



REGIONE  
TOSCANA



# ***Progetto H2 Filiera Idrogeno***

## ***Controllo elettronico del sistema di accumulo di energia in veicoli a fuel-cell***

***Roberto Saletti***  
***Dipartimento Ingegneria dell'Informazione***  
***Università di Pisa***



## Il contributo elettronico

Pierangelo Terreni

Federico Baronti

Luca Fanucci

Bruno Neri

Roberto Roncella

Roberto Saletti

Sergio Saponara

Tony Bacchillone

Gabriele Fantechi

Biagio Laneve

Emanuele Leonardi

Esa Petri

*Università di Pisa*

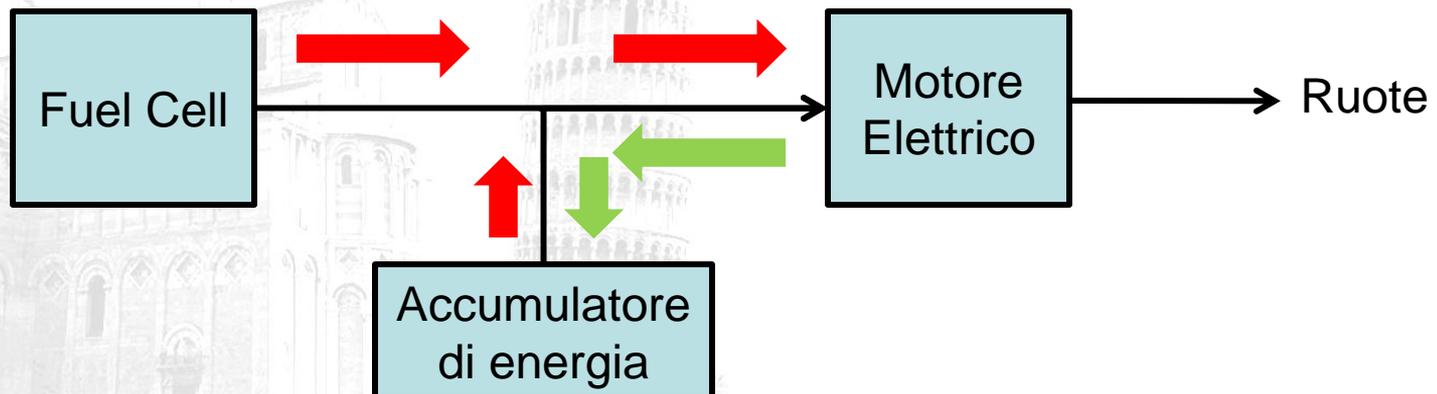
*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione:  
Elettronica, Informatica, Telecomunicazioni*

*H<sub>2</sub> Electronic Systems  
research group*



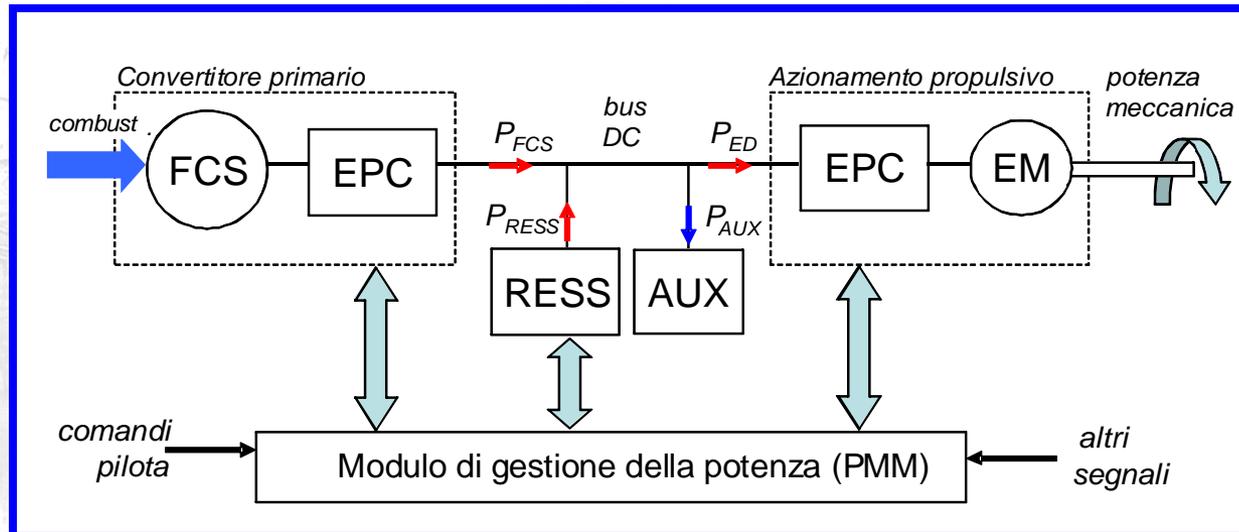
## Perché accumulare energia nel veicolo?

- Nel veicolo ibrido la cella a combustibile (fuel-cell a idrogeno) produce energia elettrica a emissioni zero
  - Potenza prodotta pressoché costante nel tempo
  - Il veicolo richiede potenza variabile e genera potenza in frenata
  - La fuel-cell non converte all'indietro energia elettrica in idrogeno
- Accumulatore di energia
  - Serbatoio di potenza aggiuntiva (accelerazione, in salita)
  - Recupera energia durante la frenata del veicolo (freno elettrico)
  - Agisce da "tampone energetico"



## Perché batterie a bordo del veicolo

- Architettura veicolo ibrido a fuel-cell
- Energy Storage System (blocco RESS)
- Batterie come elementi per energy storage
  - Possibilità di scarica e carica
  - Peso, costo, affidabilità, sicurezza

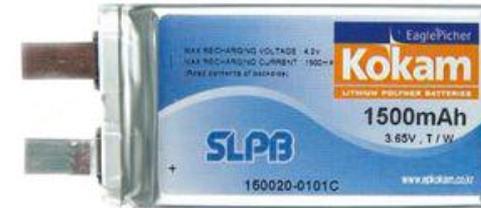


## Quali batterie?

- Le batterie con chimica al **litio** (nate per notebook e telefoni cellulari) emergono come alternativa al piombo per accumulatori nei veicoli
- Batterie agli ioni di Litio (Li-ion), al Litio e Polimeri (LiPo), al Litio-Ferro-Fosfato (LiFePO<sub>4</sub>)
- Vantaggi
  - Leggerezza, alta densità di energia (200 Wh/kg), altissime correnti di scarica
- Svantaggi
  - Costo, delicatezza (no sovraccarica, no sottoscarica, temperatura), possibilità incendio

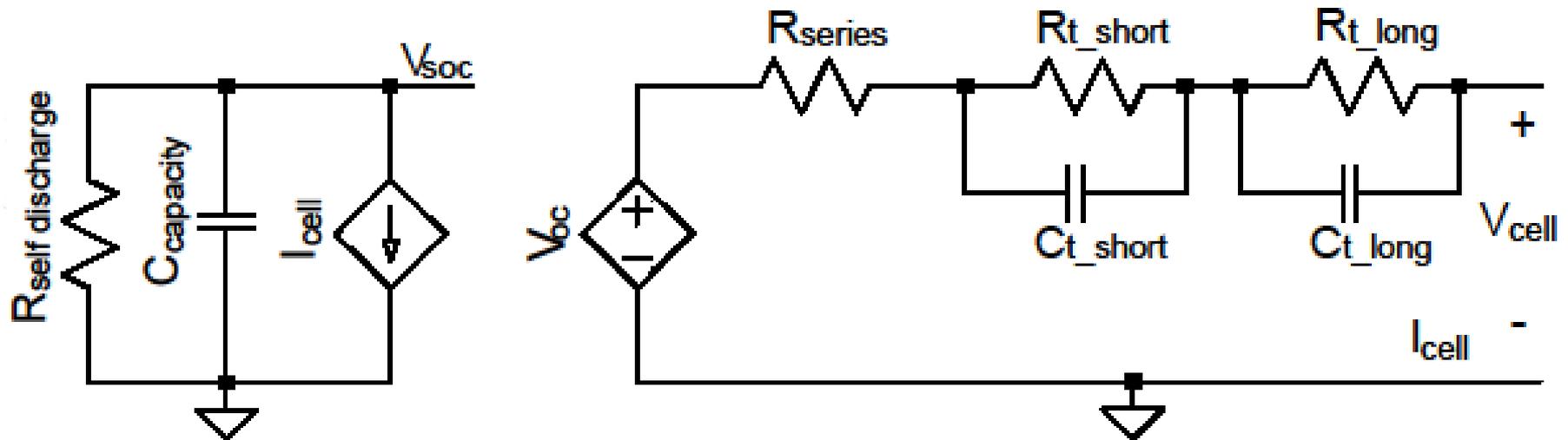
## Controllo elettronico delle batterie

- Batterie al litio nei veicoli?
- Sì, se accompagnate da un sistema elettronico di controllo per:
  - Monitoraggio celle
    - Tensione
    - Temperatura
  - Gestione intelligente celle
    - Carica
    - Scarica
    - Bilanciamento
    - Sicurezza



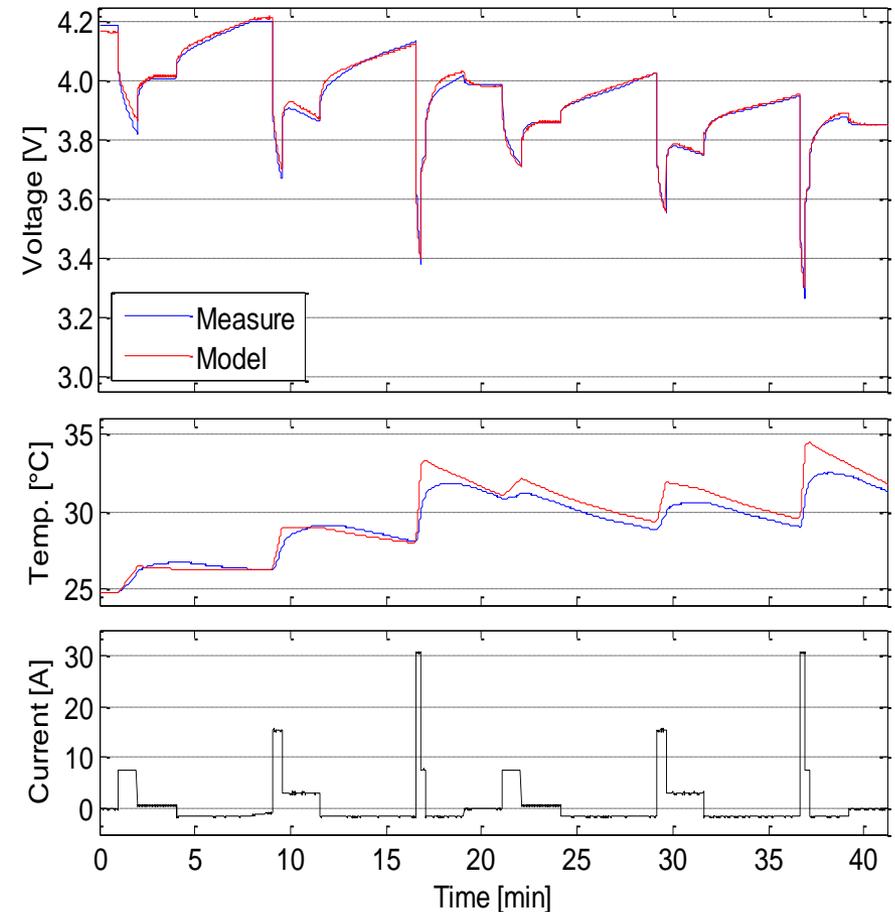
## Modello della cella

- Modello elettrico comportamentale della cella
- Si considera l'effetto della temperatura
- Tiene conto dell'autoriscaldamento della cella



## Corrispondenza modello-realtà fisica

- Confronto tra tensione nel:
  - Ciclo di lavoro simulato
  - Ciclo di lavoro misurato
- Confronto tra:
  - Temperatura simulata
  - Temperatura misurata
- Ottimo accordo
- Il modello predice accuratamente il comportamento reale

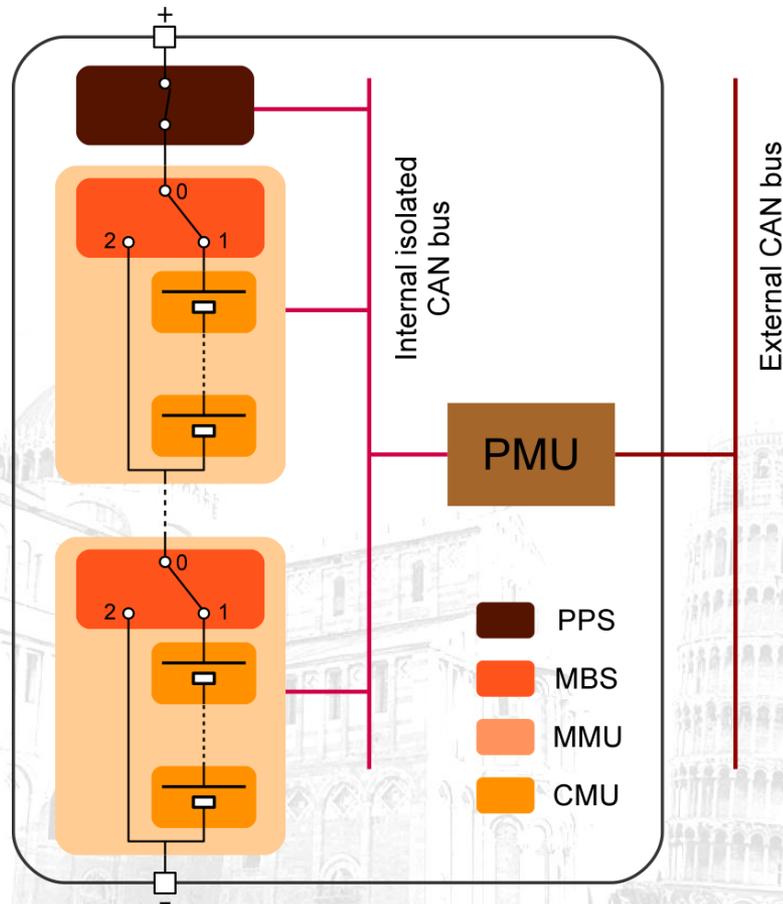




# I-BM<sup>2</sup>S Intelligent Battery Monitoring and Management System

- Risultato innovativo della ricerca
- Sistema Elettronico con architettura **gerarchica** per il controllo di batterie costituite da celle elementari collegate in serie
  - Misura tensione e temperatura **di ogni cella**
  - Misura della corrente e tensione totale di batteria
  - Equalizzazione della carica delle celle (balancing)
  - Stima dello stato di carica (SoC – State of Charge)
  - Protezione della batteria
  - Comunicazione con Elettronica di bordo del veicolo

# Architettura dell'I-BM<sup>2</sup>S



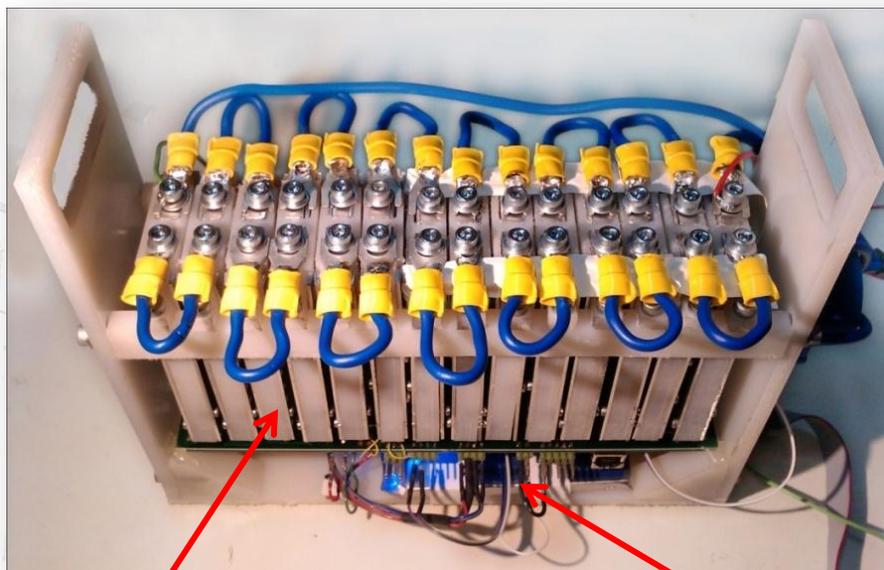
- CMU (Cell Monitoring Unit)
  - MMU (Module Management Unit)
  - PMU (Pack Management Unit)
  - MBS (Module Bypass Switch)
  - PPS (Pack Protection Switch)
- 
- Flessibilità e scalabilità
  - Ridondanza del controllo
  - Riconfigurabilità della batteria tramite i deviatori MBS
  - Bilanciamento tra le celle attivo (senza spreco di energia)

## Caratteristiche dell' I-BM<sup>2</sup>S

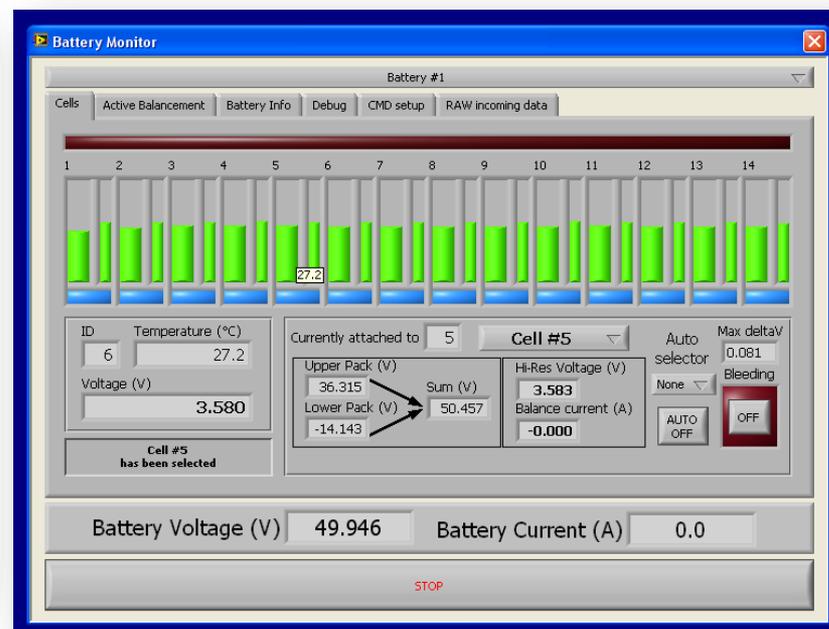
- Monitor tensione e temperatura su ogni cella
  - Basso costo (<1% del costo della cella)
  - Basso consumo (<1% dell'autoscarica della cella)
  - Memoria non volatile a bordo (memorizza ID, data di produzione, cicli effettuati, guasti o condizioni anomale)
- Controllo di modulo con monitor ad alta precisione
  - Replica della misura di tensione sulle celle a frequenza minore, risoluzione maggiore, ridondanza
- Equalizzazione delle celle
  - passiva (bleeding)
  - Attiva con rendimento > 90%
    - da modulo a cella
    - da cella a cella
- Connettività verso i livelli superiori con CANbus

## Realizzazione prototipo in scala

- Prototipo dell'I-BM<sup>2</sup>S in scala (modulo di 14 celle)
  - Celle da 1.5 Ah rispetto a 40 Ah per il veicolo
  - Prodotto "in itinere" (Firenze luglio 2011)



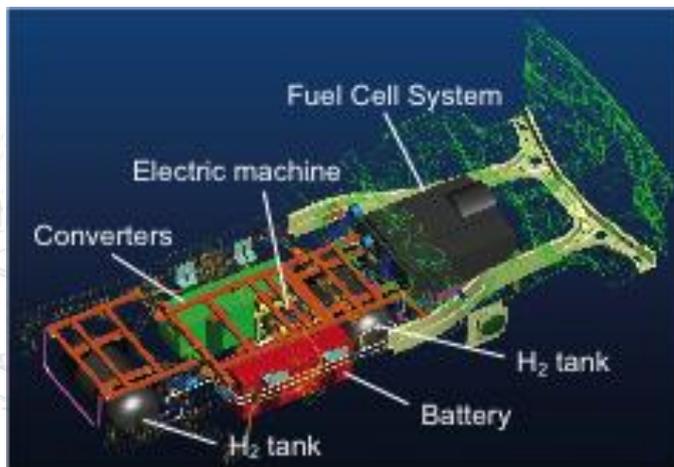
Singola cella

Elettronica  
del modulo

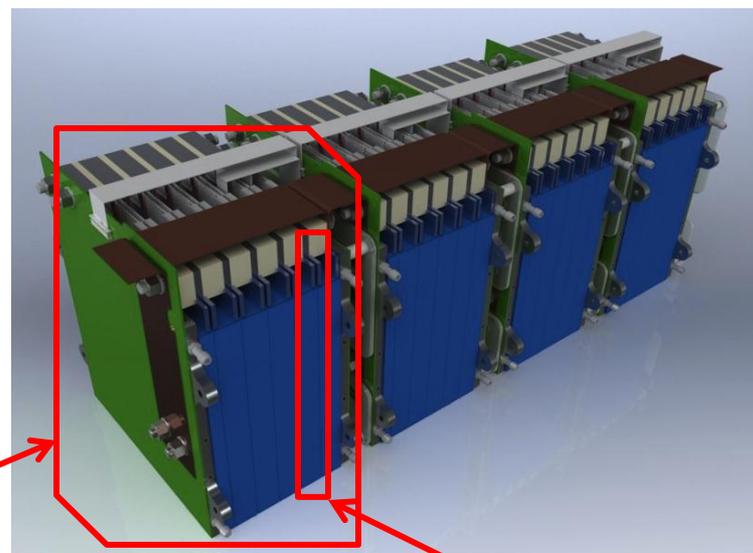
Software monitoraggio

## Energy Storage System per il veicolo

- Costruzione della batteria con I-BM<sup>2</sup>S per il veicolo Piaggio Porter ibrido a fuel-cell a idrogeno
  - 44 celle, 163 Volt, 6,5 kWh, 35 kW di picco



Batteria

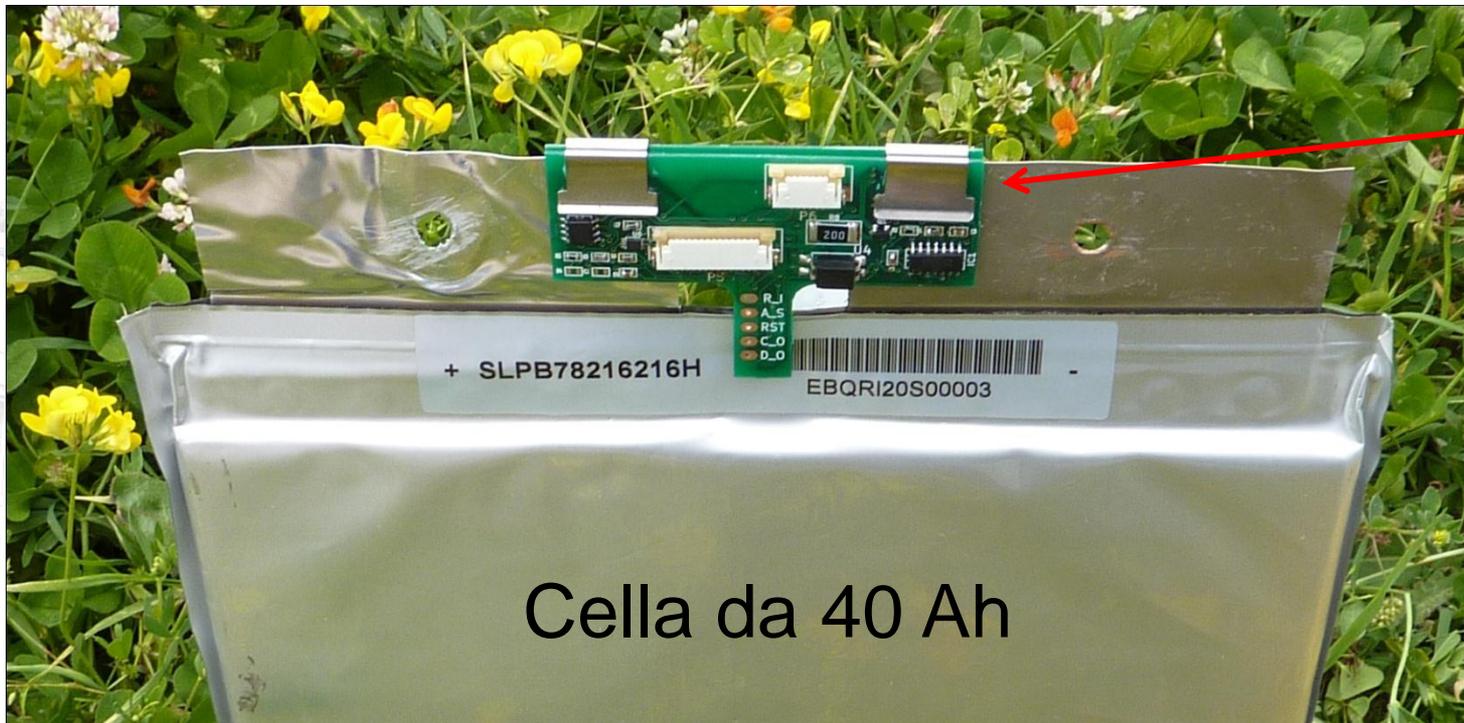


Modulo

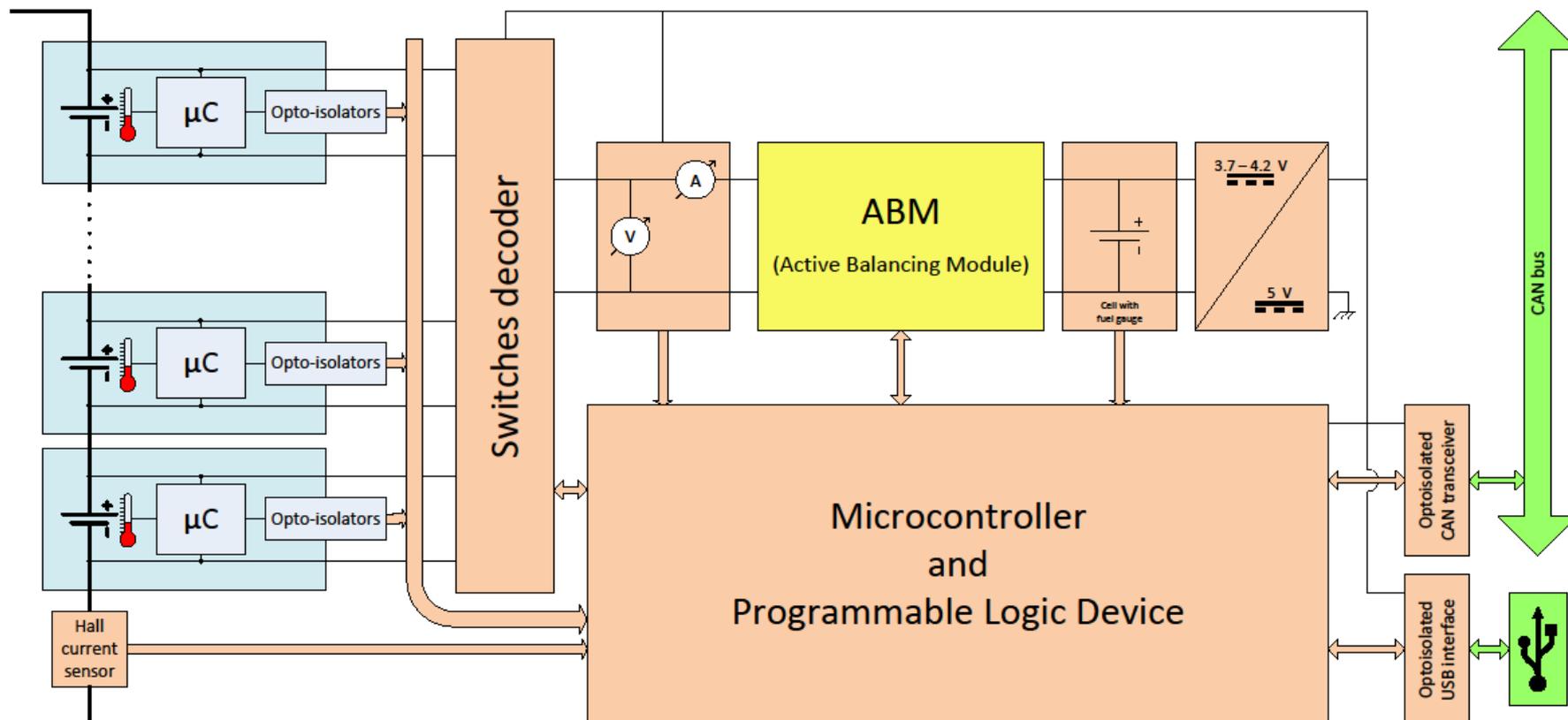
Cella

## Cella con elettronica di monitoraggio

- Primo livello della gerarchia del I-BM<sup>2</sup>S
  - Misura della tensione e temperatura
  - Identificazione della cella
  - Storia della cella (lifetime, numero cicli carica, etc.)

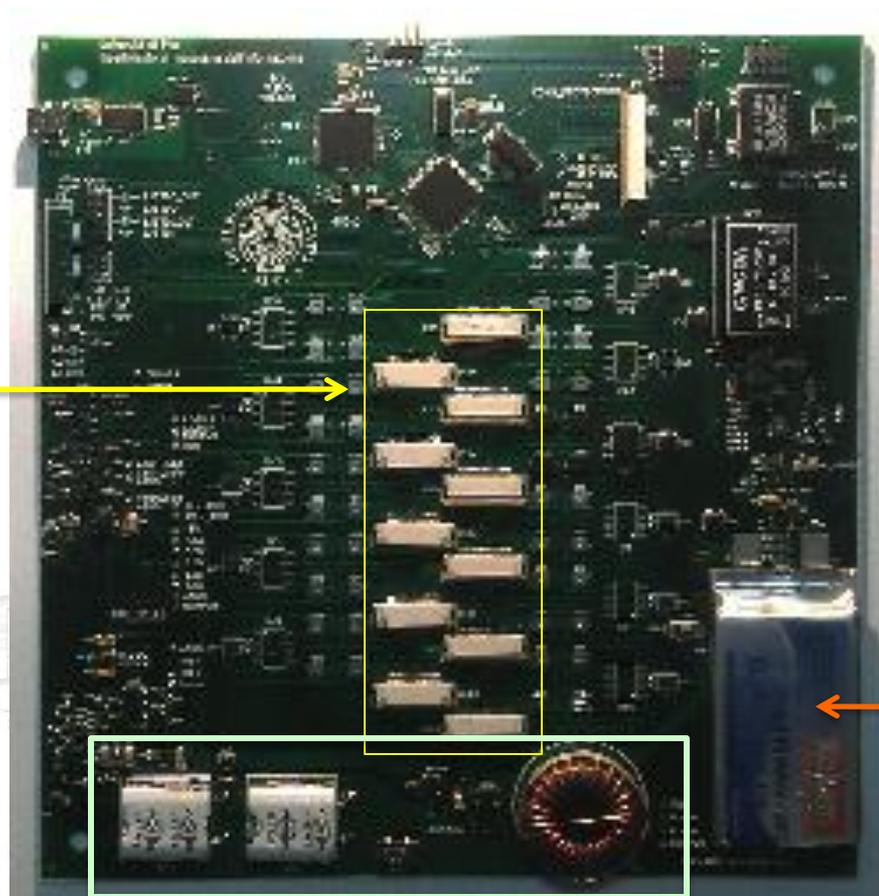


# Architettura controllo elettronico modulo



## Scheda controllo elettronico modulo

Connettori  
verso le celle  
del modulo

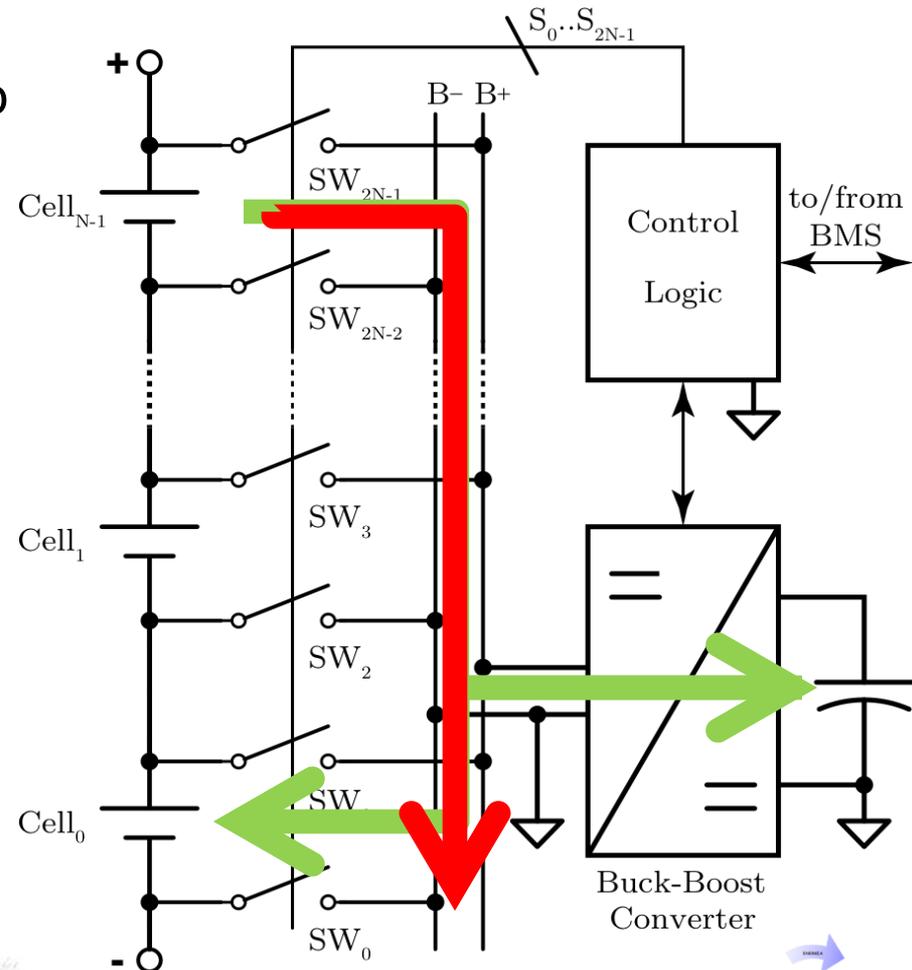


Cella ausiliaria  
di alimentazione

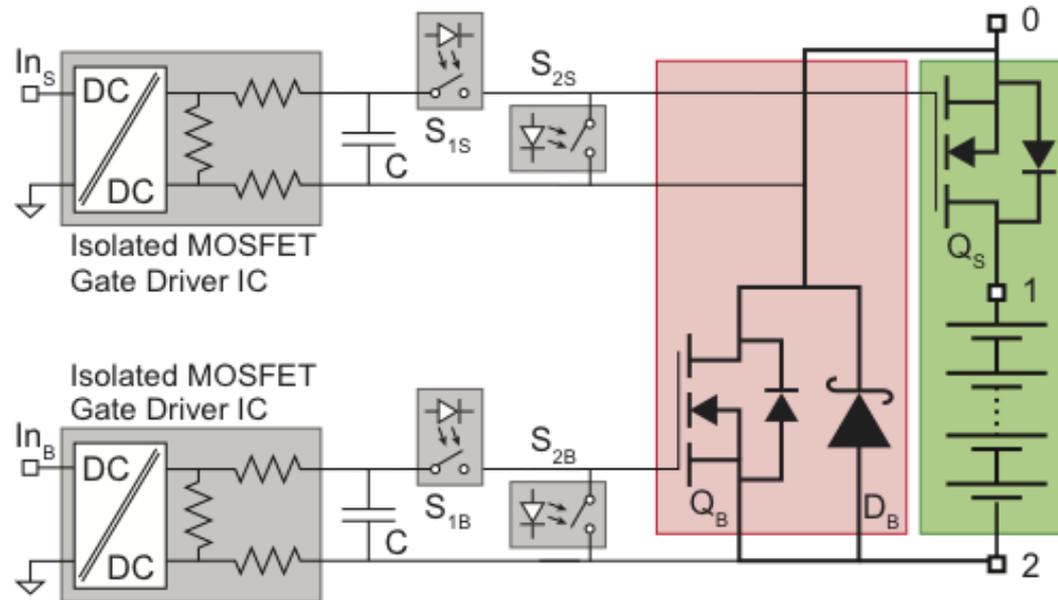
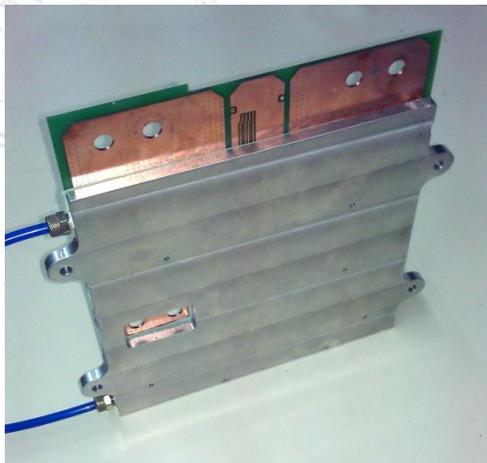
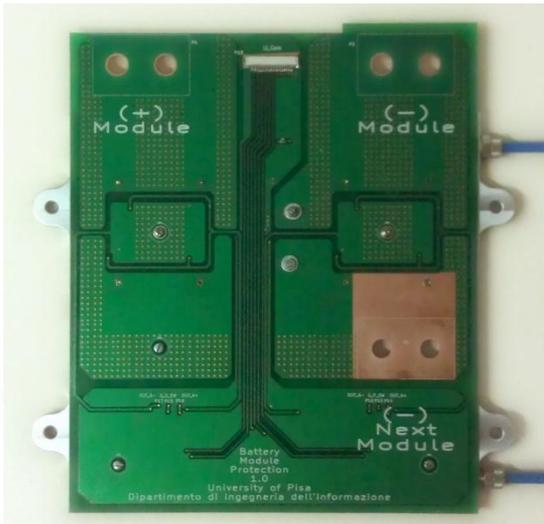
Equilibratore di carica delle celle basato su  
Convertitore Buck-Boost e Super-Capacitori

# Bilanciamento della carica delle celle

- La carica nelle celle della batteria si distribuisce in modo non uniforme
- La prestazione si riduce
- Le celle devono essere ribilanciate
- Bilanciamento passivo
  - Si butta via l'energia in eccesso
- Bilanciamento attivo
  - Si sposta la carica dalle celle più cariche a quelle meno cariche
- L'energia in eccesso da una cella viene "parcheggiata" su un super-capacitore da 5 F e poi riportata su un'altra cella
- Efficienza raggiunta del 90%



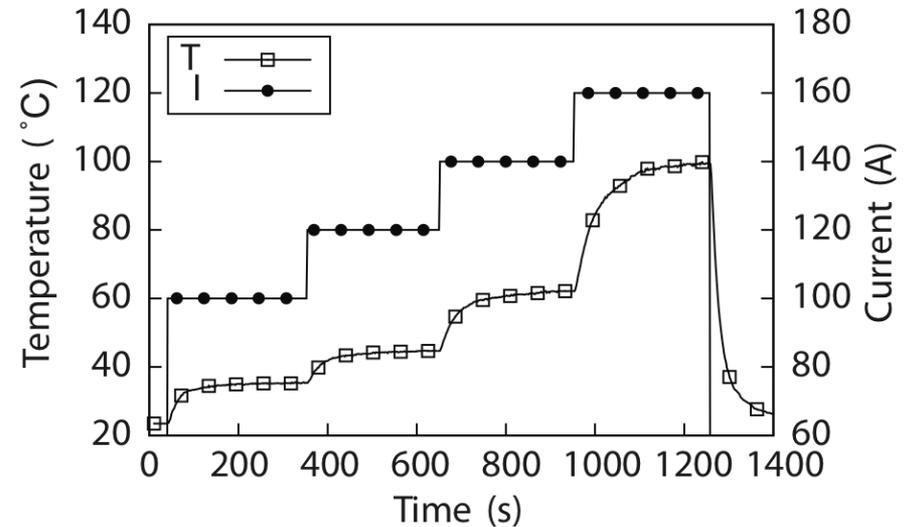
# Interruttore di by-pass del modulo



- Esclude il modulo dalla batteria
- Tempi di intervento ridotti
- Raffreddamento a liquido

# Caratterizzazione interruttore di by-pass

- L'interruttore deve deviare correnti anche fino a 160 A
- A 160 A di corrente
  - $\Delta T = 70^\circ \text{C}$
  - $P_D^{MBS} = 66 \text{W}$
- Rendimento ridotto di solo 1%
- p.es.  $N = 11$   
 $V_{\text{cell}} = 3.7 \text{V}$

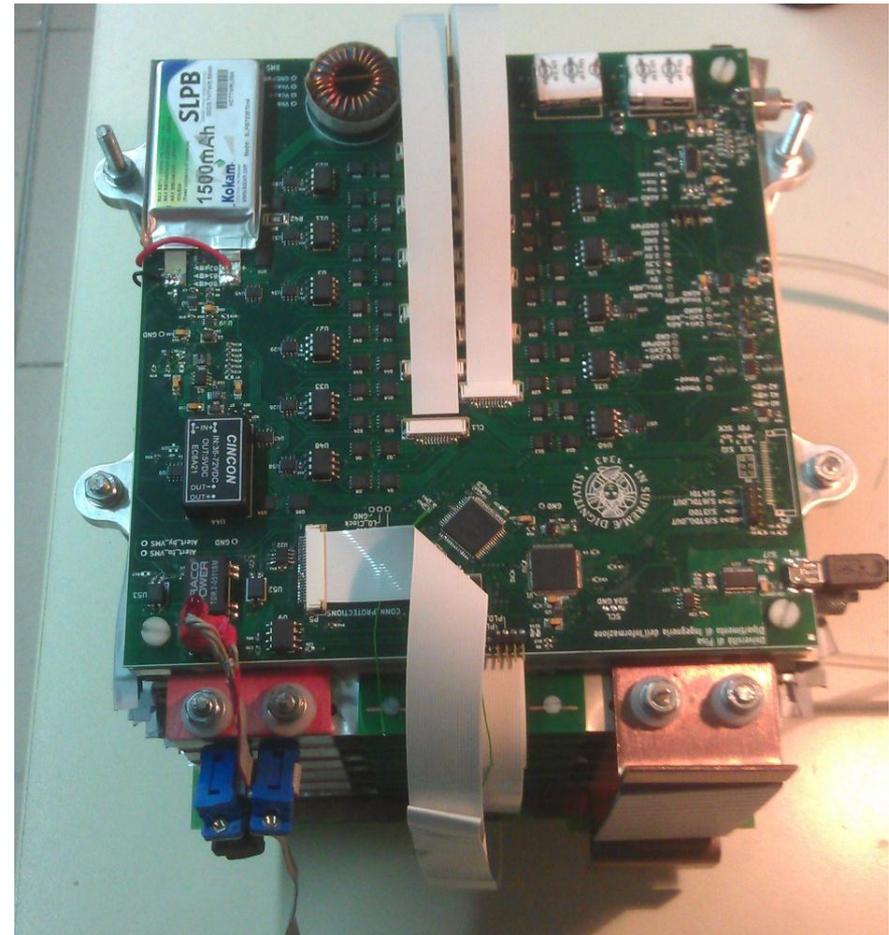


$$\Delta \eta = -\frac{P_D^{MBS}}{NV_{\text{cell}}I} = -\frac{r_{\text{on}}^{MBS} I^2}{NV_{\text{cell}}I} = -\frac{r_{\text{on}}^{MBS} I}{NV_{\text{cell}}} \approx -1\%$$

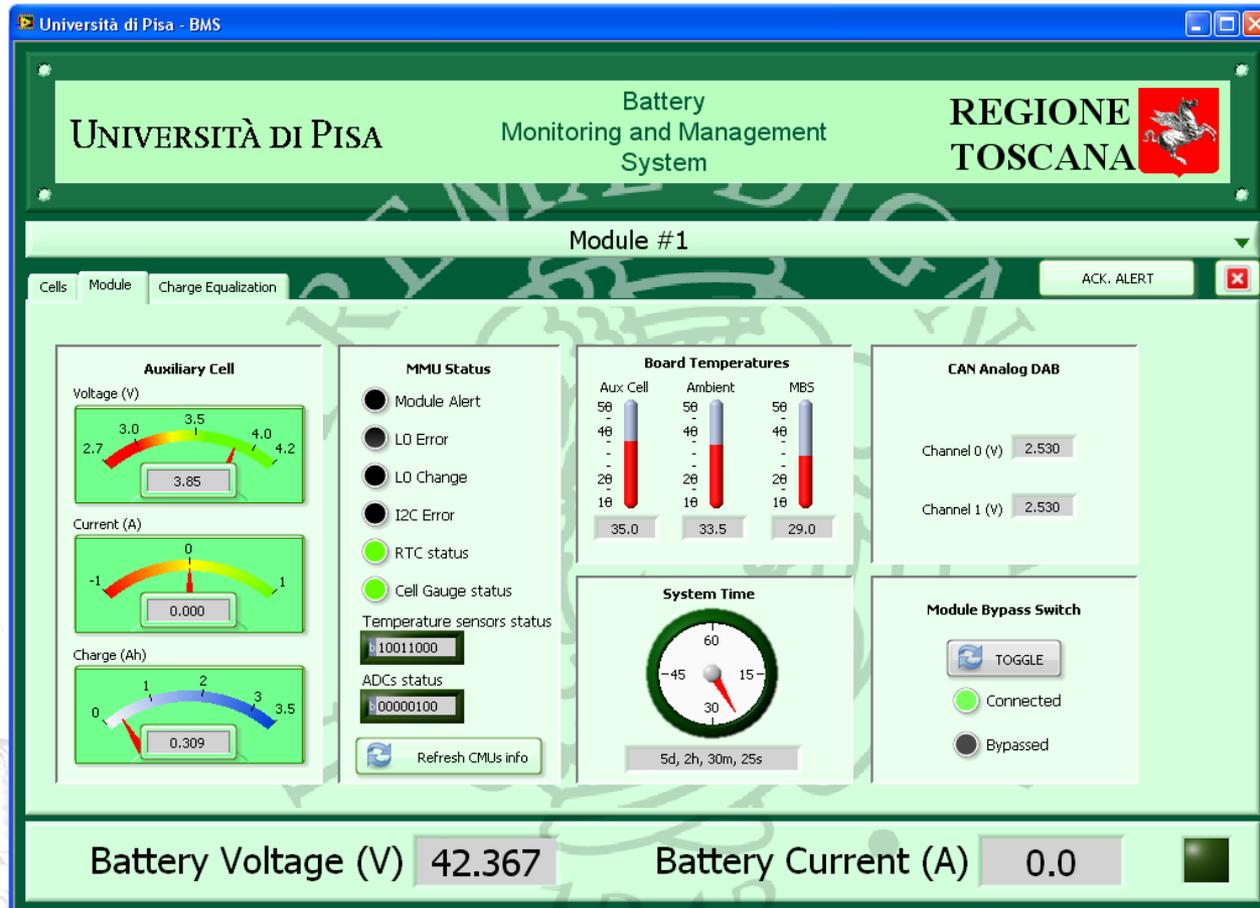
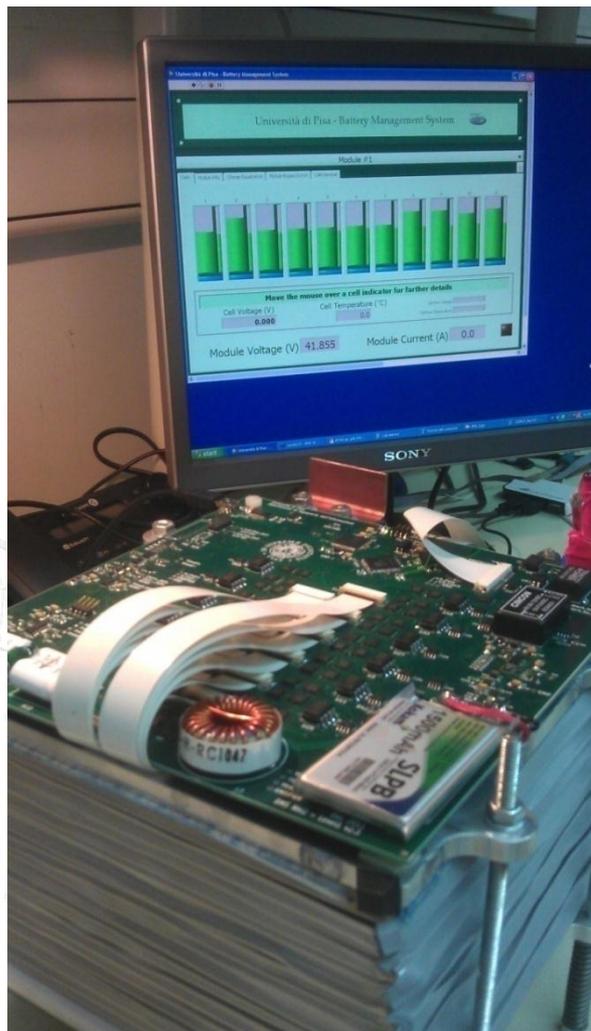
Al massimo carico!

# Il modulo con il I-BM<sup>2</sup>S gerarchico

- Il Modulo
  - 11 celle LiPo da 40 Ah
  - Batteria da 4 moduli
  - 11 CMUs
  - 1 MMU
  - 1 MBS
- Sistema di controllo elettronico I-BM<sup>2</sup>S
  - Hardware
    - 14 microcontrollori
    - FPGA
    - Interruttori di potenza
    - Sensori di Hall
    - Sensori di temperatura
  - Software/firmware
    - 3 livelli gerarchici di applicazioni
      - Firmware dei microcontrollori di cella
      - Firmware dei microcontrollori di modulo
      - Applicazione software di controllo di alto livello (Labview in laboratorio)



# Collaudo del I-BM<sup>2</sup>S gerarchico

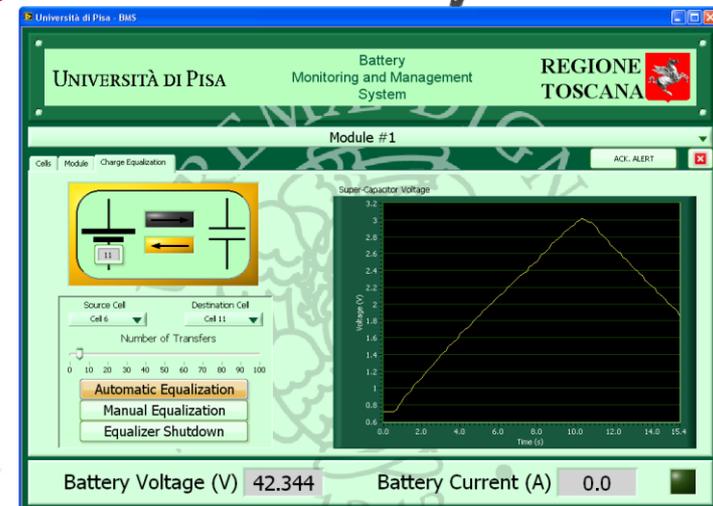
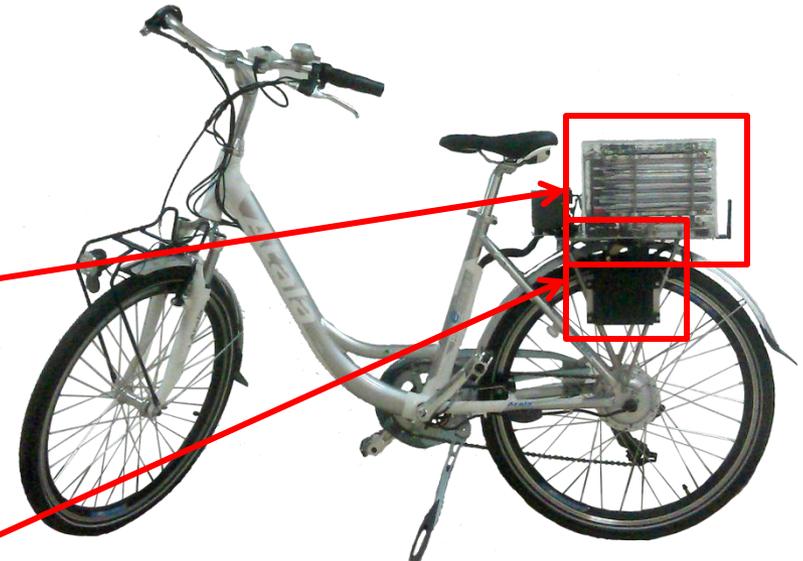


## Dimostratore odierno

- Un modulo della batteria con I-BM<sup>2</sup>S installato su bicicletta a pedalata assistita
- Modulo di telemetria per monitoraggio wireless
- Controllo a distanza della batteria
  - Tensioni
  - Temperature
  - Correnti
- Un modulo dà alla bici energia sufficiente per correre la Milano Sanremo

Modulo

Telemetria



## Conclusioni

- Realizzazione di sistema di accumulo energia per veicolo con fuel-cell all'idrogeno
- Sistema elettronico BMS innovativo a struttura gerarchica per monitoraggio e controllo di batterie di veicoli ibridi ed elettrici di qualunque tipo
- Realizzazione di prototipo di BMS in scala ridotta
- Realizzazione di modulo da 6kWh con BMS dimostrato su bicicletta elettrica
- Messa in atto di collaborazioni efficaci e multidisciplinari
- Preparazione del terreno per ingegnerizzazione e trasferimento tecnologico sul territorio
- Generazione di conoscenza e ricaduta tecnologica su ambiti affini alla Filiera Idrogeno (oltre gli obiettivi del progetto)
- Dimostrazione di come il finanziamento pubblico (Filiera Idrogeno) ben indirizzato, con passi di verifica attenti e puntuali porti a risultati di successo