



FCLab

Università degli Studi di Perugia
Dipartimento di Ingegneria

Implementazione di **tecnologie elettrochimiche** in **architetture ibride** per la mobilità sostenibile:

- ✓ sistemi on-board
- ✓ Tecnologie di accumulo dell'energia
- ✓ Infrastruttura

Relatore: Prof. Linda Barelli

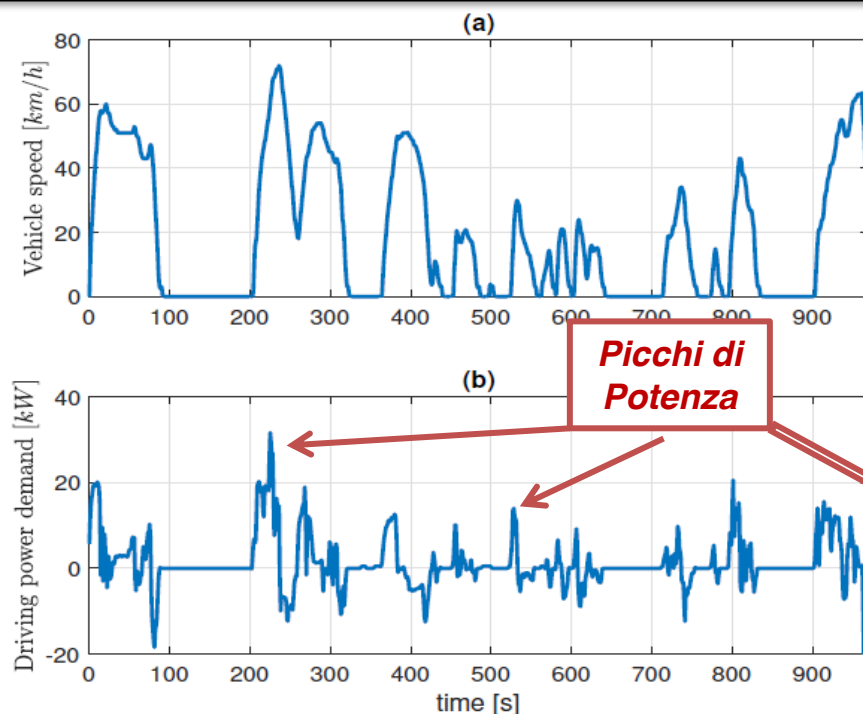
Mobilità Sostenibile: Bio-combustibili e infrastrutture, 11 dicembre 2019 - Napoli



**EUROPEAN
FUEL CELL**
CONFERENCE & EXHIBITION



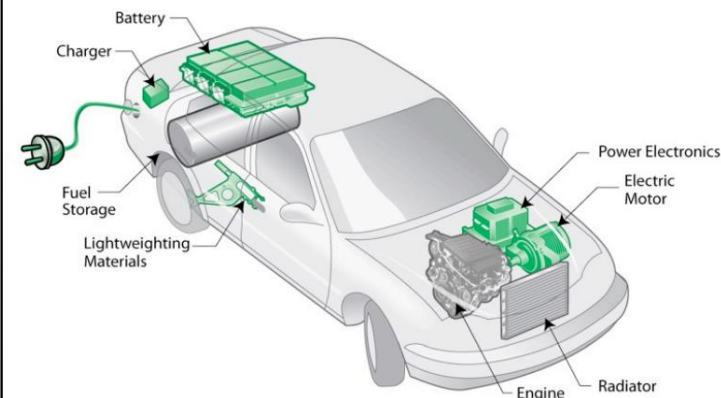
R&D sistemi on-board: ibridazioni di tecnologie elettrochimiche



Profilo reale di un
ciclo di guida di una
città congestionata:

(a) Velocità veicolo

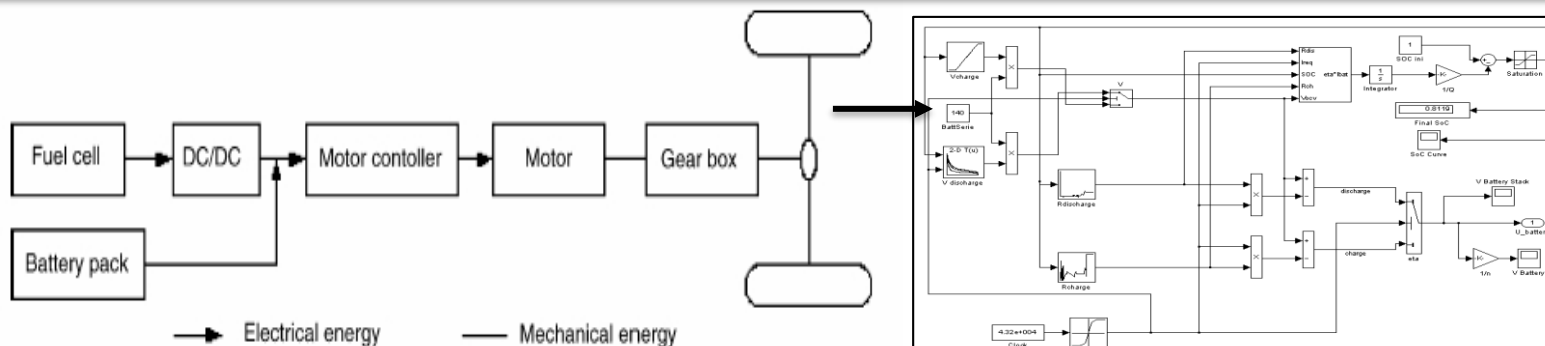
(b) Potenza
richiesta



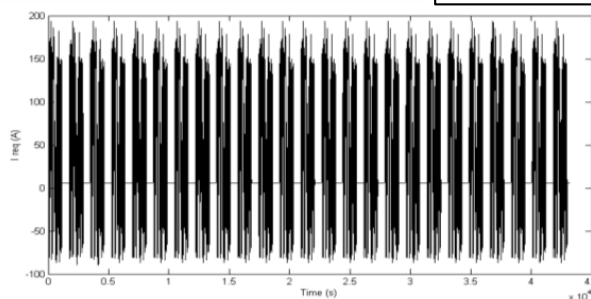
**Riduzione
vita della
batteria !**

- ✓ Sviluppo sistemi di stoccaggio ibridi (H-ESS) per la propulsione e per il soddisfacimento dei carichi ausiliari al fine di accoppiare tecnologie con caratteristiche diverse preservandole e migliorando le prestazioni ampliando il dominio applicativo rispetto all'applicazione delle singole tecnologie
- ✓ Sviluppo di power management innovativi tramite implementazione di algoritmi stocastici

H-ESS per propulsione bus: Sistema ibrido PEMFC/Batteria LiFePO₄



Ciclo di lavoro reale
12 h

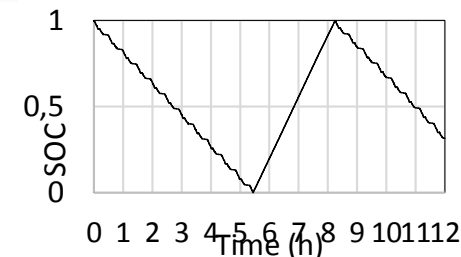


Simulazioni:

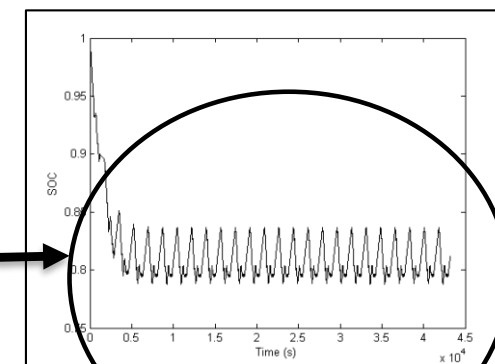
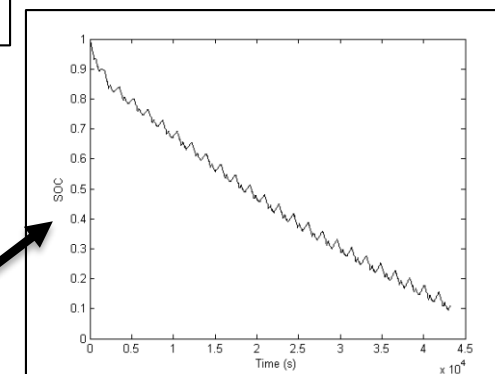
- Pacco batteria: 140
batterie da 200 Ah

- Variazione
potenza PEMFC
- Variazione
intervallo di
funzionamento
PEMFC $f(\text{SOC}_{\text{bat}})$.

#	PEMFC power [kW]	Min SOC value with PEMFC off	Max SOC value with PEMFC on
1	16.5 (11.2 kg H ₂)	80%	90%
3	33.0 (18.5 kg H ₂)	80%	90%



SOC trend da simulazioni

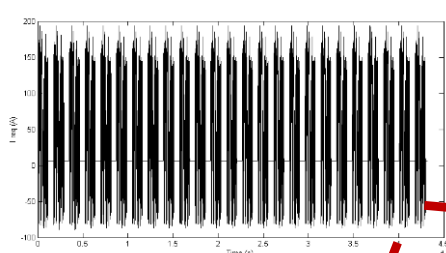


Risultati

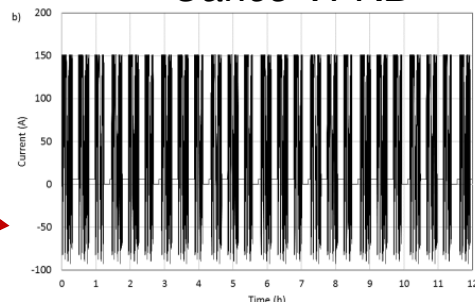
H-ESS propulsione bus: Sistema ibrido batteria LiFePO₄/VRFB

	SYSTEM
Technology	LiFePO ₄ -VRFB
LiFePO ₄ batteries in series	140
LiFePO ₄ battery pack capacity (kWh)	8
VRFB cells number	352
VRFB installed capacity (kWh)	31

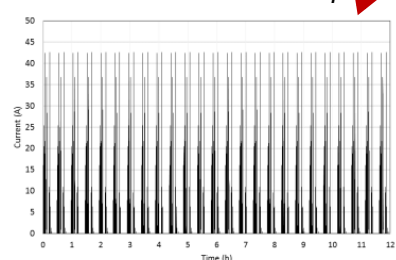
Ciclo di lavoro reale 12 h



Carico VFRB



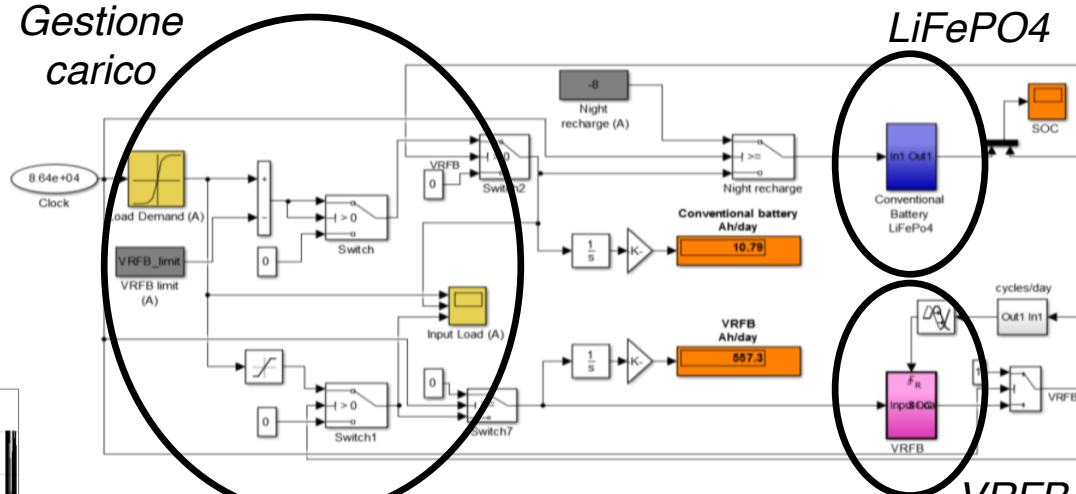
Carico LiFePO₄



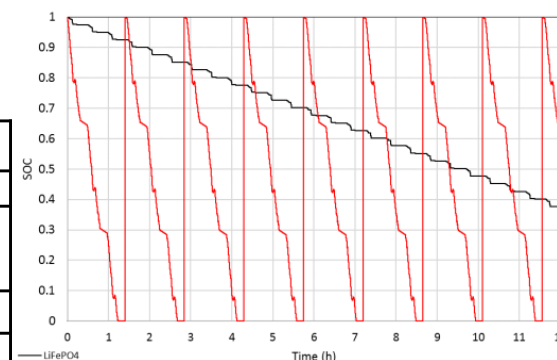
On board technology (1620 kg massa totale)	Life expectation (years)		
	LiFePO ₄	PEM	VRFB
Battery (95 kWh) – PEM system (16.5 kW – 11.2 kg H ₂)	2.7	4*	-
Only LiFePO ₄ Battery (124 kWh)	1.8	-	-
Hybrid Battery system (8 kWh LiFePO ₄ - 31 kWh/ 72 kW VRFB)	9.5	-	7

*18,000 h durata per applicazione in bus

Gestione carico

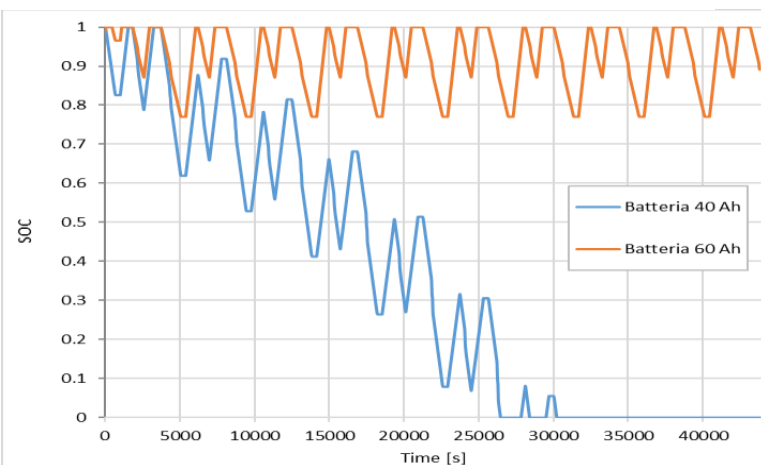
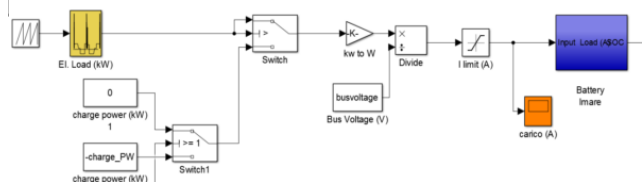
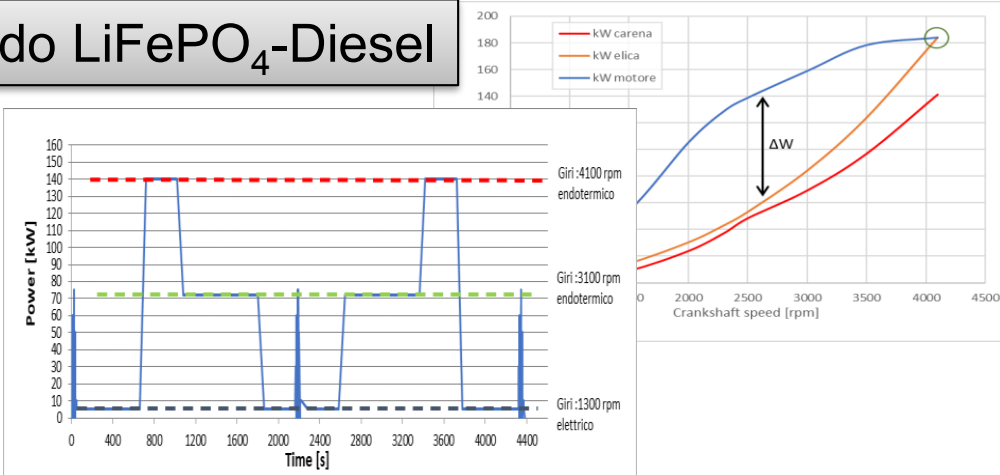


Risultato simulazione: SOC trend



H-ESS propulsione imbarcazione: sistema ibrido LiFePO₄-Diesel

Navigation mode	Power	Speed	Crankshaft Speed	Propulsion Engine
	(kW)	(kn)	(rpm)	(-)
Manoeuvres	4.78 ÷ 75	5.14 ÷ 12.4	1300 ÷ 3100	Electric
Low speed	4.78	5	1300	Electric
High speed	140	16	4100	Diesel

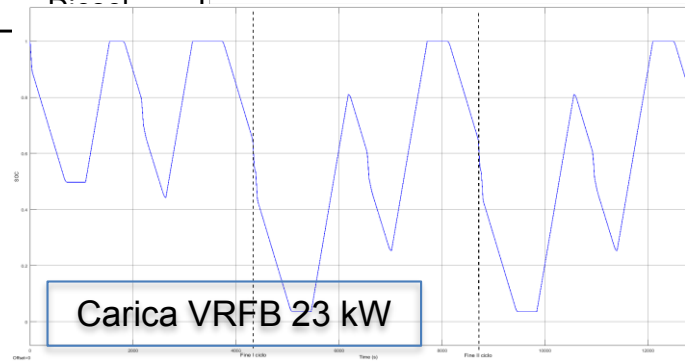
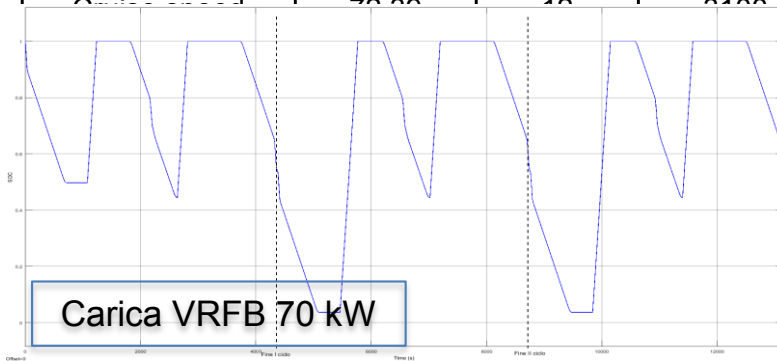
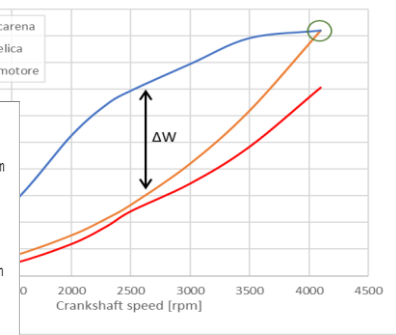
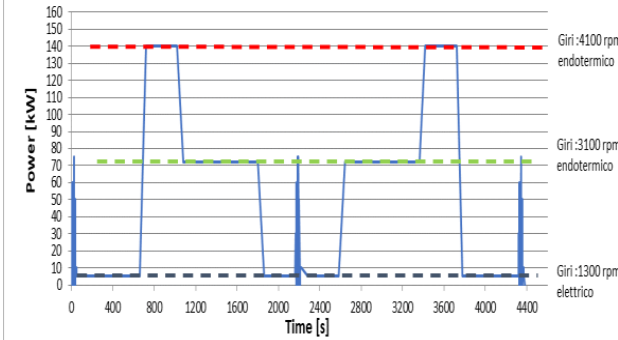


Capacità cella C	40 Ah	60 Ah
Num. celle serie	90	100
Num. stringhe parallelo	1	1
Tensione bus	270 V	277 V
Max. Charging rate	1 C (10.8 kW)	1 C (18 kW)
Continuous C-rate	3 C (32 kW)	3 C (54 kW)
Pulse C-rate	10 C (108 kW)	10 C (180 kW)
Energia Batteria	10.8 kWh	18 kWh

	consumo comb (kg)	SOC _{ini} -SOC _{final} (%)	Δcom b (kg)	kWh ciclo	Consumo spec. medio (g/kWh)
Diesel	19.03	-	-	83.55	228
Ibrido 40Ah	18.3	18.3	0.432	83.55	224
Ibrido 60Ah	18.47	0	0	83.55	221

H-ESS propulsione imbarcazione: sistema ibrido VRFB-Diesel

Navigation mode	Power	Speed	Crankshaft Speed	Propulsion Engine
	(kW)	(kn)	(rpm)	(-)
Manoeuvres	4.78 ÷ 75	5.14 ÷ 12.4	1300 ÷ 3100	Electric
Low speed	4.78	5	1300	Electric
High speed	140	16	4100	Diesel



Sizing VRFB:
Pnom 70 kW
Pmax (1.5 Pnom)
Capacità 5.8 kWh

Flessibilità:

- ✓ *Variazione del carico all'elica alla velocità di crociera: la riduzione fino a 23 kW della potenza di ricarica della batteria è compatibile, a parità di altre condizioni al contorno, con un incremento del carico all'elica da 91 a 138 kW.*
- ✓ *Variazione tempo di navigazione alla velocità di crociera: la ricarica alla potenza nominale della VRFB è compatibile, a parità di altre condizioni al contorno, con una riduzione da 12 a circa 5 minuti per la ricarica da parte del motore endotermico.*

Power management per architetture ibride: implementazione del Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) approach

Assunzioni
iniziali

- Stima iniziale del vettore: $\hat{\theta}_0$
- Definizione della loss function: $y(\theta)$
- Condizione di convergenza: $y(\theta_k) < y_{limit}$ e/o $N_{iter}^k = N_{max}$

Calcolo
iterativo

- Aggiornamento dei coefficienti dell'algoritmo: $a_k = \frac{a}{(A+k+1)^\alpha}$ e $c_k = \frac{a}{(A+k+1)^\alpha}$,
 k – numero di iterazioni
- Perturbazione del vettore: $\hat{\theta}_k^\pm = \hat{\theta} \pm c_k \Delta_k$
- Calcolo del gradiente della loss function: $g_k(\hat{\theta}_k) = \frac{y(\theta_k^+) - y(\theta_k^-)}{2c_k} \begin{bmatrix} \Delta_{k1}^{-1} \\ \dots \\ \Delta_{k1}^{-1} \end{bmatrix}$
- Aggiornamento della stima iniziale: $\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - a_k g_k(\hat{\theta}_k)$
- Valutazione della condizione di convergenza

Soluzione
del problema

- Stop delle iterazioni quando si soddisfano le condizioni di convergenza
- Aggiornamento finale della stima iniziale come soluzione del problema di ottimizzazione

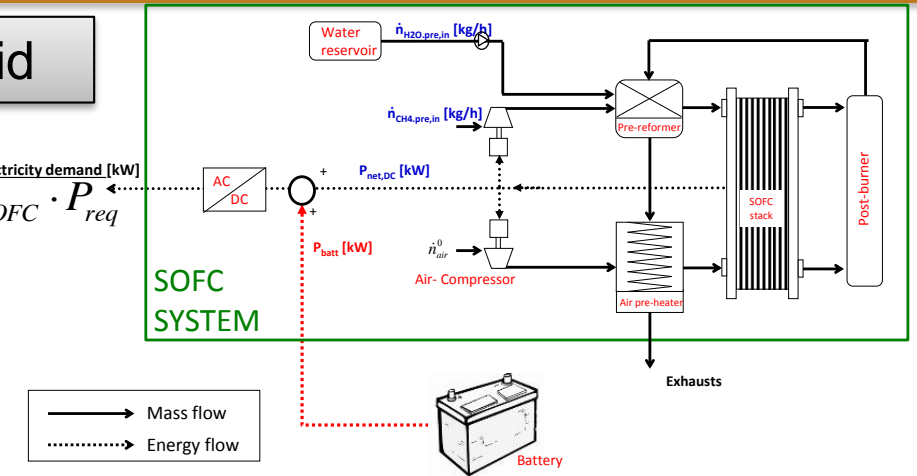
H-APU trucks: architettura ibrida SOFC-lead acid

Applicazione alla gestione di APU ibride SOFC-batteria

Vettore variabili: $\theta = [q_{batt} \ q_{SOFC}]$ $P_{batt}^t = q_{batt} \cdot P_{req}$ $P_{SOFC}^t = q_{SOFC} \cdot P_{req}$

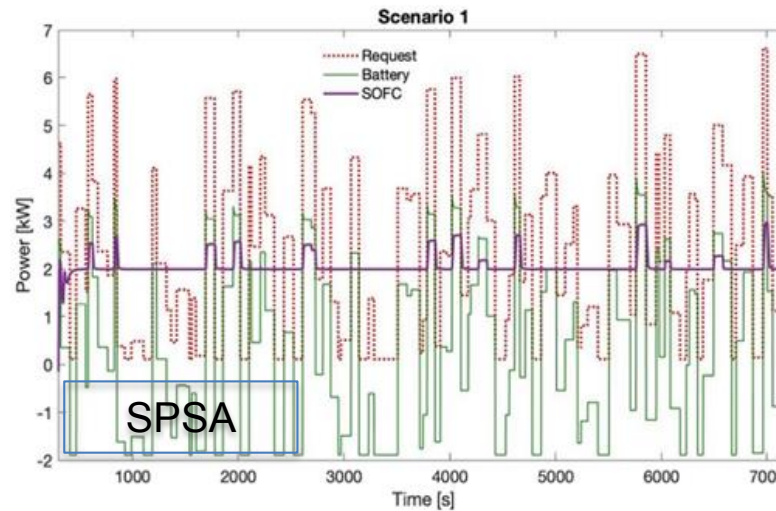
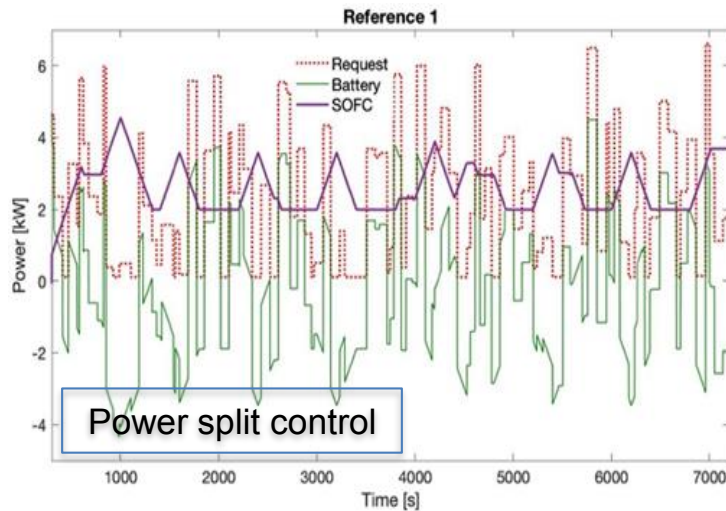
Definizione obiettivi:

- Definizione obiettivi:
 - riduzione oscillazione P_{SOFC} : $y_1^k(\theta) = \left(\frac{P_{SOFC}^t}{P_{SOFC}^{t-1}} \right)^2$
 - Aumento efficienza SOFC: $y_2^k(\theta) = \left(\frac{P_{SOFC}^t}{P_{chem}^t} \right)^2$
 - multi-objective function: $y^k(\theta) = w_1 \cdot y_1^k(\theta) + w_2 \cdot y_2^k(\theta)$
 $w_1 = 0.2; w_2 = 0.8$

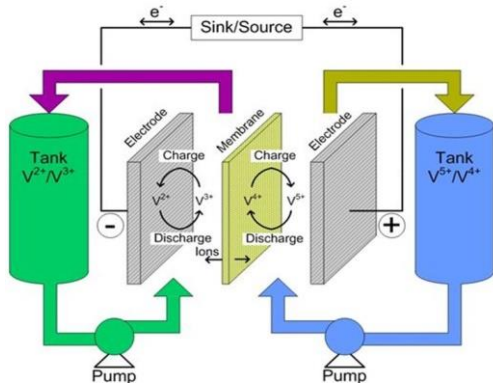


SOFC power ramp dimezzata
Corrente batteria in scarica ridotta del 30% (peak current dimezzata)

Riduzione del consumo
complessivo APU di oltre il
6% su ciclo carico di 2 h



R&D tecnologie di accumulo: Redox flow battery



Obiettivo: incremento performance Redox Flow batteries

Topics:

- Innovativi design di cella e stack
- Implementazione di nuovi materiali per ridurre costi e peso

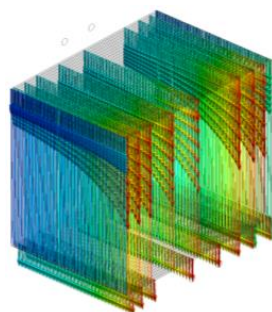
Descrizione:

- Applicazioni:
 - Accumulo in impianti stazionari
 - Applicazioni nel settore trasporti (e.g. bus e imbarcazioni elettriche) in sistemi ibridi di propulsione
- System design
 - Sviluppo di architetture ibride
- Technology assessment
 - **Analisi elettrica e CFD**
 - **Utilizzo di materiali innovativi (membrane, frames, bipolar plates) – riduzione peso stack almeno di 1:4 rispetto a design convenzionali**
 - **Studio di nanoelectrofuels quali soluzioni anolita/catolita per fotocharging**

R&D tecnologie di accumulo: Redox flow battery

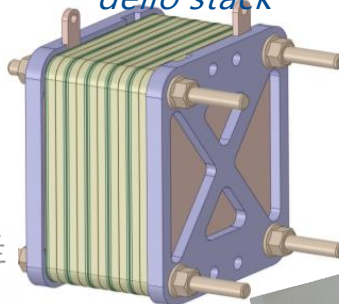
OBIETTIVI:
Riduzione peso stack da 70 kW
Tecnologia conv.: 500 kg
Design innovativo: da 60 a 120 kg (piatti nanocarbon – polimerici)
Produzione tramite processo roll to roll

STUDIO ELETTRICO/CFD

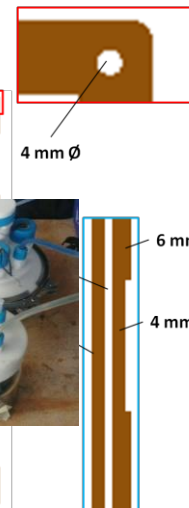
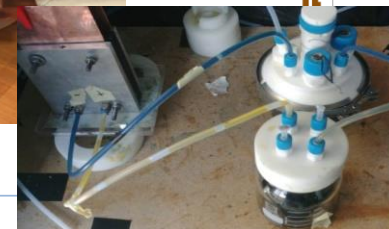


STACK DESIGN

Progetto e scelta materiali per ridurre drasticamente il peso dello stack



STACK PROTOTYPING & TEST



Descrizione:

- Applicazioni:
 - Accumulo in impianti stazionari
 - Applicazioni nel settore trasporti (e.g. bus e imbarcazioni elettriche) in sistemi ibridi di propulsione
- System design
 - Sviluppo di architetture ibride
- Technology assessment
 - **Analisi elettrica e CFD**
 - **Utilizzo di materiali innovativi (membrane, frames, bipolar plates) – riduzione peso stack almeno di 1:4 rispetto a design convenzionali**
 - **Studio di nanoelectrofuels quali soluzioni anolita/catolita per fotocharging**

R&D tecnologie di accumulo: Aspetti di sicurezza batterie

RISCHI CONNESSI ALLA TECNOLOGIA

CRITICITA':
**«THERMAL
RUNAWAY»**
**INCENDIO/
ESPLOSIONE**

Electric shock



Fire
and
Explosion



Driver warning
operational failure

REESS rupture
toxic gases

**EMISSIONE DI GAS
COMBUSTIBILE**
780 l/kg per le celle di
tecnologia più
performante
(H₂ 30% CO 28% CO₂
25% CH₄ 9% C₂H₄
8%)

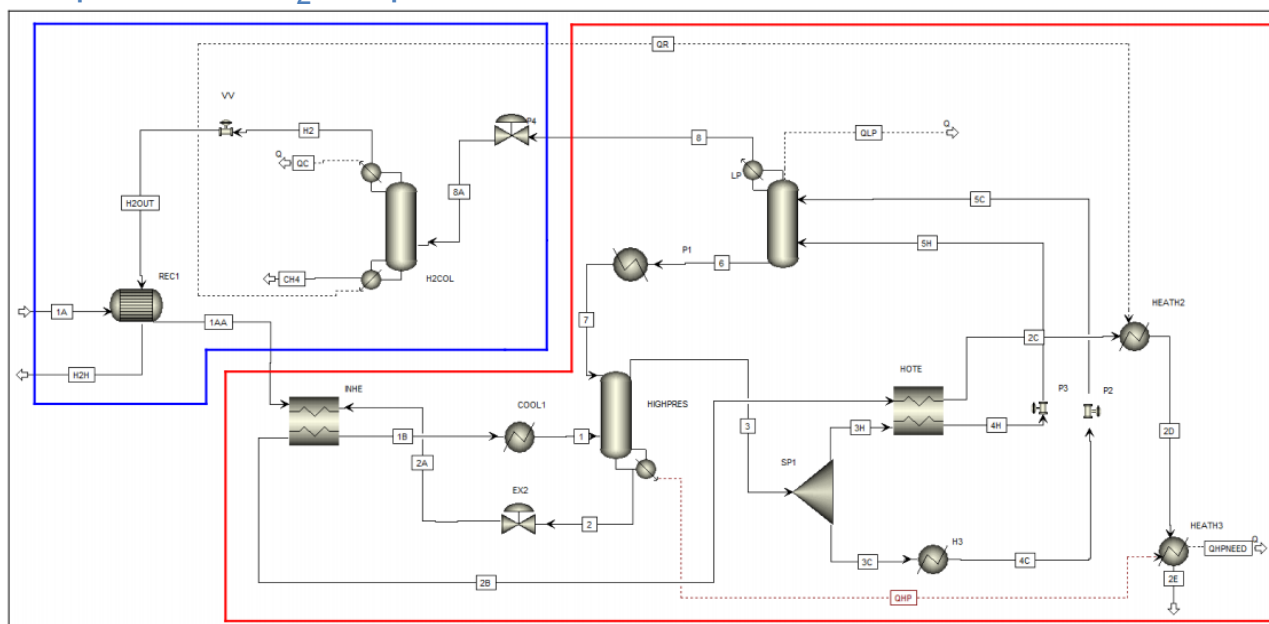
**STUDIO PRE-NORMATIVO E SVILUPPO DI
SISTEMI DI SICUREZZA TRAMITE METODI DI
«RISK ANALYSIS»**
OBIETTIVO: GUASTI DEL TIPO «FAIL-SAFE»

R&D infrastruttura: P2LNG via SOE e metanazione

Topics:

- Sintesi metano da RES (via elettrolisi ad alta T e metanazione)
- Tecnologie per la separazione del metano
- Methane liquefaction and handling

Separazione H₂ e liquefazione metano



Distillazione e liquefazione CO₂ tramite tecnologie criogeniche
cryogenic dual pressure distillation system

CNG (250 bar)	2.5 kWh/L
LNG	5.8 kWh/L
Compressed H ₂ (700 bar)	1.4 kWh/L
Liquified H ₂	2.3 kWh/L

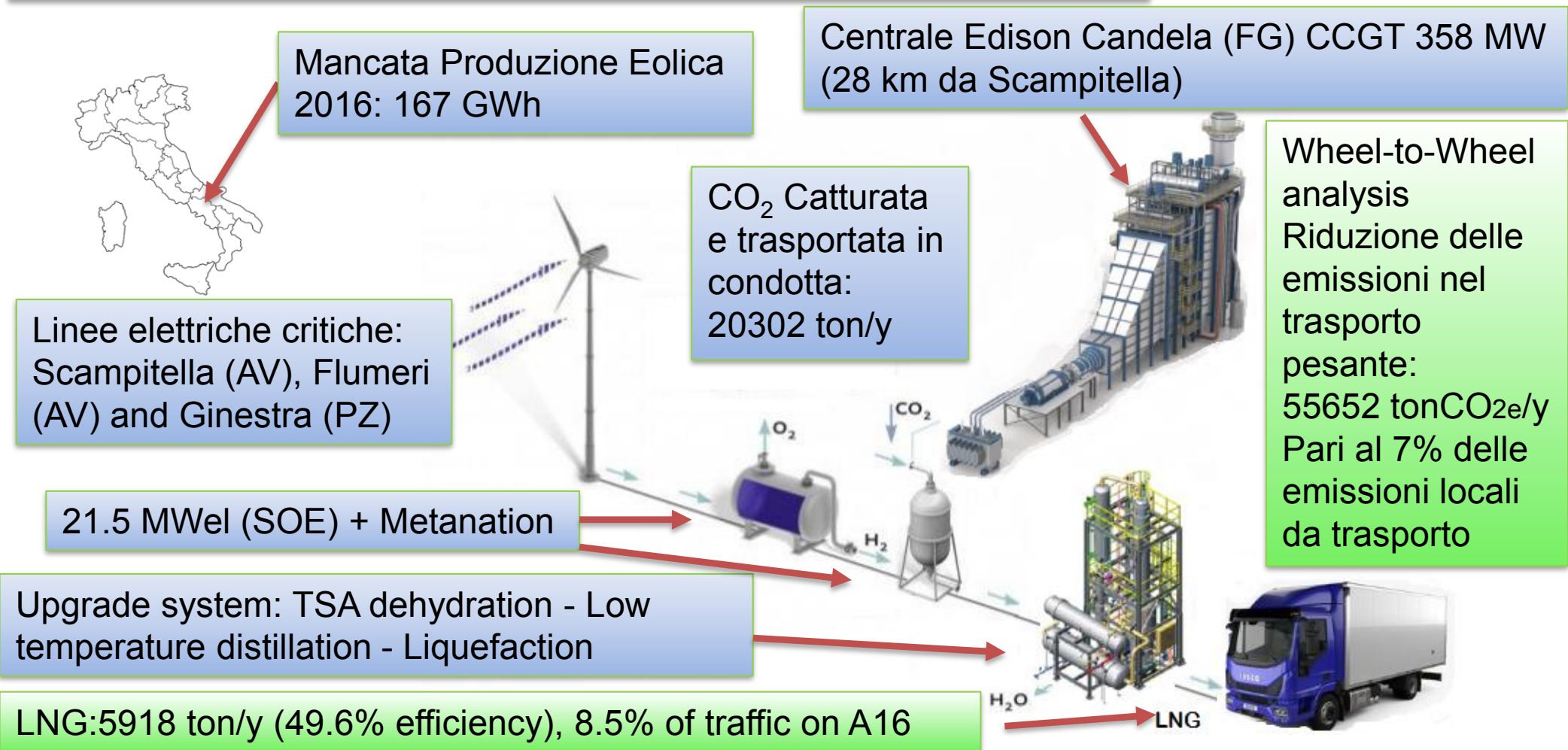
Descrizione:

- **Sistemi P2LNG: design e analisi di impatto**
- **Serbatoi criogenici per veicoli: studio del boil-off e soluzioni migliorative (IN ITINERE)**

- ~50% P2LNG eff. (LHV)
- SOFC implemented to exploit the separated H₂
- LNG quality:
H₂ < 2%vol
CO₂ < 50ppmv
H₂O < 0.1 ppmv

Rispetto requisiti per utilizzo nel settore dei trasporti, per iniezione in rete o generazione potenza dopo rigassificazione

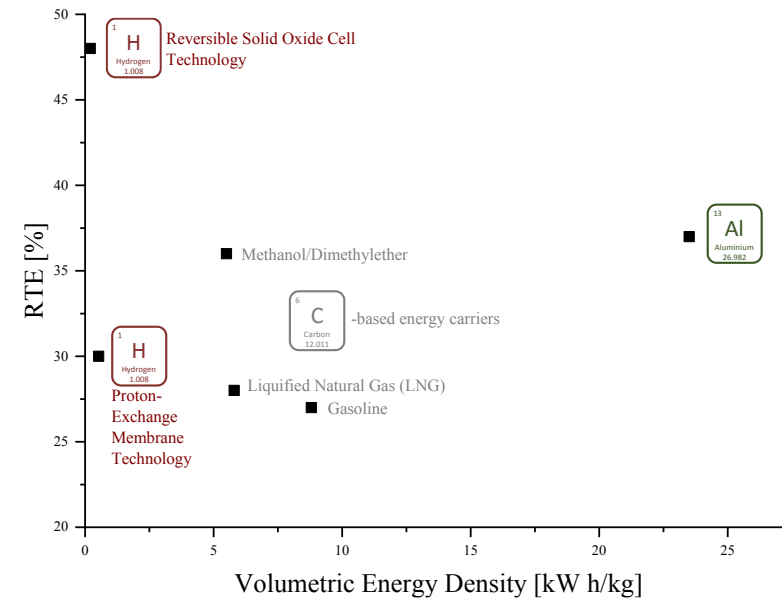
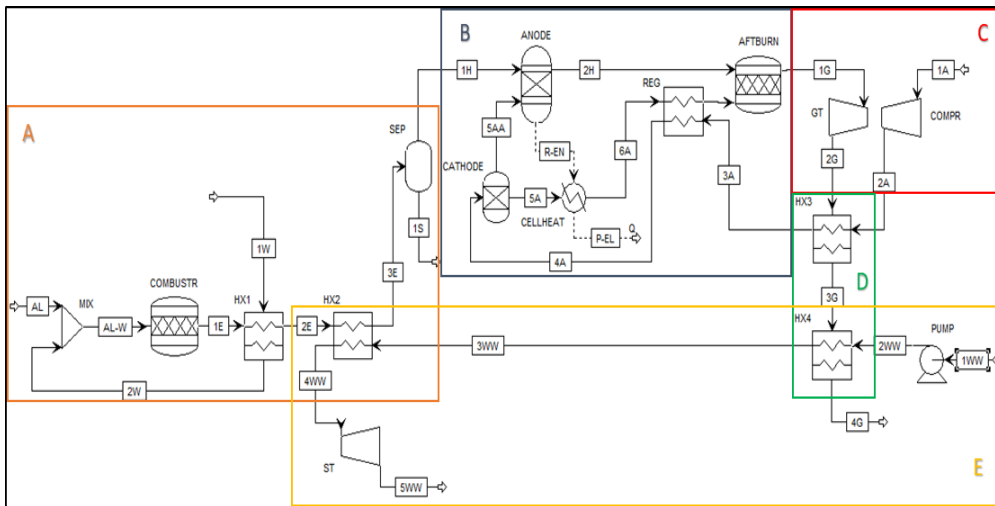
R&D infrastruttura: analisi di impatto P2LNG in area IRPINIA



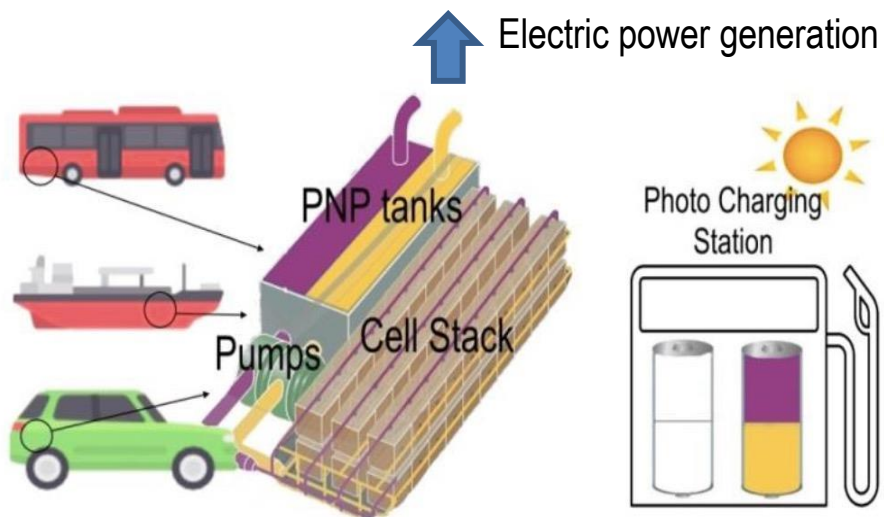
R&D infrastruttura & tecnologie di accumulo: ReaCT project

Topics:

- New concept systems basati su metalli reattivi per long-term storage in applicazioni intersettoriali, incluso produzione H₂ per trasporti
- Utilizzo di metalli reattivi tramite combustione in vapore (produzione di H₂ e calore) in sistemi ibridi fuel cell/gas turbines/steam turbine
- Approccio Multi-energy: calore, generazione elettrica, idrogeno
- Messo a punto ciclo ibrido SOFC/GT/ST con RTE 37% da Al fuso ($P_{el\ tot}$ circa 4MW)



R&D infrastruttura & tecnologie accumulo: SHINE project



Sviluppo di una tecnologia a flusso innovativa per produzione e contestuale accumulo di energia.

Sono ibridati fotocatalisi e produzione di un electrofuel basato su nanoparticelle (PNP: photocharged nano-particles)

- ✓ Caricato tramite energia solare
- ✓ Utilizzato quale vettore energetico
- ✓ Con elevata densità energetica (sopra 100 Wh/kg rispetto al peso complessivo dell'elettrodo fluido, stabilità, viscosità simile al gasolio)

Sono sviluppate particolari batterie a flusso per lo sfruttamento del carrier on-board

Refueling: anolita e catolita esausti sono estratti e inviati alla stazione di produzione del PNP electrofuel; rifornimento con slurries carichi
Si attendono tempi di ricarica ridotti dell'ordine dei minuti per una autovettura.

Applicazione: flotte caratterizzate da lunghi periodi di lavoro giornaliero per trasporto di persone e merci su rotte limitate