglio questa particolarità di seguito verranno mostrati degli esempi di componentistica associata al montaggio di dispositivi elettronici all'interno di Rack, come possono essere sistemi di ventilazione o di estinzione incendi.

La Figura 18 mostra un sistema di areazione, una ventola ed un sistema di ventilazione dotato di termostato [15].

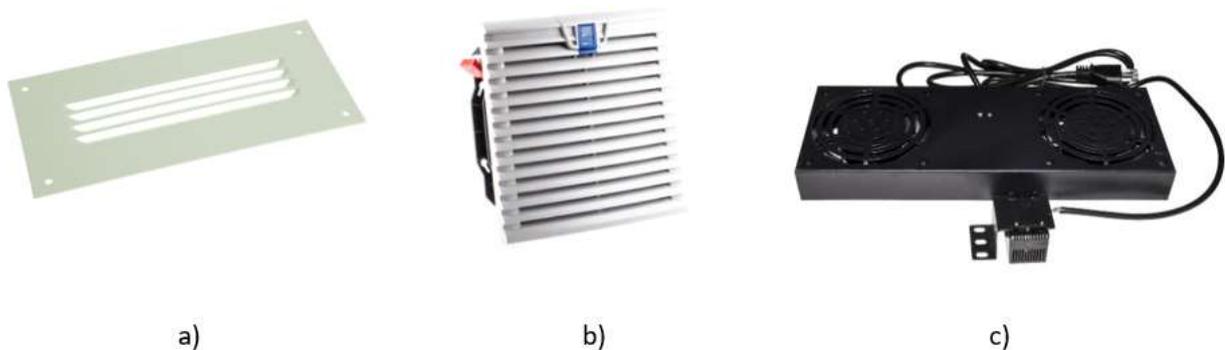


Figura 18 – Ventole e sistemi di aerazione per Rack 19" (Rittal)

A) Sistema di areazione B) Ventola con filtro C) Modulo di ventilazione con termostato

È possibile configurare l'armadio in base ai particolari requisiti ad esso richiesti, per esempio quelli relativi alla presenza di ingressi per il passaggio dell'aria, più in generale al condizionamento termico alla messa a terra ed altro ancora.

Un accessorio estremamente interessante per la sicurezza di un pacco batterie è un modulo di estinzione incendio prodotto dalla ditta Rittal che utilizza un gas inerte chiamato Novec, il quale ha la particolarità di raffreddare l'ambiente circostante. L'utilizzo di acqua o di estinguenti in polvere in caso di incendio di batterie al litio può essere inefficace o addirittura dannoso, sia perché il litio si infiamma con l'acqua sia perché all'interno della singola cella sono presenti tutti gli elementi in grado di sostenere l'incendio anche in assenza di ossigeno esterno.

Per estinguere un incendio di batterie al Litio non basta togliere l'ossigeno dall'ambiente, occorre soprattutto evitare che il calore generato dalla reazione si propaghi alle altre celle abbassando la temperatura di tutto l'ambiente circostante; per questo si segnala questo accessorio, che potrebbe essere inserito in un Rack che ospita moduli di batterie allo scopo di limitare i danni provocati da un eventuale incendio di una cella.

Di seguito la descrizione del componente, fornita nel manuale accluso:

“Il Sistema di estinzione incendio DET-AC III Slave concepito per il montaggio in sistemi ad armadio elettrico chiusi è una unità compatta che è stata sviluppata per estinguere incendi. Per attivare questa unità si deve ricorrere a un sistema sovraordinato (sistema di estinzione attivo DET-AC III Master o sistema di aspirazione del fumo EFD III). Come agente estinguente viene utilizzato Novec™ 1230 di 3MTM, che evapora nell'ugello di estinzione e si distribuisce uniformemente nell'area di estinzione. L'incendio viene estinto per il fatto che viene rimossa energia termica dalle fiamme. Gli allarmi e i guasti possono essere inoltrati in un punto sovraordinato (sistema di gestione centralizzata degli edifici o punto presidiato permanentemente) tramite contatti a potenziale zero o tramite il sistema di monitoraggio CMC (prodotto della ditta Rittal).

Il sistema compatto con un ingombro di solo una unità Rack è previsto per il montaggio nella terza parte superiore del sistema ad armadio elettrico chiuso da sottoporre a protezione.”

In [Figura 19](#) è mostrato uno schema del sistema con i suoi componenti principali.

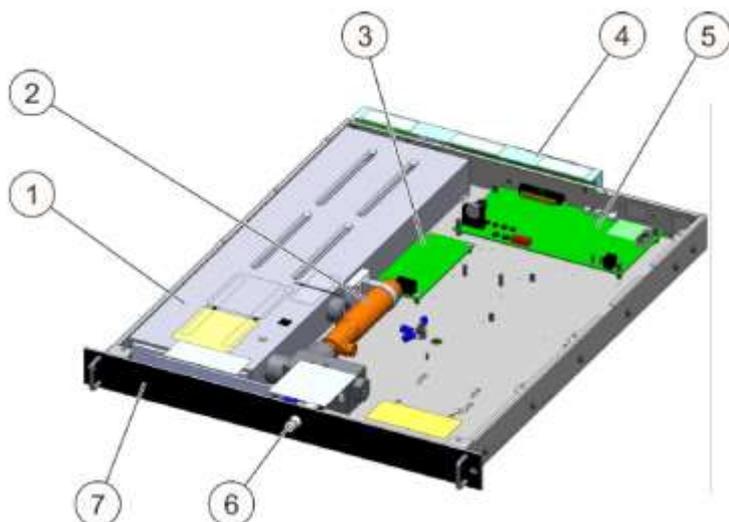


Fig. 2: Struttura del sistema

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 Serbatoio (serbatoio dell'agente estinguente) con monitoraggio del livello di riempimento e dispositivo di attivazione 2 Cartuccia del gas propellente 3 Scheda monitoraggio perdite | <ul style="list-style-type: none"> 4 Morsettiera (scheda sistema d'interconnessione/scheda interfaccia di rete) 5 Scheda di comando CPU3 6 Ugello di estinzione 7 Piastra frontale |
|--|--|

Figura 19 – Caratteristiche del sistema di estinzione incendio Rittal DET-AC III Slave

In Figura 20 si mostra come si presenta esternamente il sistema, configurato per essere inserito nel Rack.



Figura 20 – Struttura esterna del sistema DET-AC III

Da questa panoramica si evince come la scelta di realizzare un modulo di batterie conforme al formato Rack 19" permetta di accedere ad una serie di soluzioni commerciali che rendono il prodotto finale compatibile con il materiale disponibile per questa soluzione, armonizzarlo ed integrarlo con dispositivi previsti per essere alloggiati in queste strutture.

2.3 Disegno del modulo

2.3.1 Applicazione considerata e specifiche richieste al modulo

Come già detto l'idea che si vuole seguire in questo lavoro è quella di produrre un modulo "base" con celle Second Life che possa essere considerato l'elemento 'standard' per la costruzione di un pacco batterie; la possibilità di montare in serie e/o parallelo più moduli base permetterà poi di dimensionare un sistema di accumulo specifico per una determinata applicazione.

Le specifiche del modulo base sono state stabilite considerando di limitare la sua tensione massima a 50 V e quella di tutto il sistema di accumulo a valori non superiori a 500 V, inoltre si vuole evitare di mettere in parallelo delle celle già degradate, che potrebbero invecchiare precocemente perdendo l'omogeneità delle loro caratteristiche. Sulla base di queste considerazioni si stabiliscono le seguenti specifiche:

- ✓ Tipologia di celle che costituiscono il modulo: EIG da 20 Ah, capacità residua 18 Ah
- ✓ Numero di celle costituenti il modulo: 12
- ✓ Collegamento delle celle: serie
- ✓ Minima tensione operativa: 36 V (2.7 V per cella)
- ✓ Massima tensione operativa: 50.16 V (4,18 V per cella)
- ✓ Tensione nominale: 43.8 V (3,65 per celle)
- ✓ Massima corrente continuativa ammessa: 10 A
- ✓ Massima corrente ammessa per 90 s: 20 A
- ✓ Massima corrente ammessa per 10 s: 40 A
- ✓ Numero massimo di moduli collegabili in serie: 10

(per collegare 10 moduli occorre collegare in serie due Rack da 42 U)

Si vuole dotare il modulo di un BMS che ne permetta la gestione in sicurezza, di un sistema di connessione dei terminali che semplifichi i collegamenti elettrici in serie/parallelo con altri moduli gemelli, di un sistema di "precarica" che agevoli il collegamento in parallelo. Inoltre, si vuole prevedere la possibilità di inserire una elettronica, ridondante rispetto al BMS, che permetta di aggiungere funzionalità quali il monitoraggio della temperatura in più punti della cella, la memorizzazione di dati utili a stimarne il SOH (Stato of Health, stato di salute) ed altre funzionalità aggiuntive ancora da definire ma facilmente implementabili via software.

Le specifiche del BMS e le sue funzionalità sono state stabilite insieme all'Università di Pisa [6], che in seguito lo dovrà sviluppare. In particolare, dato che con l'invecchiamento delle celle ci si aspetta che le loro caratteristiche divengano sempre più disomogenee, si è stabilita la necessità di avere una elevata capacità di equalizzare le tensioni parziali del modulo, ci si è inoltre posti l'obiettivo di misurare le temperature di ogni singola cella del modulo piuttosto che solo quella di alcune che siano rappresentative di tutto l'insieme, come viene fatto normalmente.

Come applicazione di riferimento, si considera l'utilizzo di un sistema di accumulo in Second Life come ausilio a terra di un sistema di colonnine di ricarica di veicoli elettrici: più specificamente si prende come caso di studio il parcheggio del Centro Ricerche "Casaccia" dell'ENEA, dove verranno effettivamente installate delle colonnine di ricarica e si considera che il centro venga dotato di un sistema di generazione fotovoltaico che utilizzi le pensiline dello stesso parcheggio.

Per questa ipotesi di lavoro l'Università di Roma 2 "Tor Vergata" ha ipotizzato un dimensionamento del sistema di accumulo con il relativo profilo di potenza 'media' richiesta [7].

2.3.2 Tipologia di celle

Il modulo di batterie che si vuole costruire utilizza celle di tipo Pouch ritirate da una prima applicazione [3] e riutilizzate in Second Life: le celle verranno smontate una ad una dai moduli originari per essere poi riassemblate nella nuova architettura.

Si sottolinea che è possibile considerare anche altri modi di operare:

- 1) Utilizzare l'intero pacco batterie della prima applicazione nella seconda, dove le richieste di potenza ed energia sono di entità minore.
- 2) Laddove il pacco sia costituito da più moduli, smontarli e caratterizzarli per poi assemblarli (eventualmente con un diverso sistema di raffreddamento) in nuovi pacchi dalle caratteristiche omogenee tra di loro.
- 3) Come in questo lavoro, smontare le singole celle, caratterizzarle e riassemblarle in nuovi moduli.

In tutti i casi occorrerà fare un controllo sul pacco e sulle singole celle che lo compongono, per evitare che siano presenti elementi difettosi o con caratteristiche non omogenee con gli altri: si consideri che le prestazioni di un intero pacco batterie sono influenzate dall'elemento che ha la minor capacità o maggior resistenza rispetto agli altri. Le diverse soluzioni dipendono dalle scelte del progettista, dalle caratteristiche dei moduli e dalla specifica applicazione. Per esempio, l'intero pacco batterie potrebbe essere riutilizzato collegandolo ad un convertitore, per poi collegarlo in parallelo ad altri pacchi batterie tramite i relativi convertitori, mentre moduli con caratteristiche omogenee tra di loro potrebbero essere messi in serie per costruire un nuovo pacco dalle prestazioni ridotte.

Le celle che si vogliono adottare sono le EIG da 20 Ah, costruite nel 2010 ed utilizzate per un anno e mezzo in una applicazione particolare, a terra, per compensare la potenza richiesta dall'impianto di una funicolare [3]. La **Figura 21** mostra le celle prescelte.



Figura 21 – Cella Pouch EiG 20 Ah

Il sistema era formato da 10 moduli, in configurazione 12S-4P (un modulo era formato dalla serie di 12 elementi costituiti da gruppi di 4 celle in parallelo tra di loro), per una tensione nominale di 438 V: durante il suo utilizzo il sistema di accumulo era sottoposto a cicli caratterizzati da picchi di corrente impulsiva inferiori a 2,2 C in scarica e 1.25 C in carica. La

Figura 22 mostra il ciclo in corrente di dimensionamento del pacco batterie per l'applicazione della funicolare e quello effettivo di massima potenza rilevato in una campagna di prove:

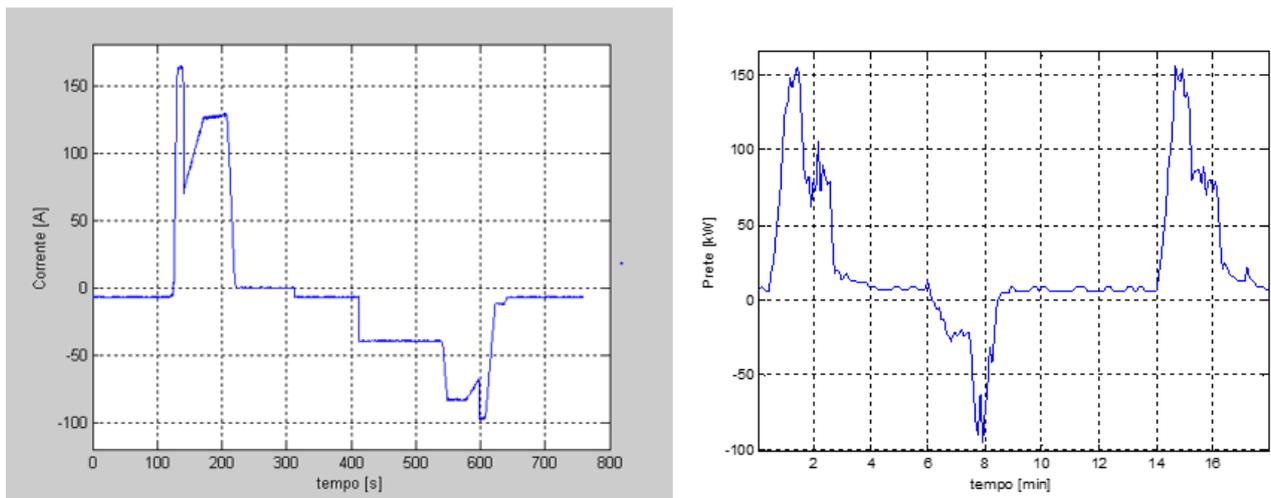


Figura 22 – Ciclo di dimensionamento e ciclo di potenza massima rilevata

Una giornata lavorativa era caratterizzata dalla esecuzione di circa 90 cicli quotidiani ed il sistema di accumulo era posto in un ambiente a temperatura costante, di 25-28 gradi. Da quanto detto si evince che le celle hanno subito un invecchiamento legato a questi cicli di lavoro ed uno di calendario di circa otto anni.

Il Data Sheet delle celle è già stato presentato in **Figura 3**, qui riproposta per comodità di lettura.

Product General Specification

Mechanical Characteristics

Model	C020
Length	217,0 ± 1 mm (excluding terminal)
Width	129,0 ± 1 mm
Thickness	7,2 ± 0,3 mm
Weight	approx. 428 g

Electrical Characteristics

Nominal Voltage	3,65 V
Nominal Capacity	20 Ah
AC Impedance (1 KHz)	< 3 mΩ
Specific Energy	174 Wh/Kg
Energy Density	370 Wh/L
Specific Power(DOD50%, 10sec)	3300 W/Kg
Power Density(DOD50%, 10sec)	4400 W/L

Operating Conditions

Charge Conditions	
Recommended Charge Method	CC/CV
Maximum Charge Voltage	4,15 V
Recommended Charge Current	0,5 C Current

Discharge Conditions	
Recommended Voltage Limit for Discharge	3,0 V
Lower Voltage Limit for Discharge	2,3 V
Maximum Discharge Current (Continuous)	up to 5 C Current
Maximum Discharge Current (Peak < 10 sec)	10 C Current

Operating Temperature	
Operating Temperature	-30°C / +55°C
Recommended Charge Temperature	0°C / +40°C
Storage Temperature	
Storage Temperature	-30°C / +55°C

Cycle Life at 25°C : (1 C Charge / 1 C Discharge, DOD100%)	
1000 Cycles to 80% Nominal Capacity	

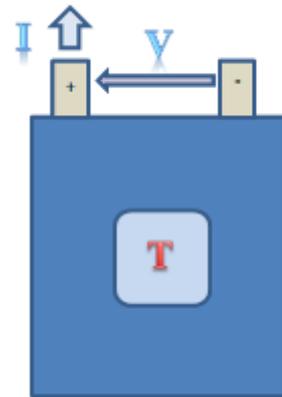


Figura 3 – Campo di funzionamento di una cella

Di seguito si presentano anche le curve di scarica e di capacità effettiva registrate a diversi valori di corrente.

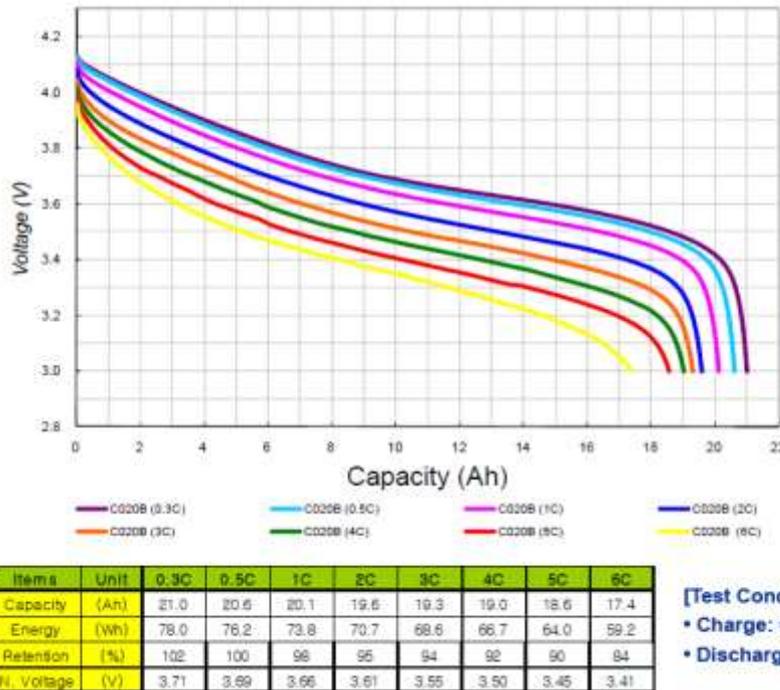


Figura 23 - Curve di scarica delle celle EIG 20 Ah

Per poter utilizzare le celle in Second Life, connettendole insieme, occorre quantificarne la capacità residua e l'omogeneità delle caratteristiche, inoltre occorre verificare che non vi siano possibili problemi di sicurezza legati al loro degrado. Nel caso specifico è stato possibile escludere problemi di auto-scarica perché i moduli, con i loro blocchi costituiti da 4 celle poste in parallelo, hanno mantenuto lo stesso livello di tensione per tutti gli anni di stoccaggio, inoltre la tensione di ogni blocco è identica a quella degli altri a meno della terza cifra decimale. Per verificare che la capacità residua sia omogenea per tutte le celle entro un ΔAh di tolleranza ammissibile per l'applicazione considerata si è eseguito un test di carica e scarica standard e misurata la capacità residua di ogni blocco di celle del vecchio modulo.

La capacità nominale dei blocchi nella prima applicazione era di 80 Ah, derivata dal fatto che erano connesse in parallelo delle celle da 20 Ah nominali; nei test di verifica della capacità effettiva residua dei blocchi si è riscontrato un valore minimo di 72.42 Ah ed uno massimo di 73.87 Ah, corrispondenti per la singola cella a valori di 18.10 Ah e 18.46 Ah.

2.3.3 Elettronica di controllo e connessioni di potenza

Dello sviluppo dell'elettronica di gestione e controllo del modulo se ne occupa il Dipartimento d'Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, che riporta il lavoro svolto nel documento di Ricerca Di Sistema Elettrico [6]. Per definire funzioni e struttura dell'elettronica è stato necessario un lavoro comune il cui sunto, qui di seguito, raccoglie le soluzioni proposte dall'Università di Pisa.

Il modulo, in funzione dell'elettronica presente, potrà essere inserito in una configurazione serie-parallelo con altri moduli analoghi così da aumentare la capacità e/o la tensione globale del sistema batterie, fino ad un massimo di 500 V. La corrente di modulo sarà di norma inferiore a 20 A, con possibilità di sopportare picchi di corrente fino a 100 A per un tempo limitato (5 o 10 s).

L'elettronica di controllo sarà costituita da due tipologie di sistemi: (i) un gestore di modulo (BMS principale), sempre presente e alimentato dal modulo stesso, in grado di assicurare la completa sicurezza di funzionamento e le funzionalità primarie sulla base di soglie impostabili per la singola cella, (ii) un eventuale circuito per ogni singola cella, alimentato da un sistema indipendente, in grado di memorizzare informazioni per la tracciabilità delle celle ed eseguire misure specifiche per facilitare la valutazione delle loro prestazioni ed invecchiamento.

- **Interfaccia del modulo**

Il modulo è progettato per essere inserito in armadi conformi allo standard 19" ed è funzionale alla configurazione complessiva del sistema batterie: in particolare, l'armadio deve garantire i flussi d'aria in direzione verticale necessari per la gestione termica del modulo e permettere il corretto interfacciamento elettrico di tutti i moduli costituenti il sistema batterie.

Ogni modulo prevede i contatti di potenza della serie delle celle, con eventuale presenza di un interruttore o, in alternativa, di circuito di bypass, l'interruttore potrebbe essere magnetotermico ed è possibile pensare anche alla presenza di un sezionatore. Oltre ai contatti di potenza sarà presente un'interfaccia di comunicazione isolata per permettere il dialogo tra le schede di gestione del sistema.

Infine, sarà presente una seconda interfaccia di comunicazione, comprensiva di contatti di alimentazione e completamente isolata rispetto agli altri contatti, per la gestione delle funzioni eventualmente collocate nelle schede delle singole celle.

- **Struttura del back-panel**

La scheda Backplane deve permettere l'inserimento di tutte i componenti del modulo batterie: celle, protezioni, elettronica di monitoraggio e gestione, compreso il sistema di bilanciamento.

La tecnologia realizzativa della scheda prevede l'uso di circuito stampato a doppia faccia, con rame sulle facce esterne di spessore 70 μm . Tale tecnologia risulta compatibile con le specifiche di corrente massima di modulo: infatti, l'utilizzo del calcolatore di traccia del software di progetto KiCAD permette di calcolare per le tracce dei circuiti stampati che verranno realizzati sulla scheda (nell'ipotesi di larghezza 15 mm di larghezza e, come detto uno spessore di 70 μm , per una lunghezza totale delle connessioni di 500 mm), le seguenti caratteristiche elettriche e termiche:

- Per una corrente di 20 A presenta $R = 4,3 \text{ m}\Omega$, $P_d = 1,8 \text{ W}$, $\Delta V = 86 \text{ mV}$, $\Delta T = 1,5^\circ\text{C}$
- Per impulsi di corrente di 100 A, sempre con $R = 4,3 \text{ m}\Omega$, si avrà $P_d = 43 \text{ W}$, $\Delta V = 430 \text{ mV}$, $\Delta T = 60^\circ\text{C}$, condizioni ancora accettabili se occasionali.

Occorre tenere presente che a questi valori si sommano poi le resistenze di contatto dei connettori e le resistenze delle connessioni nella scheda porta-cella.

Infine, la scheda Backplane presenta, insieme alle connessioni principali di potenza, anche le connessioni di media potenza per il bilanciamento attivo delle tensioni di cella, e quelle di segnale per il BMS principale.

Per le correnti di bilanciamento si prevede un valore massimo per la singola cella di 5 A, che si traduce in una corrispondente specifica per le relative connessioni. La Backplane deve prevedere la possibilità di implementare diversi meccanismi di scambio energetico: cella/pacco, pacco/cella oppure cella/cella, eventualmente con la mediazione di una cella ausiliaria³.

Sulla scheda devono poi trovare posto le connessioni di segnale. Si prevederà una connessione per collegare i sensori di temperatura al BMS principale: questo tipo di connessione sarà di norma isolata rispetto ai potenziali di cella e risulterà ancorata ai potenziali del BMS principale e, attraverso questo, sarà collegata al polo negativo del modulo.

Oltre alle linee individuate, il sistema permetterà la realizzazione di un bus di comunicazione isolato, con cui potranno essere gestite tutte le eventuali funzionalità aggiuntive relative alla singola cella, rese possibili tramite una intelligenza distribuita. Tra queste funzionalità aggiuntive hanno sicuramente importanza le implementazioni sulla tracciabilità e la memorizzazione di parametri ed eventi sperimentati dalla cella, che permettono a un qualsiasi BMS di stimare lo stato di salute attuale della cella.

La connettoristica di segnale non presenta problemi di selezione e reperibilità, mentre per i connettori di potenza le possibilità sono molto più limitate.

- **Struttura della scheda porta cella**

Ogni modulo contiene 12 schede, identificate con un proprio indirizzo fisico, ciascuna con una cella, per la formazione della configurazione 12S1P (12 celle collegate in serie). La scheda porta-cella presenta una coppia di connettori di potenza corrispondenti a quelli della scheda Backplane; questi connettori saranno connessi agli elettrodi della batteria con conduttori di adeguata dimensione, facendo uso della stessa tecnologia del circuito stampato usata nella Backplane e di eventuali barre metalliche. La connessione, oltre a soddisfare requisiti di portata di corrente, deve evitare stress meccanici agli elettrodi della cella.

La cella sarà fissata alla scheda in modo che non venga impedita la dissipazione di calore dal lato appoggiato al supporto e la distanza tra le schede dovrà comunque permettere la circolazione di aria tra le celle. Si prevede una distanza di almeno 5 mm tra una scheda e quelle adiacenti, considerando lo spessore della cella e degli altri componenti presenti.

Le funzioni base indispensabili per questa scheda sono quelle di supportare e connettere la cella al percorso di potenza e fornire al BMS principale l'informazione di temperatura (tramite termistore su contatti dedicati) e tensione. Oltre a questo, la scheda porta-cella potrà eventualmente disporre di una circuiteria aggiuntiva, alimentata indipendentemente e con una sua intelligenza di bordo, in modo da fornire ulteriori funzionalità di tipo informativo e permettere l'implementazione di una completa tracciabilità. Si elencano alcune possibili funzioni di questa sezione autonoma, facente capo a un connettore dedicato, elettricamente isolato dal potenziale di cella.

³ La possibilità di considerare una cella aggiuntiva per agevolare la funzione di equalizzazione è stata poi esclusa.

- ✓ Acquisizione (ridondante) della tensione della cella, evitando le cadute di tensione sui contatti di potenza.
- ✓ Acquisizione (ridondante) della temperatura della cella in più punti.
- ✓ Acquisizione della pressione tramite sensori di stress applicati al contenitore della cella (e dipendenti dal tipo di cella).
- ✓ Capacità di registrare un certo numero di eventi, per tracciare la storia della cella all'interno del modulo.
- ✓ Capacità di classificare la singola cella e di fornire i dati caratteristici della stessa, specie con riferimento a quelli utili per stimare lo stato di salute.

- Scheda di monitoraggio e controllo

Sulla scheda di monitoraggio e controllo risiede il BMS principale, che è costituito da una architettura con front-end analogico multi-cella e microcontrollore. Tale architettura, che costituisce ormai uno standard per la realizzazione di moduli a 12 celle e oltre, garantisce le funzioni base di sicurezza, legate alla tensione e alla temperatura delle celle, e dialoga direttamente con la scheda che ospita il misuratore di corrente⁴.

Il BMS principale ha a disposizione le tensioni di tutte le celle e può leggere il valore dei termistori presenti sulle schede porta-cella. Inoltre, può applicare tecniche di bilanciamento passivo, con piccole correnti, per l'equalizzazione delle correnti di aut scarica.

Oltre al BMS principale, sulla scheda è eventualmente presente una seconda sezione di controllo, in grado di gestire la sensoristica indipendente presente sulle schede porta-celle e il sistema di bilanciamento dinamico. Questa seconda sezione è dotata di alimentazione autonoma, in modo che i suoi consumi energetici non vadano a ricadere direttamente sul modulo e possano essere "contabilizzati" a parte.

La sezione ausiliaria usa i contatti dei connettori isolati aggiuntivi per scambiare dati con le schede porta-cella e con la scheda di bilanciamento dinamico.

La scheda di monitoraggio e controllo si interfaccia anche agli altri moduli della batteria e al suo sistema di gestione complessivo tramite un protocollo di comunicazione isolato di banda sufficiente.

- Scheda con switch e misuratore di corrente

Questa scheda viene collocata sul percorso di potenza, con connettori analoghi a quelli delle schede porta-cella, essa ospita il misuratore di corrente, a effetto Hall, e gli interruttori per mettere in sicurezza il modulo in caso di rischio per fuga termica.

⁴ La presenza del misuratore di corrente, basato su sensore di hall, è indispensabile per il corretto funzionamento del sistema. La presenza dello switch di protezione, oppure del bypass nel caso di moduli per applicazione ad alta tensione, garantisce la possibilità di escludere il modulo dalla batteria complessiva in casi critici con rischio di fuga termica.

Dialoga con la scheda di monitoraggio e controllo. In funzione dello spazio disponibile su PCB, potrebbe essere valutata la possibilità di integrare queste funzionalità di misura e protezione insieme al BMS principale.

- **Sistema per il bilanciamento dinamico**

Per la gestione di celle in applicazioni “Second Life”, oltre al bilanciamento passivo, sarà implementato su scheda dedicata l’hardware per eseguire funzionalità di bilanciamento dinamico attivo. In particolare, usando lo stesso connettore che porta al BMS principale le tensioni delle celle, sarà implementata una matrice di relè per la connessione ai terminali di una singola cella. L’uso dei relè permetterà di ottenere una connessione a sicurezza intrinseca, senza rischi di cortocircuiti accidentali tra celle a potenziali diversi.

La scheda per il bilanciamento dinamico potrà ospitare uno o più DC/DC, per implementare scambi energetici con politiche da definire (scambi cella/modulo, modulo/cella, esterno/cella, cella/cella).

Per l’efficacia del bilanciamento dinamico attivo si prevedono correnti di bilanciamento dell’ordine di $C/4$ ⁵.

⁵ Si intende un valore massimo di corrente pari alla capacità nominale della cella diviso per 4

2.3.4 Struttura del contenitore

In base a quanto detto, nello spazio messo a disposizione dal contenitore saranno ospitate all'interno degli slot:

- 1) 12 celle elementari componenti il modulo batteria
- 2) 1 scheda con il BMS
- 3) 1 scheda che memorizzerà le caratteristiche delle celle
- 4) 1 scheda per acquisizione di grandezze quali la temperatura in più punti della superficie di ogni cella e/o altri segnali
- 5) Sistemi dedicati ad altre possibili funzionalità (ad esempio, interruttori, sistemi di precarica)

Data l'altezza del contenitore (come si vedrà in seguito) sarà possibile che uno slot ospiti più schede, tutto il sistema sarà poi connesso elettricamente tramite il Back Panel.

La

Figura 24 riprende la **Figura 12** e la **Figura 16 b)** e mostra la struttura del contenitore così come lo si intende realizzare (il numero delle guide finali verrà definito dall'Università di Pisa sulla base delle caratteristiche delle schede da montare).

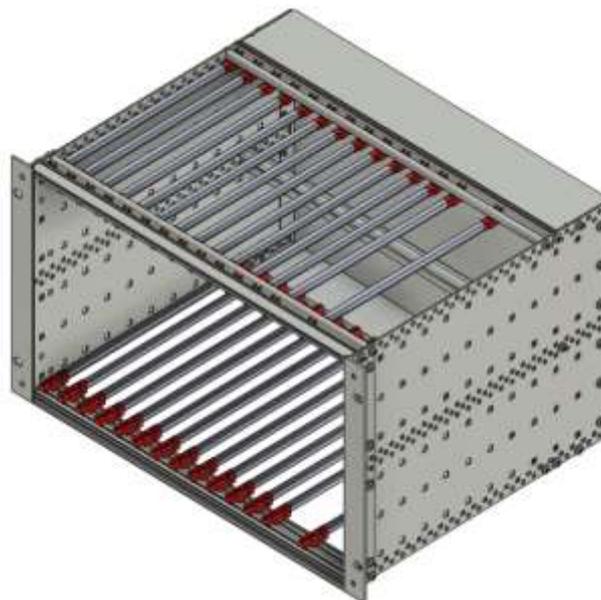


Figura 24 – Struttura del contenitore

Le prime dodici slitte da sinistra a destra ospiteranno le celle, le successive serviranno per il BMS e per le restanti schede, che dovranno ospitare interruttori, sistemi di precarica ecc.

Le celle andranno inserite all'interno di una struttura di sostegno, il tutto verrà inserito nel contenitore utilizzando le slitte, i collegamenti di segnale e di potenza saranno realizzati nella scheda Backplane.

Il complesso del sistema di montaggio delle celle nel contenitore è illustrato in [Figura 25](#).

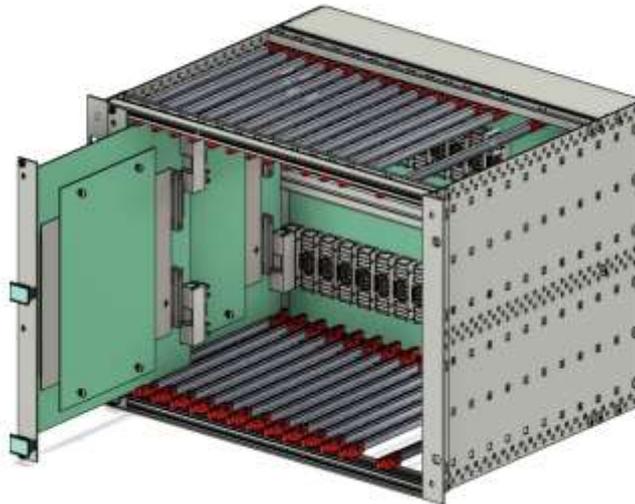


Figura 25 – Sistema di montaggio delle celle

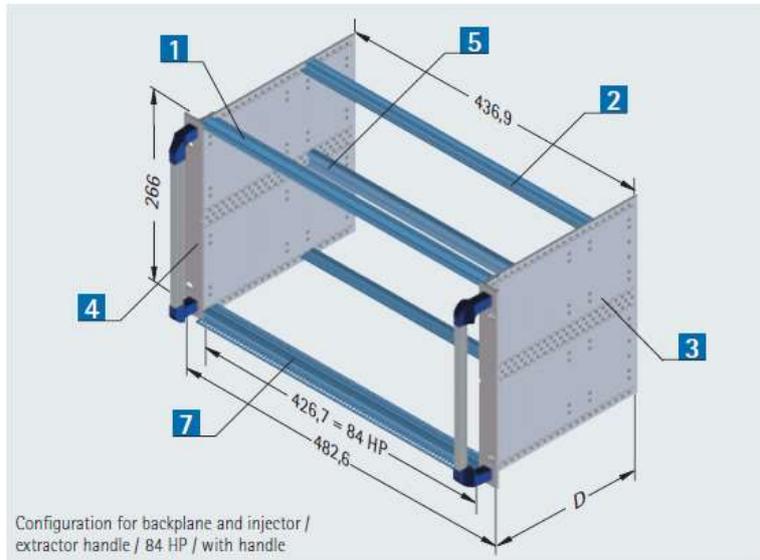
La Figura 25 riferisce, per quanto riguarda le proporzioni, ad un SubRack di 6u, la scelta di tale modularità è stata fatta per due motivazioni principali, una è creare una struttura che possa ospitare più di una tipologia di cella Pouch, ed una per la maggior reperibilità sul mercato dei SubRack 6U rispetto a quelli 5U. Di fatto la modularità in altezza privilegia passi di 3u: 3u, 6u, 9u: come detto uno degli scopi del presente lavoro è quello di adottare uno standard, anche de facto, che velocizzi la realizzazione del prodotto finale senza impegnarsi in soluzioni che potrebbero allungare i tempi di esecuzione.

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra, per esempio, una serie di celle Pouch prodotte dalla Kokam compatibili con le dimensioni del SubRack che si vuole realizzare.

Tabella 1 – Celle Kokam di dimensioni compatibili con il contenitore

Model	Capacity (Ah)	Dimension(mm)			AC-IR (mΩ)	Weight (kg)	Discharge Rate		Energy Density (Wh/kg)	Chemistry
		W	L	T			C-rate(C)			
							Continuous	Pulse		
SLPB60216216	25	226	227	6.3	1.20	0.600	5	8	154	HE NMC
SLPB98188216P	30	198	220	9.9	1.00	0.870	20	30	128	UHP NMC
SLPB78216216H	31	226	227	7.8	0.90	0.720	8	15	158	HP NMC
SLPB100216216H	40	226	227	10.0	0.80	0.990	8	15	160	HP NMC
SLPB120216216HR2	46	226	227	12.5	0.80	1.270	12	15	135	NANO

Fatta tale scelta, le dimensioni del SubRack saranno quelle indicate in [Figura 26](#), con D pari a 355 mm



Included in delivery

Item	Pc.	Description
1	2	Module rails, front
2	2	Module rails, rear
3	2	Side panels
4	2	Front bracket with or without handle
5	1	Mounting rail
6	8	Oval-head screws M 4 x 12 self-locking

Item	Pc.	Description
7	2	Threaded inserts, M 2.5 7 mm x 2 mm
8	4	Threaded inserts, M 2.5 5 mm x 1,5 mm (for rear BUS module rail)
9		Assembly material

Figura 26 – Dimensioni del Sub Rack

2.3.5 Supporto delle celle

La **Figura 27** mostra il sistema di supporto delle celle, che si compone di più parti.

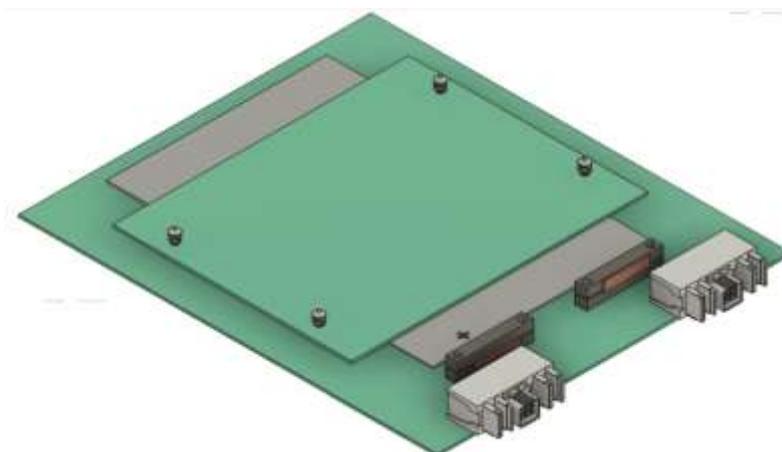


Figura 27 – Sistema di supporto delle celle

Tutto il sistema è realizzato tramite PCB; la cella viene inserita tra due sostegni: il primo è il circuito stampato con le connessioni elettriche, il secondo ha solo una funzione di supporto e smaltimento dell'eventuale calore prodotto, funzione che viene svolta tramite uno strato di rame avente funzione di dissipatore. La cella è inserita tramite un sistema di viti con molla che permettono un gioco tra le due parti, in modo da lasciare a disposizione uno spazio per le possibili deformazioni della superficie che si possono verificare durante la sua vita operativa. Le deformazioni, in particolare il rigonfiamento, devono comunque essere di entità limitata: un rigonfiamento di pochi mm può indicare un problema di sicurezza della cella e per questo motivo verrà previsto un apposito sensore per controllarlo ed interrompere la corrente in caso di bisogno.

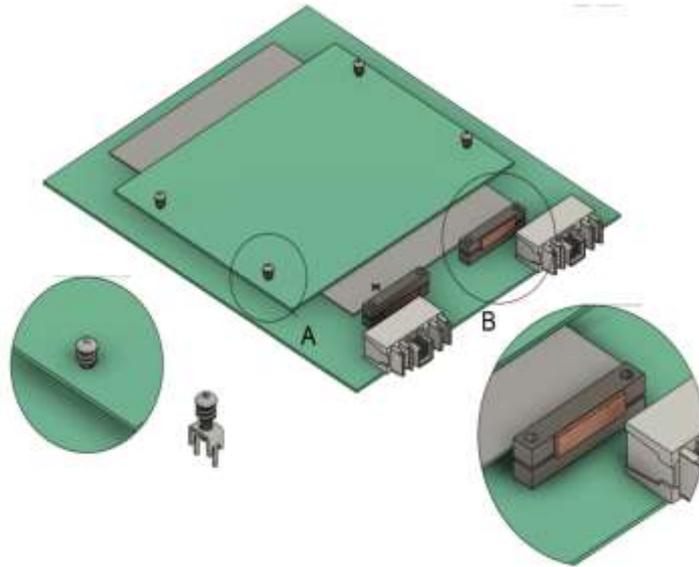


Figura 28 – Dettaglio dei sistemi di supporto e fissaggio della cella

A) Sistema di contenimento della cella con possibilità di espansione B) Sistema di fissaggio dei terminali

In Figura 28 è illustrato in dettaglio il sistema di supporto e fissaggio della cella, in A) sono indicate le viti con molla, che permettono alla cella stessa di espandersi, in B) viene mostrato come ancorare la cella alla scheda senza rischiare di danneggiarne i terminali, che vengono bloccati inserendoli in un supporto adeguato: la scheda PCB presenterà poi dei circuiti che serviranno a collegare ai terminali sia la parte di potenza che di segnale.

Allo stato attuale non è stato previsto di inserire nel PCB sistemi di protezione della cella come quelli mostrati, per esempio, in Figura 5, ma uno dei vantaggi del sistema modulare che si è proposto è quello di poter prevedere abbastanza semplicemente un upgrade senza modificare la struttura di insieme, per esempio basta inserire un nuovo PCB compatibile con i connettori del Backplane e rimontare il tutto.

2.3.6 Back Plane

Il Back Plane è l'elemento che permette di realizzare i collegamenti di potenza e di segnale tra le varie schede, inoltre esso ospiterà i terminali di potenza del contenitore.

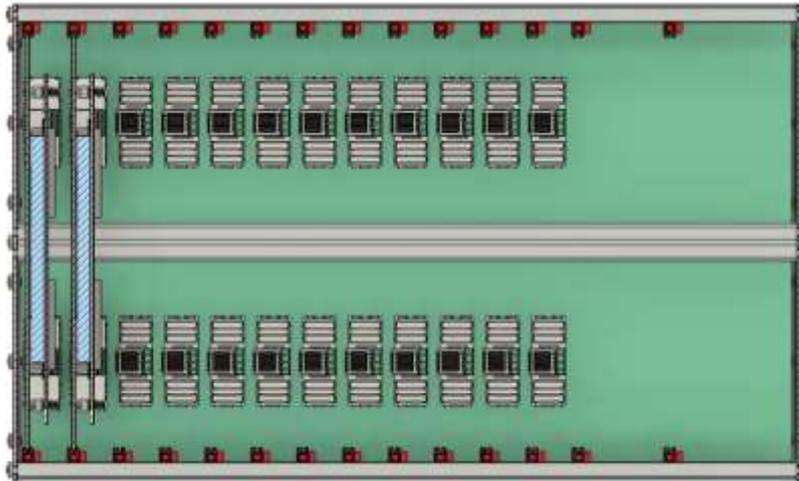


Figura 29 – Vista frontale del contenitore con la scheda Back Plane

La Figura 29 mostra una vista frontale del contenitore, con due celle inserite e la visione della scheda Back Plane: i connettori della scheda presentano una parte di potenza ed una di segnale.

Il disegno è solo indicativo in quanto le caratteristiche degli slot che ospiteranno il BMS e le altre funzionalità sono in via di revisione.

3 Conclusioni

I contenitori di celle al litio destinati a formare un modulo di un pacco batterie non sono un mero supporto per le celle stesse, ma parte integrante del sistema di accumulo, la cui progettazione va fatta in modo integrato con quella dell'elettronica che gestirà il modulo e considerando che il modulo stesso è parte fondamentale della gestione in sicurezza di tutto l'insieme. Tra le possibili soluzioni costruttive a disposizione del progettista una è quella di realizzare il contenitore utilizzando componenti standard reperibili sul mercato: nel presente lavoro si sceglie di realizzare il contenitore rivolgendosi alla vasta e consolidata tecnologia dei Rack standard da 19", con il vantaggio di poter usufruire di una serie di soluzioni costruttive predefinite e soprattutto di accedere anche al fornito mercato di accessori compatibili con un montaggio su queste strutture. Il vantaggio descritto implica anche che oltre all'assemblaggio e all'installazione semplificata dovuta a uno standard ormai acquisito, vi sia la possibilità di attingere a più fornitori del medesimo prodotto variando la fonte di approvvigionamento a beneficio di tempi e di costi realizzativi.

Il modulo batterie composto da 12 celle Pouch connesse in serie il cui disegno nella sua impostazione di base è qui riportato, è dotato di una serie di funzionalità innovative, tra cui la presenza di una scheda che memorizza le caratteristiche delle singole celle permettendo ad un BMS di valutarne lo stato di salute. In generale questa funzione è molto importante sia ai fini della diagnostica di una qualunque batteria, sia durante la fase di esercizio che a fine applicazione, quando si procede alla valutazione della possibilità di destinare la batteria (in tutto o in parte) ad un impiego ulteriore. Attualmente è in discussione nel parlamento Europeo un documento elaborato dalla Commissione Europea, recante la proposta per un nuovo regolamento relativo alle batterie e al trattamento dei rifiuti di batterie, il documento riporta una specifica richiesta a riguardo.

Pur non entrando nel dettaglio di tutte le funzionalità del modulo batterie il presente rapporto mostra i principi sui quali esso è stato concepito.

4 Riferimenti bibliografici

1. N. Andrenacci, M. Pasquali, G. Zummo, C. Menale, "Attività preliminari per la realizzazione di test di invecchiamento e di abuso elettrico di accumulatori elettrochimici per autotrazione, definizione di indicatori dello stato di salute delle singole celle, progetto di un sistema innovativo per il controllo termico bifase dei componenti elettronici ed elettrochimici dei veicoli elettrici", Report RdS/PAR2019
2. M. Pasquali, F. Vellucci, "Validazione sperimentale delle procedure per la valutazione dello stato di salute delle batterie", Report RdS/PAR2017
3. S. Costà, F. Vellucci, M. Pasquali, "Progettazione di un contenitore per celle al litio destinate ad un utilizzo di second life.", Report RdS/PAR2016
4. F. Vellucci, G. Pedè, "Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive", Report Ricerca di Sistema 2011/27
5. Manlio Pasquali, Francesco Vellucci, "Applicazione di un sistema di accumulo costituito da batterie al Litio ad un impianto funicolare: risoluzione dei problemi termici e gestione delle potenze" Report RdS/2011
6. R. Roncella, R. Saletti ed altri, "Caratteristiche dei BMS per sistemi di accumulo "second life" e linee guida per la progettazione", Report RDS/2020
7. L. Bartolucci, S. Cordiner, V. Mulone, M. Santarelli, "Dimensionamento ed Ottimizzazione della strategia di controllo del sistema di accumulo Second Life. Dimensionamento del sistema di accumulo Second Life", Report RDS/2020
8. Cinzia di Bari, Michele Mazzaro, Carla Menale, "Sicurezza dei sistemi di accumulo elettrochimico nella elettromobilità e negli impieghi stazionari", Energia, ambiente e innovazione 2/2018
9. C. Di Bari, M. Mazzaro, M. Pasquali ed altri, "Rischi Connessi Con Lo Stoccaggio Di Sistemi Di Accumulo Litio-Ione", pubblicazioni dei Vigili del fuoco dicembre 2019.
10. <https://vpoglobal.com/2018/02/26/wattentaxi-equipped-becker-marine-systems-cobra-battery-pack/>
11. <https://tanjent-energy.com/blog/the-importance-of-second-life-batteries-for-energy-storage/>
12. <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/intensium%C2%AE-max-megawatt-energy-storage-system>
13. https://www.armadi-rack.it/glossario_armadi_rack.asp
14. <https://schroff.nvent.com/en-us/>
15. <https://www.rittal.com/com-en/content/en/produkte/produkte.jsp>