



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**Università degli Studi di Padova**  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale**



**Il contributo offerto dalle celle di tipo**  
**Na-Beta per massive installazioni di**  
**accumulo elettrochimico sulla rete**  
**elettrica di trasmissione**

**Mauro Andriollo, Roberto Benato, Sebastian Dambone Sessa**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII)**

**Università di Padova**

**Firenze, venerdì 21 marzo 2014**



# 1800      Alessandro Volta

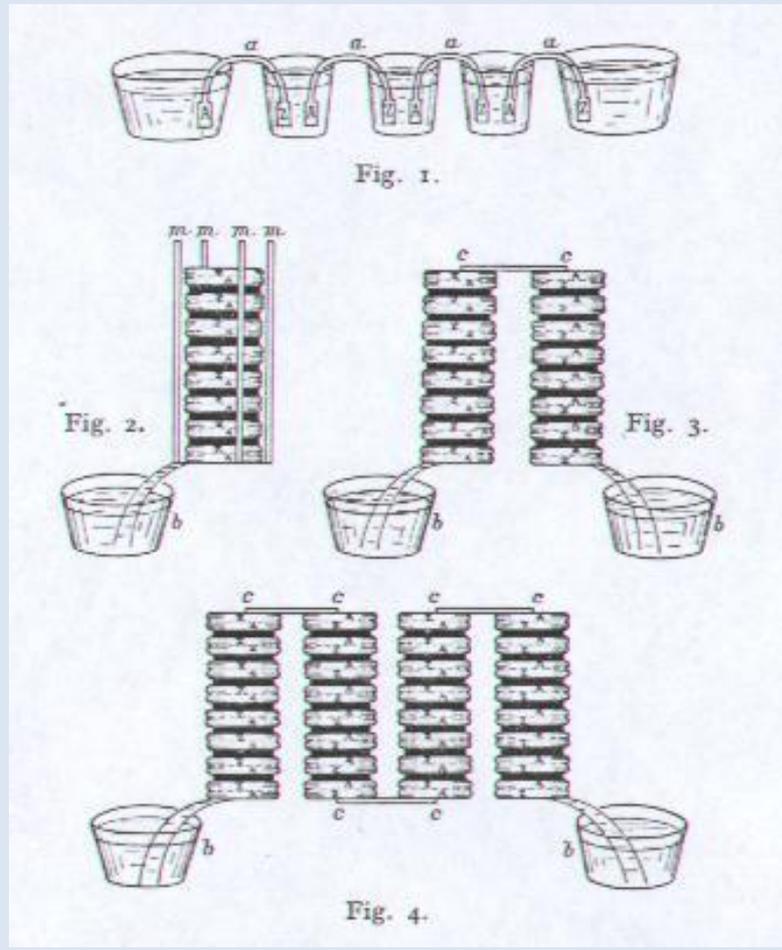
**Memoria (in francese) a Sir. Joseph Banks della Royal Society intitolata “On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds”**



# Organo elettrico naturale



# Organo elettrico artificiale





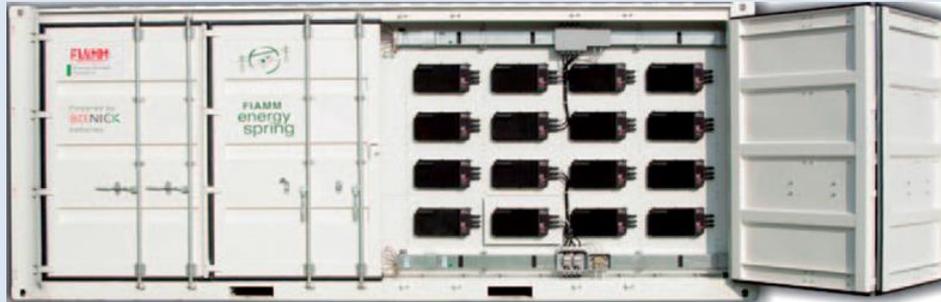
**La dedizione di Volta per l'elettrotecnica  
era tale che**

**Amperometro di precisione  $\equiv$  LINGUA**

**PILA ...QUIDEM TOTA  
NOSTRA EST**



# OGGI....l'organo elettrico artificiale di Alessandro Volta .....installazioni di accumulo stazionario



**Altro primato italico?**



# PECULIARITÀ DELLE CELLE Na-BETA

*La parte anodica è costituita da Sodio (Na)*

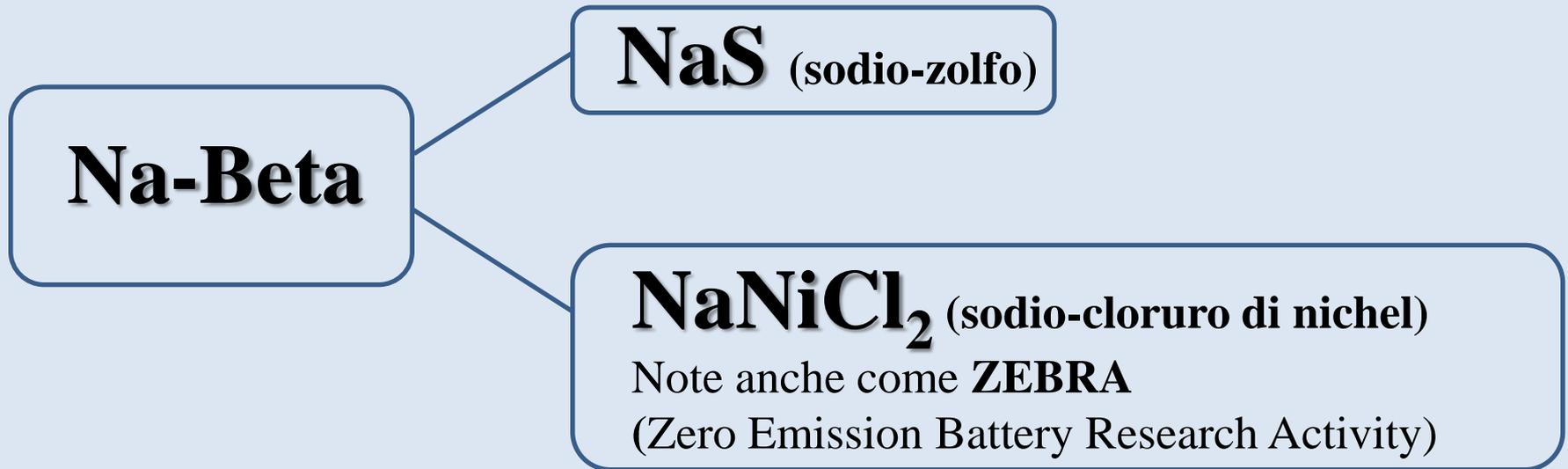
*Viene utilizzato un elettrolita sotto forma ceramica, la beta-allumina ( $\beta'$ - $Al_2O_3$ ) la cui conducibilità ionica (agli ioni sodio) aumenta con la temperatura.*

*Come ordine di grandezza, a  $350^\circ C$  essa vale circa  $0,4 \Omega^{-1} cm^{-1}$ .*

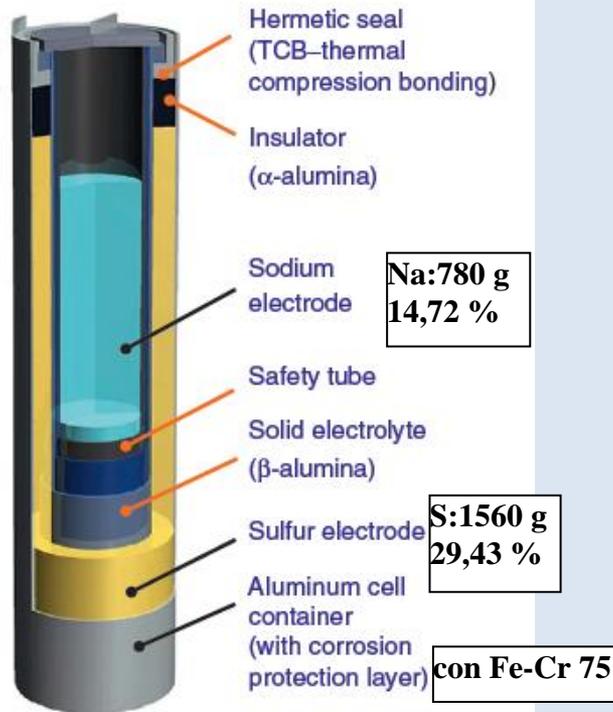
*Ottenere un'elevata conducibilità ionica implica la necessità di tenere la cella ad alta temperatura (tra  $280^\circ C$  e  $350^\circ C$ ).*



# TIPOLOGIE DI CELLE Na-BETA



# TECNOLOGIA NaS: STRUTTURA DI UNA CELLA



- ✓ *la cella è di forma cilindrica;*
- ✓ *l'elettrodo negativo (o anodo) è costituito da sodio allo stato Fuso;*
- ✓ *La  $\beta$ -allumina ceramica assume la forma a "bicchiere";*
- ✓ *l'elettrodo positivo (o catodo) è costituito da zolfo sotto forma di feltro di grafite.*

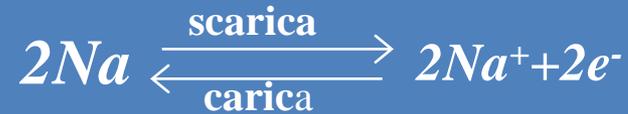
*La cella è a chiusura ermetica così da isolare gli elettrodi dall'atmosfera esterna. L'involucro della cella è in alluminio rivestito internamente da una lega Fe-Cr 75*



# TECNOLOGIA NaS: REAZIONI CHIMICHE

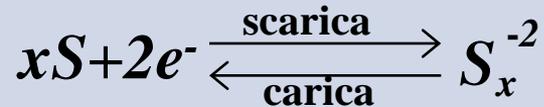
## REAZIONE ANODICA

*durante la fase di scarica il sodio metallico del comparto anodico si ossida liberando elettroni*



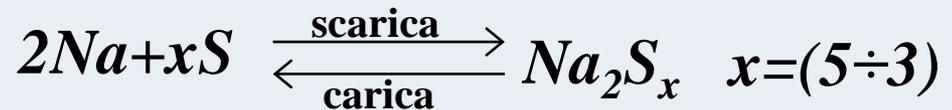
## REAZIONE CATODICA

*all'elettrodo positivo lo zolfo invece si riduce*



## REAZIONE COMPLESSIVA

*gli ioni sodio formati migrano attraverso l'elettrolita verso il comparto catodico ed in tal modo avviene la reazione reversibile di formazione di polisolfuri di sodio*





# TECNOLOGIA NaS: CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLA CELLA

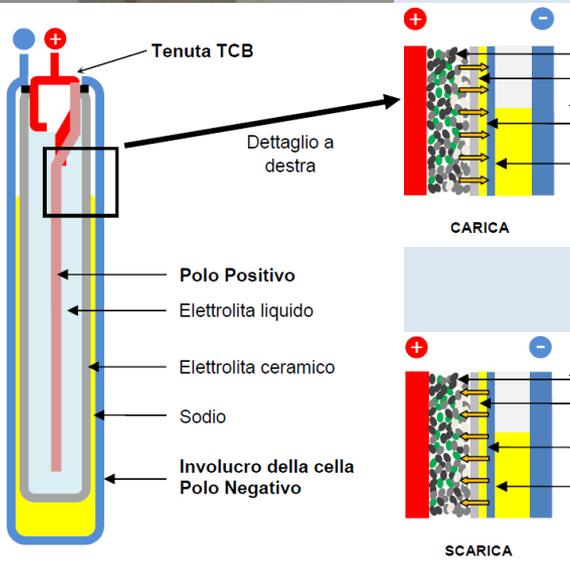
|   |                                |
|---|--------------------------------|
| OCV [V]<br>a piena carica e media di scarica                    | 2,08                           |
| Tensione di fine scarica<br>dichiarata dal costruttore [V]      | 1,82                           |
| Capacità [Ah]   | 632 ad esempio 79<br>A per 8 h |
| Tipico regime di scarica  | C/8                            |
| Rendimento [%]  | 89                             |
| Diametro [mm]   | 91                             |
| Lunghezza [mm]  | 515                            |
| Peso [kg]   | 5,3                            |
| Volume [m <sup>3</sup> ]  | 0,0033                         |
| Cicli di<br>congelamento/scongelo<br>(freeze-thaw)              | Superiori a 20                 |
| Energia specifica volumetrica<br>[kWh/m <sup>3</sup> ] o [Wh/l] | 392                            |
| Energia specifica ponderale<br>[Wh/kg]                          | 248                            |

- ✓ *Energia specifica ponderale e volumetrica estremamente alte;*
- ✓ *Assenza di aut scarica (no carica di mantenimento);*
- ✓ *Assenza di effetto memoria (no reconditioning);*

# TECNOLOGIA $\text{NaNiCl}_2$ : STRUTTURA DI UNA CELLA



- ✓ *la cella è di forma parallelepipedica;*
- ✓ *l'elettrodo positivo (o catodo) è costituito da granuli di sale e di polvere di nichel e ferro (con tracce additive di alluminio);*
- ✓ *la  $\beta$ -allumina ceramica assume preferibilmente la forma a quadrifoglio o quadrilobato (o tetralobato), perché aumenta, rispetto a quella circolare, la superficie di contatto;*



- ✓ *l'elettrodo negativo (o anodo) è rappresentato dall'involucro della cella, ed è formato da un contenitore saldato in modo continuo e ottenuto da un nastro d'acciaio rivestito di nichel.*

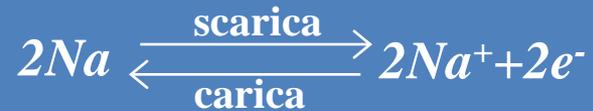
**PRESENZA SECONDO ELETTROLITA LIQUIDO O CATOLITA (tetracloroalluminato di sodio  $\text{NaAlCl}_4$ )**



# TECNOLOGIA $\text{NaNiCl}_2$ : REAZIONI CHIMICHE

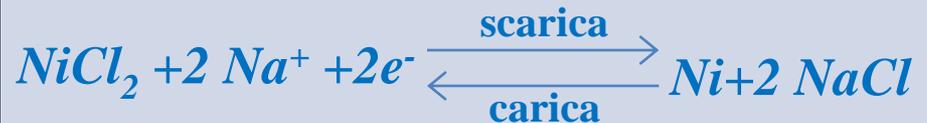
## REAZIONE ANODICA

*durante la fase di scarica il sodio metallico del comparto anodico si ossida liberando elettroni*



## REAZIONE CATODICA

*all'elettrodo positivo il cloruro di nickel invece si riduce*



## REAZIONE COMPLESSIVA

*gli ioni sodio formati migrano attraverso l'elettrolita verso il comparto catodico ed in tal modo avviene la reazione reversibile di formazione di cloruro di sodio*





# TECNOLOGIA $\text{NaNiCl}_2$ : CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLA CELLA

|  |  |
|--|--|
| OCV [V] a piena carica / media di scarica                    | 2,59 / 2,50  |
| Tensione di fine scarica dichiarata dal costruttore [V]      | da 1,90 a 2,25 Vpc in accordo con il regime di scarica |
| Capacità [Ah]  | 38   |
| Tipico regime di scarica                                     | da 3 a 5 ore (correnti da C/3 a C/5 A)                 |
| Rendimento [%]   | 90   |
| Sezione quadrata lato [mm]                                   | 36   |
| Lunghezza [mm]   | 236  |
| Peso [kg]  | 0,680  |
| Volume [m <sup>3</sup> ]                                     | 3x10 <sup>-4</sup>                                     |
| Cicli di raffreddamento/riscaldamento (freeze-thaw)          | Nessun limite  |
| Energia specifica volumetrica [kWh/m <sup>3</sup> ] o [Wh/l] | 280  |
| Energia specifica ponderale [Wh/kg]                          | 140  |

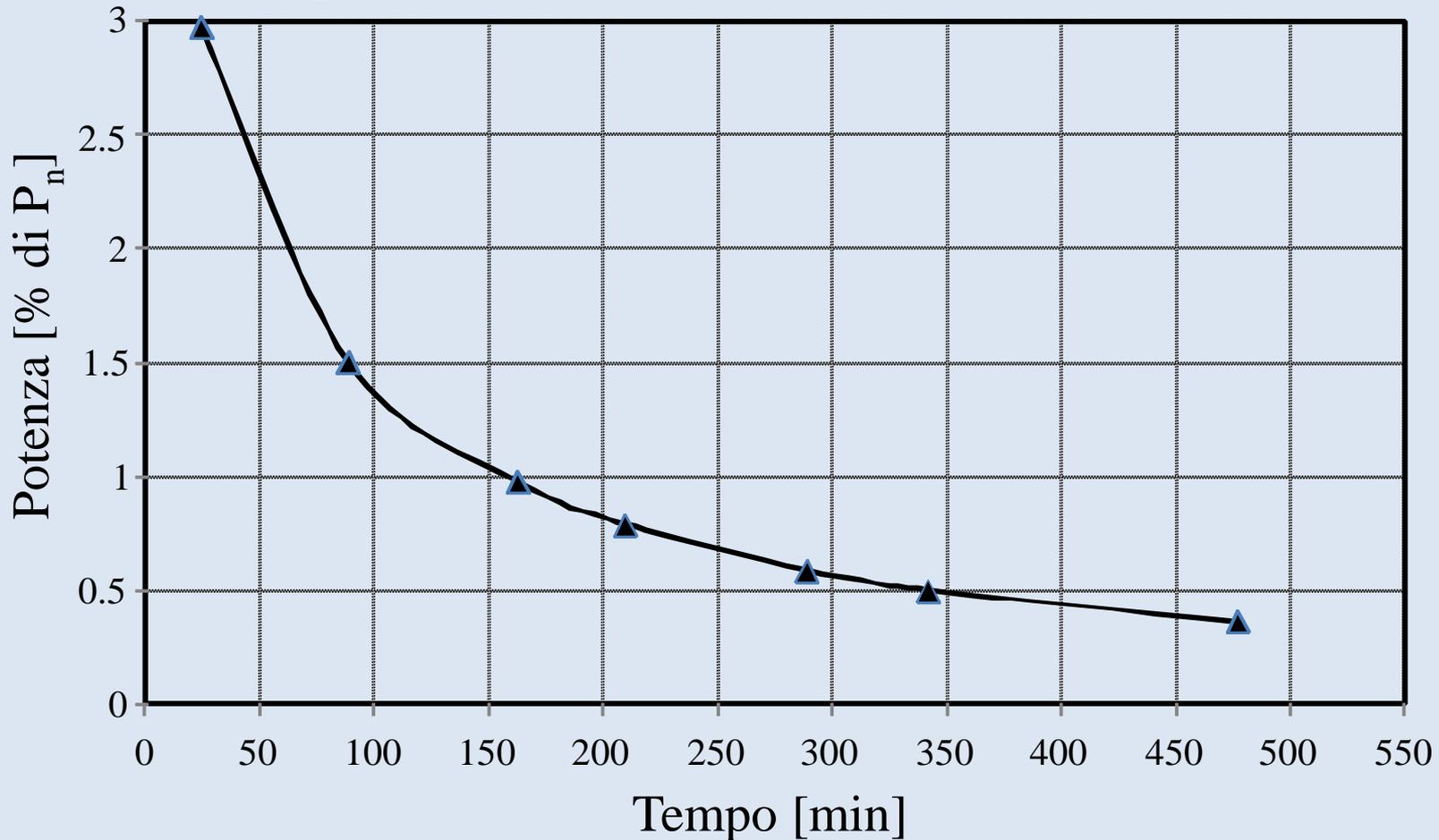
- ✓ *OCV più alta della cella NaS;*
- ✓ *Energia specifica ponderale e volumetrica alte;*
- ✓ *Assenza di aut scarica (no carica di mantenimento);*
- ✓ *Assenza di effetto memoria (no reconditioning);*
- ✓ **PRESENZA CATOLITA tetracloroalluminato di sodio**



# PULSE FACTOR $\text{NaNiCl}_2$

*Il pulse factor espresso in p.u. rappresenta il rapporto tra la potenza che può essere ricavata dalla batteria in scarica e la potenza nominale.*

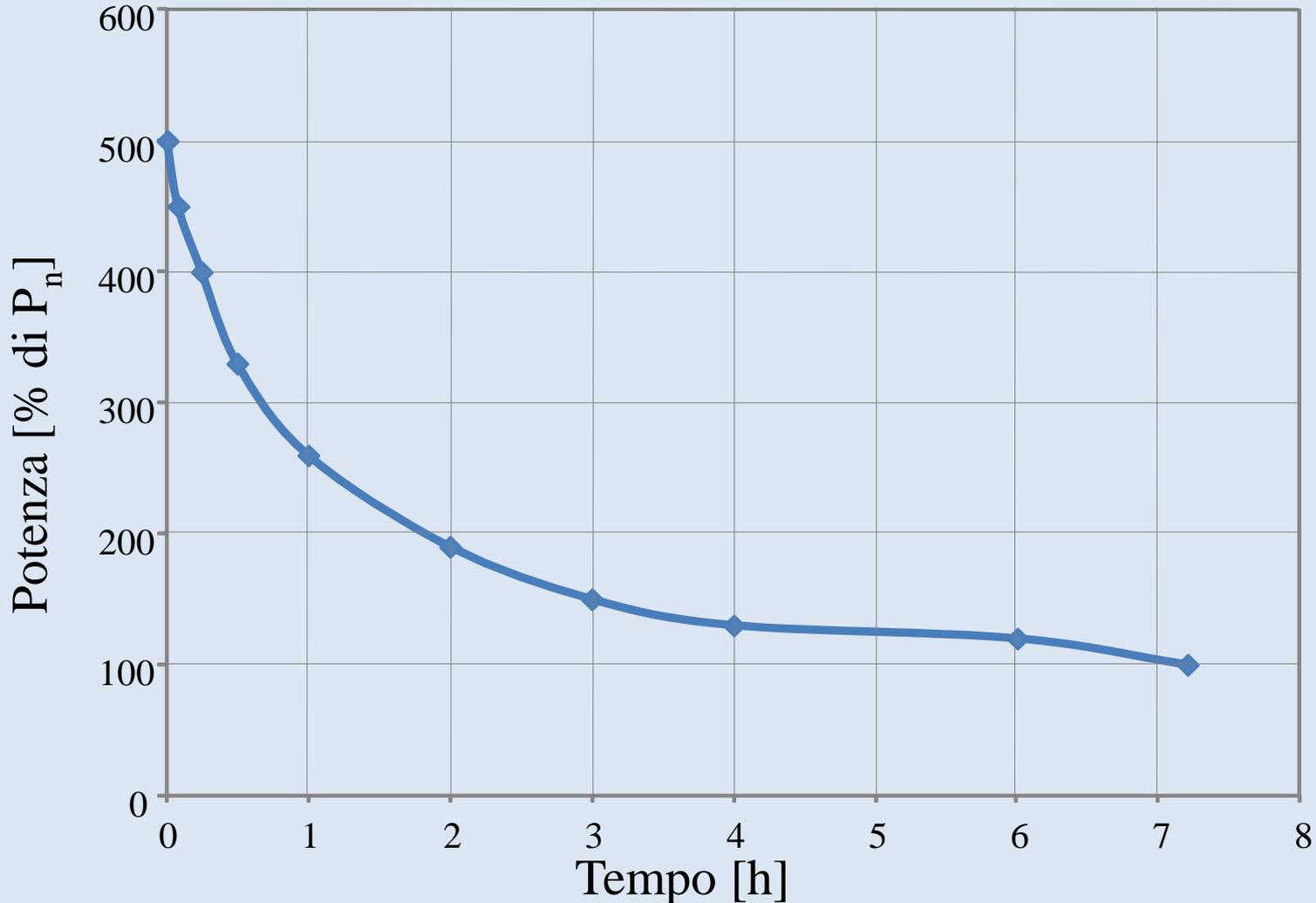
*tempo convenzionale di scarica: 3 h*





## PULSE FACTOR NaS:

*tempo convenzionale di scarica: 7,2 h*





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

*Università degli Studi di Padova*  
*Dipartimento di Ingegneria Industriale*



**NaS**

**Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 1,2 MW**



## NaS

# Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 1,2 MW



CELLA

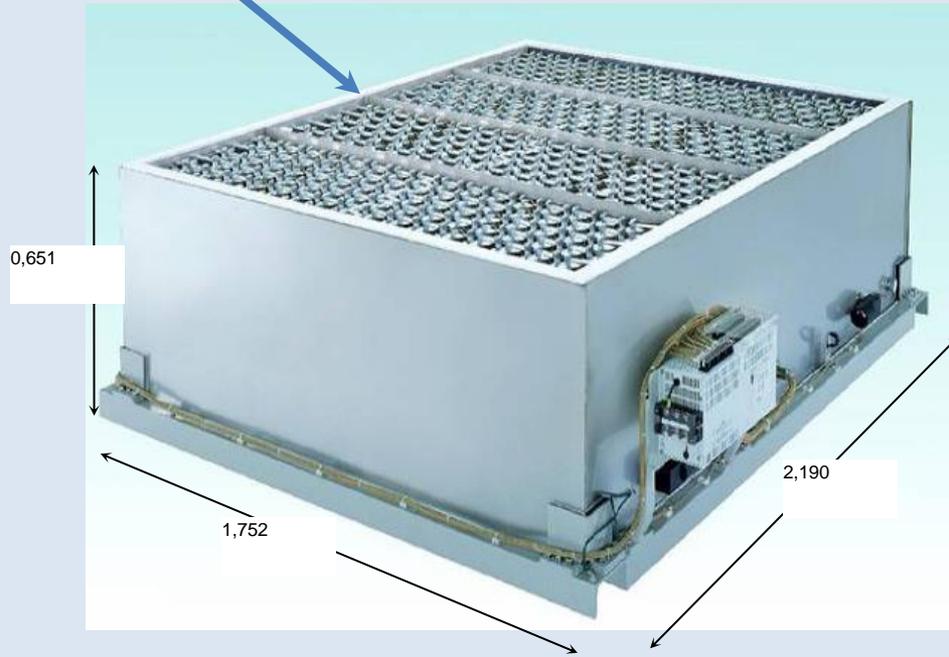


# NaS

## Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 1,2 MW



CELLA



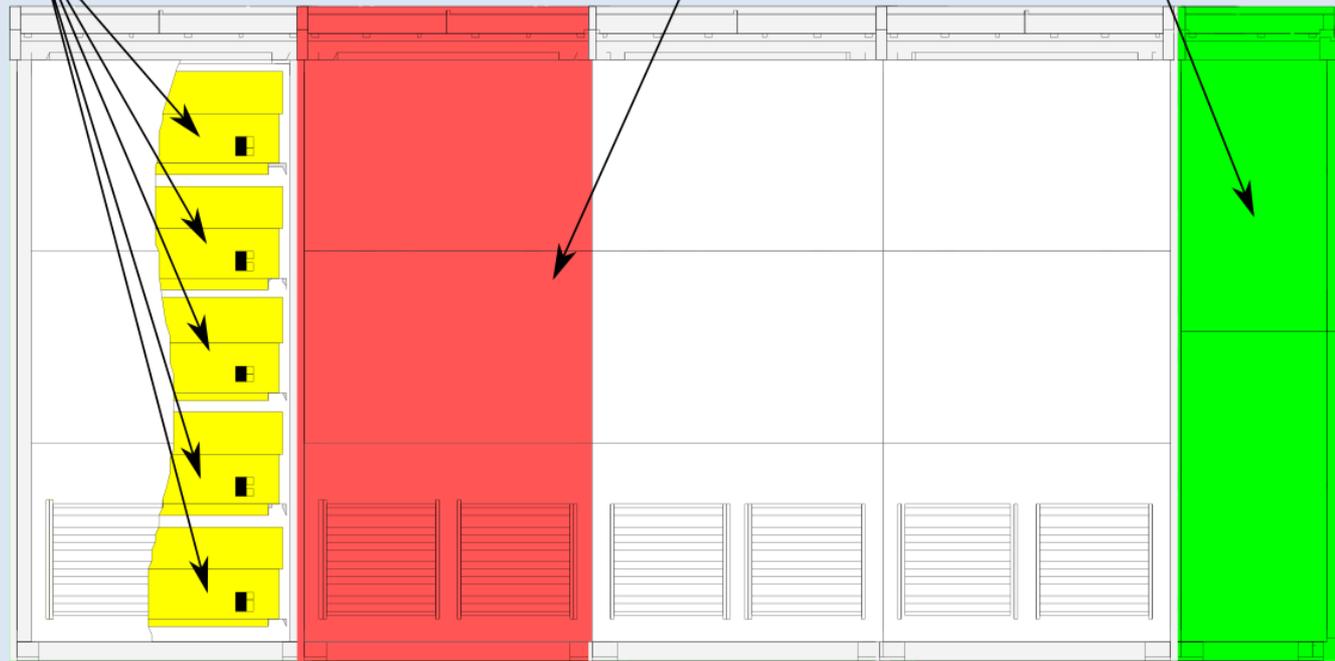
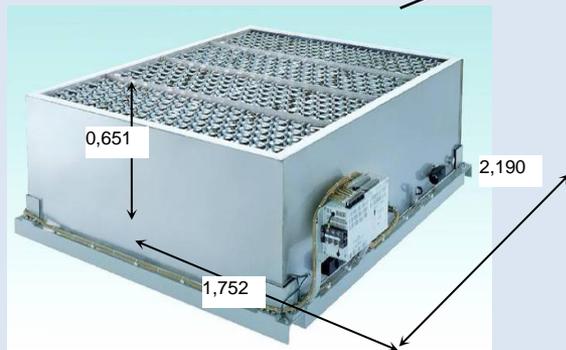
MODULO



# NaS

## Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 1,2 MW

MODULI Na/S DA 30 kW    ARMADIO DA 5 MODULI    ARMADIO CONTROLLO



UNITÀ



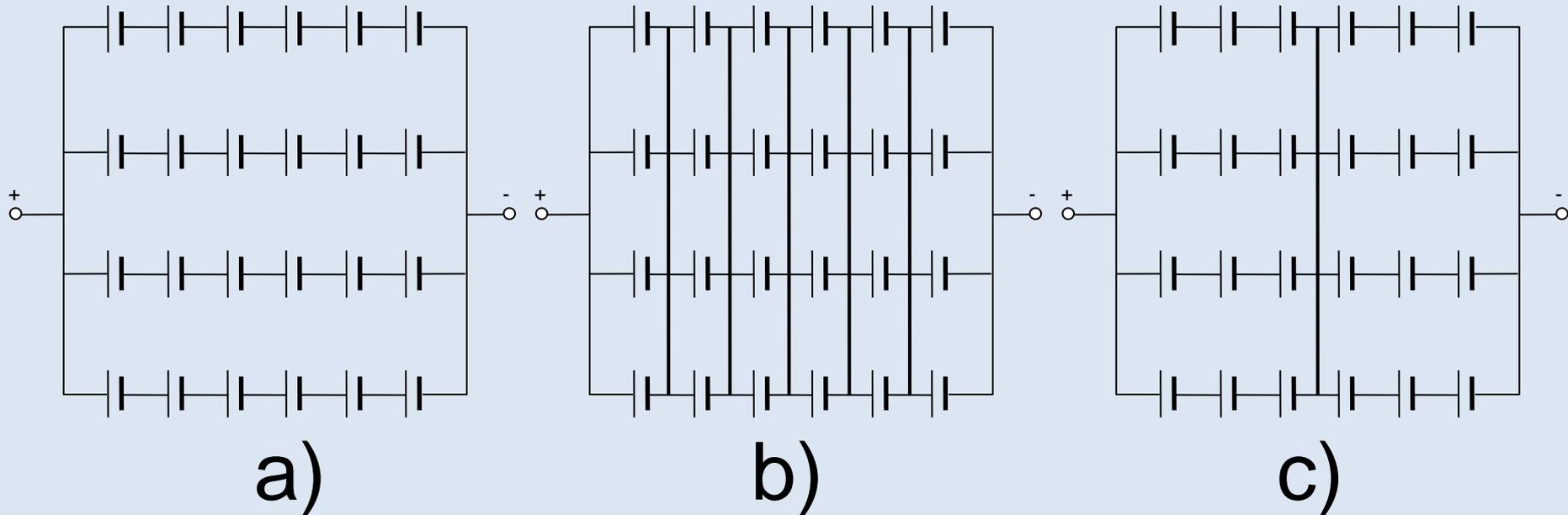
## Modulo NaS

|  |  |
|--|--|
| Potenza in scarica normale                         | 31,6 kW  |
| Tensione cc nominale e<br>composizione delle celle | $\cong 32 \text{ V}$<br>$4s \times (14p \times 4s)$  |
| Potenza di ricarica nominale                       | 28,5 kW  |
| Energia elettrica<br>immagazzinata                 | 227 kWh  |
| Temperatura della batteria<br>all'avvio            | 300°C  |
| Dimensioni [m]                                     | $1,858 \text{ L} \times 1,592$<br>$\text{P} \times 0,655 \text{ A}$                                      |
| Peso   | $\cong 3 \text{ 000 kg}$   |
| Numero cicli di<br>congelamento-scongelamento      | 10 cicli<br>(con temperatura<br>inferiore a 150°C)<br>30 cicli<br>(con temperatura da<br>150 °C a 250°C) |



## Modulo NaS

### Collegamenti serie e parallelo delle celle



Opzioni di base per il collegamento delle celle nel modulo: a) Serie di lunghe stringhe; b) connessione di parallelo totale; c) soluzione serie-parallelo (**soluzione per NaS**)



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

*Università degli Studi di Padova*  
*Dipartimento di Ingegneria Industriale*



**Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 0,5 MW**



**Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 0,5 MW**



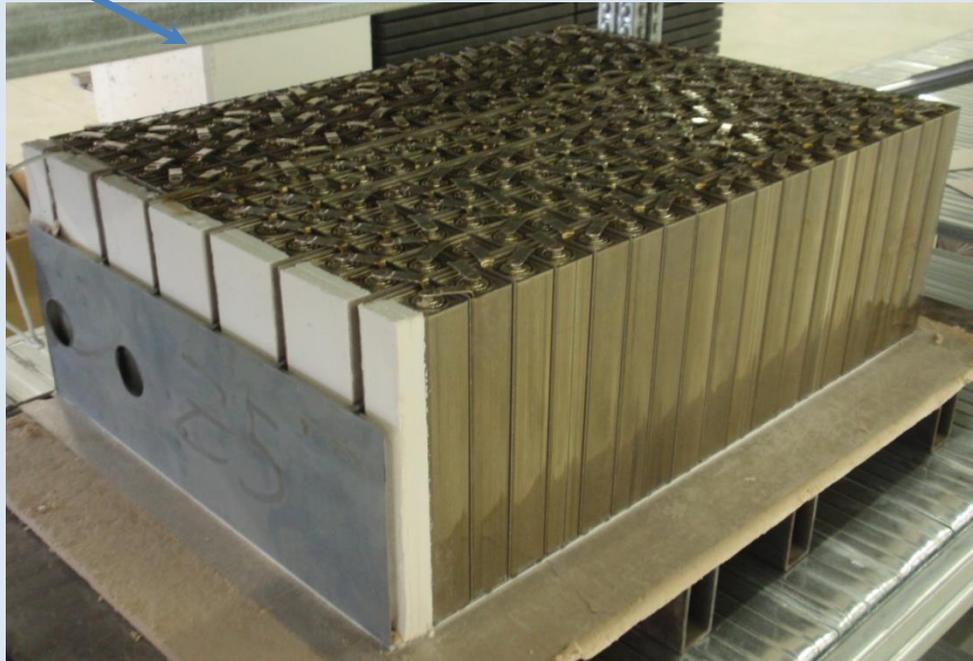
CELLA



## Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 0,5 MW



CELLA



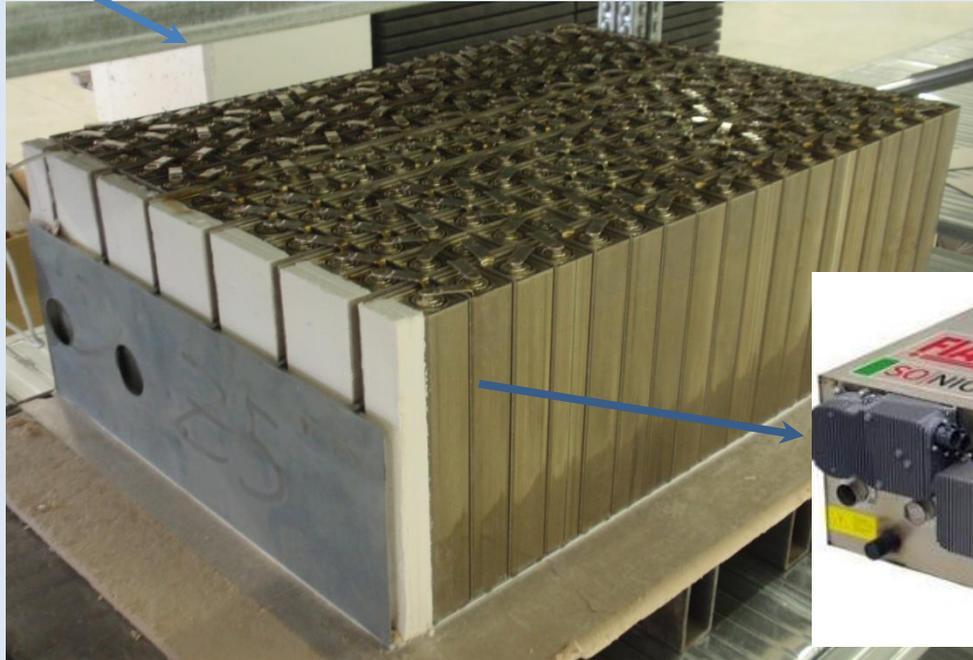
MODULO



## Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 0,5 MW



CELLA



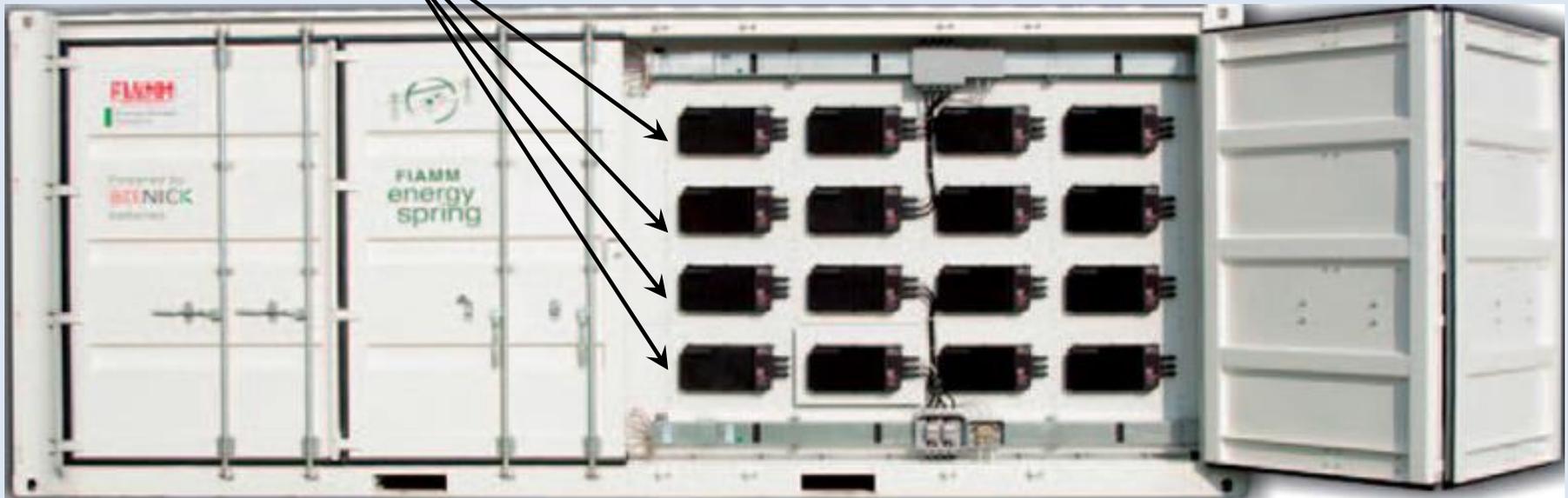
MODULO





# NaNiCl<sub>2</sub>

## Passaggio dalla cella al modulo all'unità da 0,5 MW



UNITÀ



## Modulo $\text{NaNiCl}_2$

|  |   |
|--|---|
| Potenza in scarica normale                               | 7,8 kW (tempo di scarica 3 h)   |
| Tensione cc nominale et<br>composizione delle celle      | 620 V<br><u>1 stringa di 240 celle in serie</u>   |
| Potenza di ricarica nominale                             | 6 kW  |
| Energia elettrica<br>immagazzinata                       | 23,5 kWh  |
| Temperatura della batteria<br>all'avvio                  | 240 °C  |
| Dimensioni   | 862 (1016 con Battery<br>Management System - BMS)<br>L × 556 P × 389 A (mm)   |
| Vita calendariale / cicli di vita<br>in funzione del DoD | 15 anni / 4500 cicli DOD 80%  |
| Peso   | ≅ 256 kg  |
| Numero cicli di congelamento-<br>scongelamento           | nessuna limitazione   |
| Protezioni elettriche previste                           | Integrati in BMS: contattori<br>N.A., fusibile, controllo<br>isolamento elettrico,<br>sovraccarica, sovrascarica,<br>corrente max, range di<br>tensione |

## Unità $\text{NaNiCl}_2$

|   |   |
|---|---|
| Potenza nominale [MW]   | 0,5   |
| Tensione Nominale [Vdc]:  | 620   |
| Tempo di scarica standard [h]                                       | 3   |
| Capacità Nominale [Ah]:   | 2 432   |
| Energia immagazzinata<br>[MWh]                                      | 1,5   |
| Tensione Minima di sistema<br>[V <sub>dc</sub> ]                    | 450   |
| Tensione Massima di sistema<br>[V <sub>dc</sub> ]                   | 700   |
| Design del circuito   | 64 moduli<br>batteria collegati<br>in parallelo |
| Efficienza [%]  | 93  |
| Ventilazione:   | ventilazione<br>forzata nella<br>zona BMS       |
| Peso complessivo con moduli<br>e tutto il necessario montato<br>[t] | 25  |
| Tara [t]  | 4,4   |
| Capacità [m <sup>3</sup> ]  | 34,08   |
| Energia specifica volumetrica<br>[kWh/m <sup>3</sup> ]              | 44  |
| Energia specifica ponderale<br>[Wh/kg]                              | 60  |



## Modulo $\text{NaNiCl}_2$

### Collegamento serie di 224 celle! Perché?

Il motivo va ricercato all'interno della cella e nella presenza del catolita tetracloroalluminato di sodio che nel caso di rottura della  $\beta''$ -allumina forma sale e alluminio che cortocircuita la cella:



**Ripercussioni su availability e sicurezza (analisi del rischio)**

Il modulo è **FAULT TOLERANT** e può rimanere in esercizio fintantoché il 10-15 % delle celle costituenti lo stesso sono guaste



1° livello

| Componente   | Funzione   |
|--|--|
| <b>Livello cella</b>   |  |
| Safety tube  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Controlla la reazione tra il sodio e lo zolfo nel caso di rottura della <math>\beta</math>"-allumina</li> <li>➤ Evita la rottura dell'involucro di cella;</li> <li>➤ Limita la corrente di corto circuito (interrompendo il flusso di sodio)</li> </ul> |
| Tubo protettivo in acciaio inossidabile  | Limita la deformazione della cella nel caso di guasto  |
| Rivestimento interno all'involucro realizzato in lega alluminio Fe-Cr                  | Annulla la possibilità di corrosione dovuta alla formazione, durante la scarica, dei polisolfuri di sodio  |
| Ulteriori strati d'isolamento termico e resistenti al fuoco nell'involucro della cella | Evitano che un eventuale incendio in una cella si propaghi alle celle adiacenti  |

2° livello

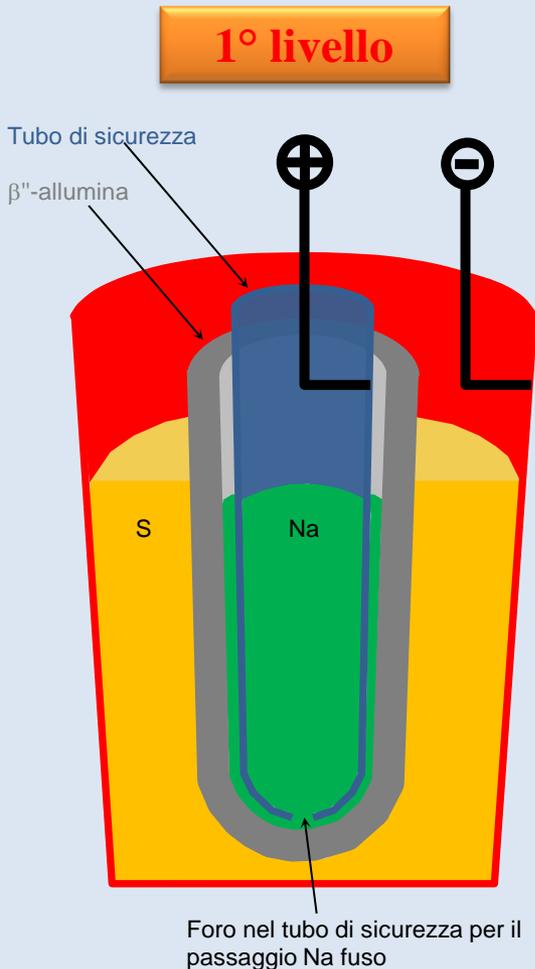
|  |  |
|--|--|
| <b>Livello modulo</b>  |  |
| Fusibili (ogni 4 celle)  | Interrompono la corrente di corto circuito   |
| Connessioni tra celle  | Limitano le sovratensioni in una data cella  |
| Riempimento del modulo con sabbia  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Assorbe il materiale attivo in caso di sversamento;</li> <li>➤ Evita la propagazione del fuoco originato da una cella;</li> </ul>                     |
| Involucro termico che realizza il vuoto in doppio strato di acciaio inossidabile con spessore 0,8÷1 mm (in tutto la doppia parete occupa 3 ÷ 6 cm) | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Evita lo sversamento di materiale nell'ambiente;</li> <li>➤ Evita il contatto delle celle con l'ossigeno e inibisce quindi la combustione;</li> </ul> |
| Monitoraggio e controllo   | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Controlla carica-scarica;</li> <li>➤ Rileva il guasto e dà un allarme;</li> <li>➤ Mette fuori servizio l'apparecchiatura se guasta;</li> </ul>        |
| Compartimento del modulo mediante pannello con caratteristiche d'isolante elettrico  | Evita che un eventuale corto circuito dovuto a sversamento di materiale fuso si estenda a tutto il modulo  |
| Moduli resistenti al fuoco all'interno del modulo nella parte superiore e inferiore  | Evitano la propagazione del fuoco tra modulo e modulo per un dato tempo  |

3° livello

|  |  |
|--|--|
| <b>Livello unità</b>   |  |
| Pareti in acciaio galvanizzato con spessore $\geq 2,3$ mm dell'armadio contenente i moduli | Buona protezione dalle fulminazioni dirette nonché dalla penetrazione di proiettili derivanti da errata pratica venatoria o da vandalismi. |

# NaS: SICUREZZA INTERNA ALLA CELLA

Il dimensionamento corretto del safety tube limita quindi la quantità di sodio fuso che entra in contatto con lo zolfo in modo che la generazione di calore che si sprigiona dalla reazione chimica sia limitata ad un valore tale da non rompere l'involucro della cella.



*Spazio anulare tra tubo di alluminio e elettrolita ceramico decresce per il più alto coefficiente di espansione termica del primo elemento rispetto al secondo*



# NaS: SICUREZZA INTERNA AL MODULO

2° livello

- *Sabbia tra le celle;*
- *Compartimentazione;*
- *doppio strato di acciaio inossidabile ciascuno di 1 mm di spessore;*
- *Fusibili ogni 4 celle;*

# NaS: SICUREZZA INTERNA ALL'UNITÀ

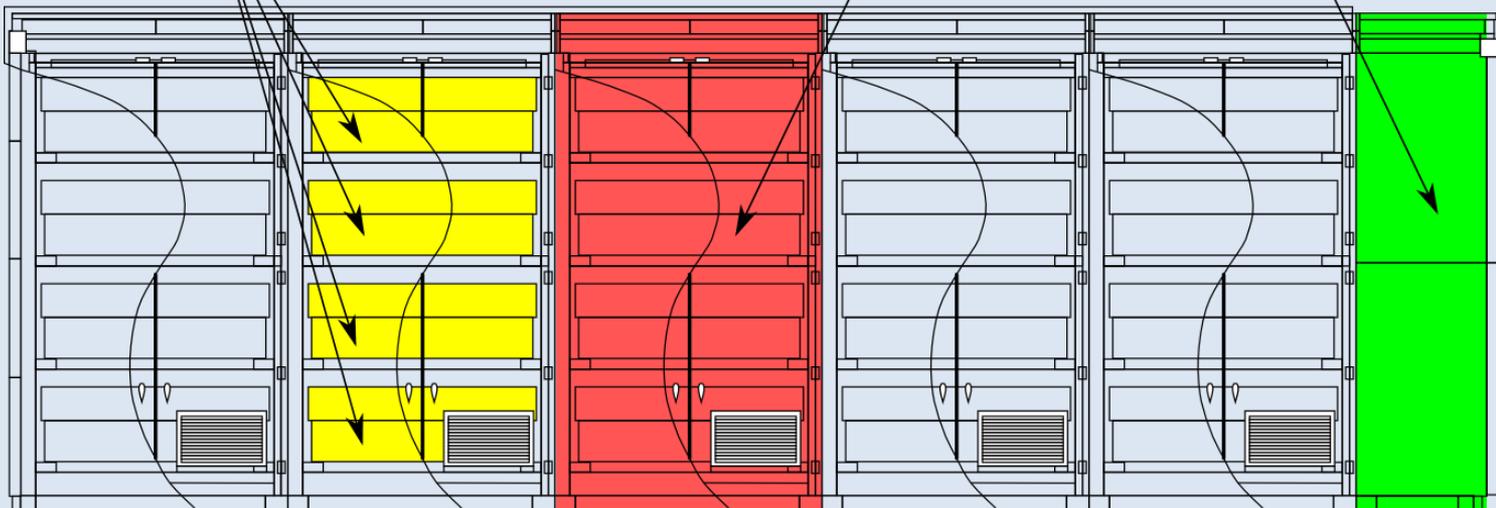
3° livello

- Più spazio d'aria tra modulo e modulo;
- Pannelli resistenti al fuoco all'interno del modulo;
- Gli armadi sono di acciaio galvanizzato con spessore 2,3 mm (se fossero 4 mm sarebbero GABBIA DI FARADAY);

MODULI Na/S DA 30 kW

ARMADIO DA 4 MODULI

ARMADIO CONTROLLO





# NaNiCl<sub>2</sub>: SICUREZZA INTRINSECA

*L'impossibilità fisica dell'incendio endogeno all'interno della cella si basa sulla sicurezza intrinseca delle reazioni chimiche dovute alla presenza del secondo elettrolita fuso o catolita.*

*Esso assorbe il sodio proveniente dalla rottura della  $\beta$ -allumina formando sale e alluminio (con il conseguente corto circuito della cella)*





# ANALISI DI RISCHIO

| SEVERITÀ<br>(MAGNITUDO) |        |
|-------------------------|--------|
| Definizione             | Valore |
| Catastrofico            | 5      |
| Pericoloso              | 4      |
| Importante              | 3      |
| Meno grave              | 2      |
| Trascurabile            | 1      |

| PROBABILITÀ              |        |                               |
|--------------------------|--------|-------------------------------|
| Definizione              | Valore | Intervallo di probabilità     |
| Frequente                | 5      | $10^{-1} < P \leq 1$          |
| Occasionale              | 4      | $10^{-2} < P \leq 10^{-1}$    |
| Remota                   | 3      | $10^{-3} < P \leq 10^{-2}$    |
| Improbabile              | 2      | $10^{-4} < P \leq 10^{-3}$    |
| Estremamente improbabile | 1      | $10^{-9} \leq P \leq 10^{-4}$ |

**IPR = Severità × Probabilità**

$$1 \leq \text{IPR} \leq 25$$



# ANALISI DI RISCHIO

**Gli eventi presi in considerazione sono i seguenti:**

- **Terremoto e vibrazioni;**
- **Inondazione;**
- **Utilizzo inappropriato (Mishandling);**
- **Attività ceraunica (fulminazione diretta e indiretta);**
- **Incendio causa endogena ed esogena;**
- **Sabotaggio e attività venatoria;**
- **Impatti esterni (veicolo terrestre, velivolo pesante e leggero).**



# NaS: ANALISI DI RISCHIO

|                               | Installazione all'aperto |             |     |
|-------------------------------|--------------------------|-------------|-----|
|                               | Severità                 | Probabilità | IPR |
| Terremoto                     | 1                        | 4           | 4   |
| Inondazione                   | 1                        | 4           | 4   |
| Fulminazione diretta          | 2                        | 2           | 4   |
| Fulminazione indiretta        | 1                        | 1           | 1   |
| Incendio causa endogena       | 2                        | 1           | 2   |
| Incendio causa esogena        | 2                        | 2           | 4   |
| Sabotaggio                    | 3                        | 3           | 9   |
| Attività venatoria            | 2                        | 2           | 4   |
| Impatto con veicolo terrestre | 2                        | 2           | 4   |
| Caduta velivolo leggero       | 4                        | 1           | 4   |
| Caduta velivolo pesante       | 5                        | 1           | 5   |

**Tutti gli indici di priorità del rischio sono bassi ( $IPR \leq 9$ )**



# NaNiCl<sub>2</sub>: ANALISI DI RISCHIO

| # | EVENTI                        | Installazione all'aperto |             |         |
|---|-------------------------------|--------------------------|-------------|---------|
|   |                               | Severità                 | Probabilità | IP<br>R |
| 1 | Terremoto                     | 1                        | 4           | 4       |
| 2 | Inondazione                   | 1                        | 4           | 4       |
| 3 | Mishandling                   | 1                        | 2           | 2       |
| 4 | Fulminazione diretta          | 2                        | 2           | 4       |
|   | Fulminazione indiretta        | 1                        | 1           | 1       |
| 5 | Incendio causa endogena       | 1                        | 1           | 1       |
|   | Incendio causa esogena        | 1                        | 2           | 2       |
| 6 | Sabotaggio                    | 2                        | 3           | 6       |
|   | Attività venatoria            | 2                        | 2           | 4       |
| 7 | Impatto con veicolo terrestre | 2                        | 2           | 4       |
|   | Caduta velivolo leggero       | 4                        | 1           | 4       |
|   | Caduta velivolo pesante       | 5                        | 1           | 5       |

***Tutti gli indici di priorità del rischio sono molto bassi (IPR ≤ 6)***



## SEVESO III

*Il riferimento normativo più importante inerente all'applicazione di accumulo elettrochimico mediante celle secondarie Na-NiCl<sub>2</sub> risulta essere il Decreto Legislativo 17 agosto 1999, n. 334 (attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose) coordinato con le modifiche introdotte dal Decreto Legislativo 21 settembre 2005, n. 238 (GU n. 271 del 21/11/2005- Suppl. Ordinario n. 289). Tale decreto prende anche il nome di Seveso III.*

**PER NON RIENTRARE NELL'ART. 8 IL NUMERO  
DI UNITÀ PUÒ ARRIVARE FINO A:**

**NaNiCl<sub>2</sub> FINO A 190 UNITÀ, PARI A CIRCA 95 MW e  
285 MWh).**

**NaS FINO A 10 UNITÀ, PARI A CIRCA 12 MW e  
86,4 MWh)**



## CONCLUSIONI

**NECESSARIO UN APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE:** *Le ricerche hanno toccato molte branche dell'ingegneria: la chimica, l'elettrotecnica, il comportamento al fuoco, l'analisi del rischio etc.*

*La famiglia Na-beta è COMPATIBILE per massive installazioni di accumulo elettrochimico sulla rete di AT.*

## RICERCHE IN CORSO

**NECESSARIO UN MODELLO AFFIDABILE DELLA CELLA, DEL MODULO e DELL'UNITÀ VALIDATO DA DATI SPERIMENTALI;**

**NECESSARIO UN MODELLO AFFIDABILE CHE UNISCA IL MODELLO DI CUI AL PUNTO PRECEDENTE CON IL POWER CONVERSION SYSTEM (PCS);**

**CALCOLO DELL'AVAILABILITY DELL'INSTALLAZIONE CHE ABBISOGNEREBBE DEI FAILURE RATES DI MODULI CHE NON HANNO RETURN ON EXPERIENCE E QUINDI DI DIFFICILE REPERIBILITÀ;**



**FIAMM**

Energy Storage  
Solutions

## La tecnologia sodio-cloruro di nichel ( $\text{Na-NiCl}_2$ ) per l'accumulo elettrochimico stazionario sulla rete di trasmissione

Giuseppe Lodi - FIAMM SpA

**AEDIT** ASSOCIAZIONE  
ITALIANA di  
Elettrotecnica, Elettronica, Automazione,  
Informatica e Telecomunicazioni



Ordine degli Ingegneri  
della Provincia di Firenze

*Giornata di studio*

*L'accumulo dell'energia nella rete di trasmissione*

*Venerdì 21 Marzo 2014 - Firenze*

**AEE**

Society AEIT  
per l'Energia Elettrica

Italian Passion  
Global Energy

# FIAMM Group / Organization chart



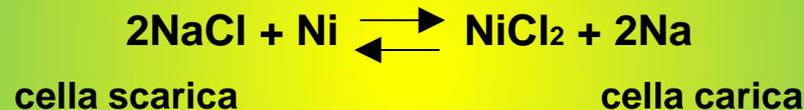
I materiali attivi sono:

nello **stato scarico** (in produzione):

cloruro di sodio e polveri metalliche (nichel-ferro)

nello **stato carico** (dopo la prima carica) essi sono convertiti in:

sodio and cloruri metallici



La temperatura operativa della cella è circa 270°C

L'elettrolita è allo stato fuso (NaAlCl<sub>4</sub>, come catolita) ed allo stato solido, β"allumina (materiale ceramico) che permette il trasporto di ioni sodio e garantisce l'isolamento elettrico tra catodo ed anodo.

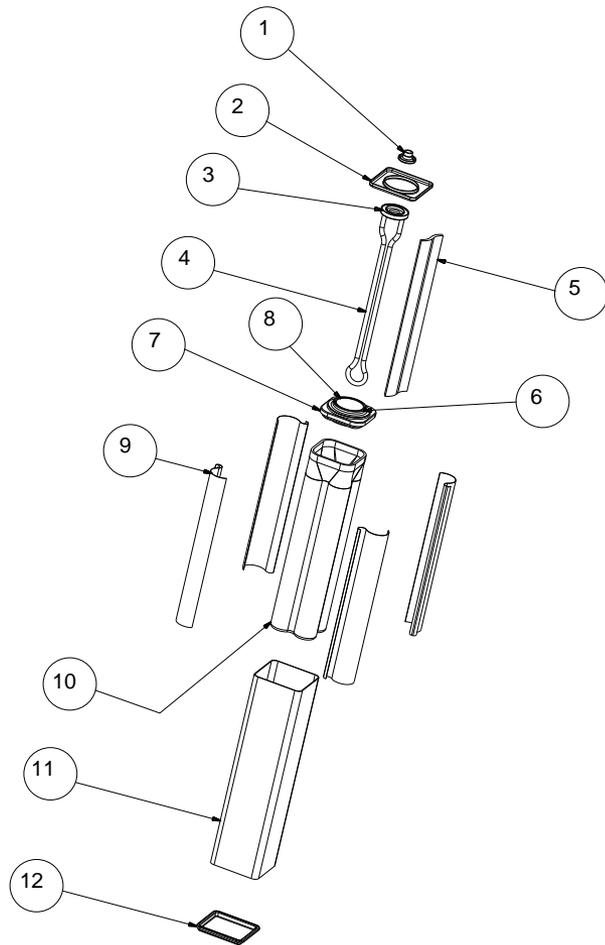
## FIAMM ESS / Caratteristiche della cella sodio-nichel

- **Tensione:** 2.20-2.70 Volt (2.58 V a circuito aperto)
- **Capacità:** 38 Ah
- **Dimensioni:** 36 x 36 x 220 H mm
- **Massa:** 685 g
- **Energia specifica:** 140 Wh/kg (Pb 25-35 Wh/kg)
- **Densità energia:** 280 Wh/l (Pb 70-100 Wh/l)
- **Potenza specifica:** 245 W/kg
- **Densità di potenza:** 491 W/l



*Nota: La densità di energia (Wh/l) della batteria assemblata è significativamente più bassa per la presenza del materiale di isolamento termico e del sistema di gestione della batteria (Battery Management System, BMS).*

# FIAMM ESS / Assemblaggio della cella sodio-nichel



| Rif.. | Q.tà | Descrizione                      | Materiale         |
|-------|------|----------------------------------|-------------------|
| 1     | 1    | Terminale polo positivo          | Nichel            |
| 2     | 1    | Coperchio anodo                  | Acciaio nichelato |
| 3     | 1    | Cathode outer lid                | Nichel            |
| 4     | 1    | Collettore corrente catodico     | Nichel            |
| 5     | 1    | Feltro conduttivo                | Carbonio          |
| 6     | 1    | Anello catodico                  | Nichel            |
| 7     | 1    | Collare ceramico                 | Alfa Alumina      |
| 8     | 1    | Anello anodico                   | Nichel            |
| 9     | 4    | Profili capillari                | Acciaio nichelato |
| 10    | 1    | Tubo ceramico elettrolita solido | $\beta$ " Alumina |
| 11    | 1    | Contenitore cella                | Acciaio nichelato |
| 12    | 1    | Fondo del contenitore cella      | Acciaio nichelato |

## — Tecnologia —

## — Output —

### Processi ceramici

- Granulazione ceramica
- Pressatura Isostatica
- Sinterizzazione
- Saldatura termocompressione



- Tubo Beta-Allumina
- Collare AlfaAllumina
- Assemblaggio tube-collare

### Processi metallurgici

- Miscelatura polveri
- Compattazione a rullo
- Sintesi di sali metallici



- Massa attiva granulata
- Catolita

### Assemblaggio cella

- Saldatura laser
- Essiccazione sotto vuoto
- Riempimento massa attiva
- Sigillatura laser



- Cella Completa

### Assemblaggio batteria e test

- Assemblaggio pacco celle
- Ciclo attivazione
- Installazione BMS
- Ciclo controllo



- Batteria finita

# FIAMM ESS / Tecnologia produttiva celle sodio nichel



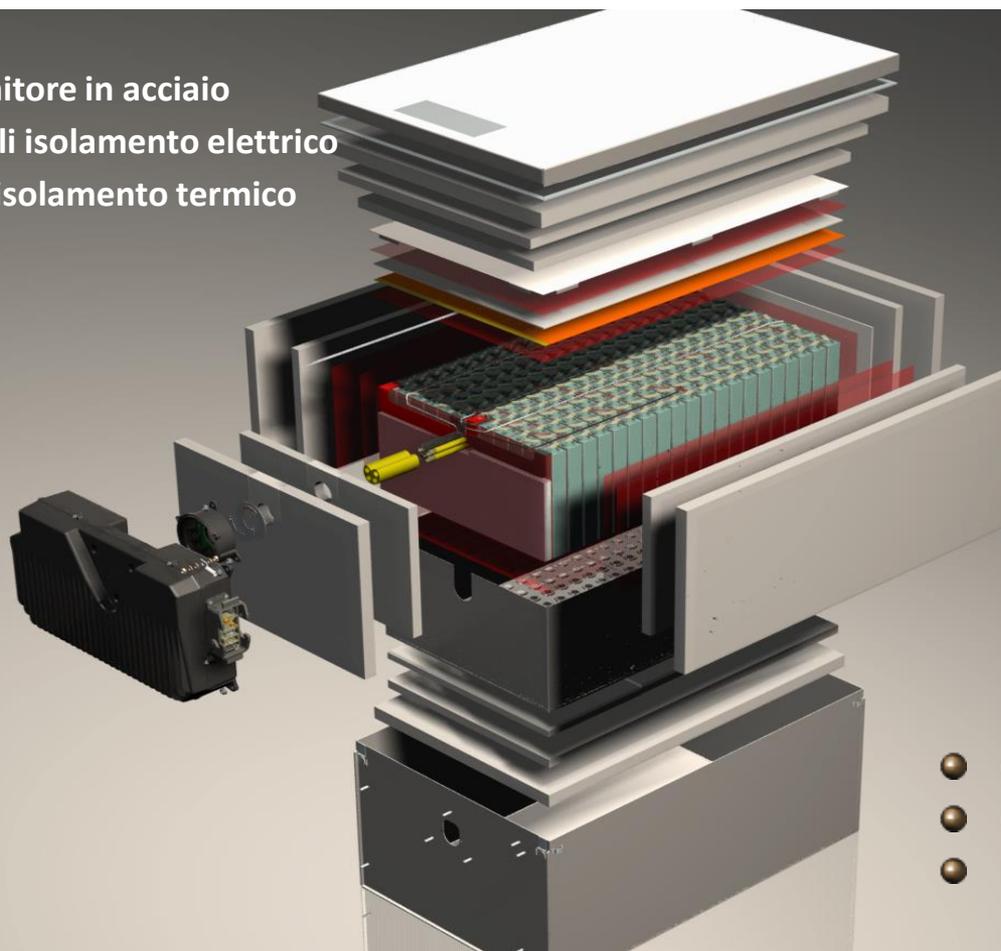
Italian Passion  
Global Energy

*Giornata di studio AEIT - L'accumulo dell'energia nella rete di trasmissione  
Firenze, 21 Marzo 2014*

**FIAMM**

## FIAMM ESS / Assemblaggio batteria

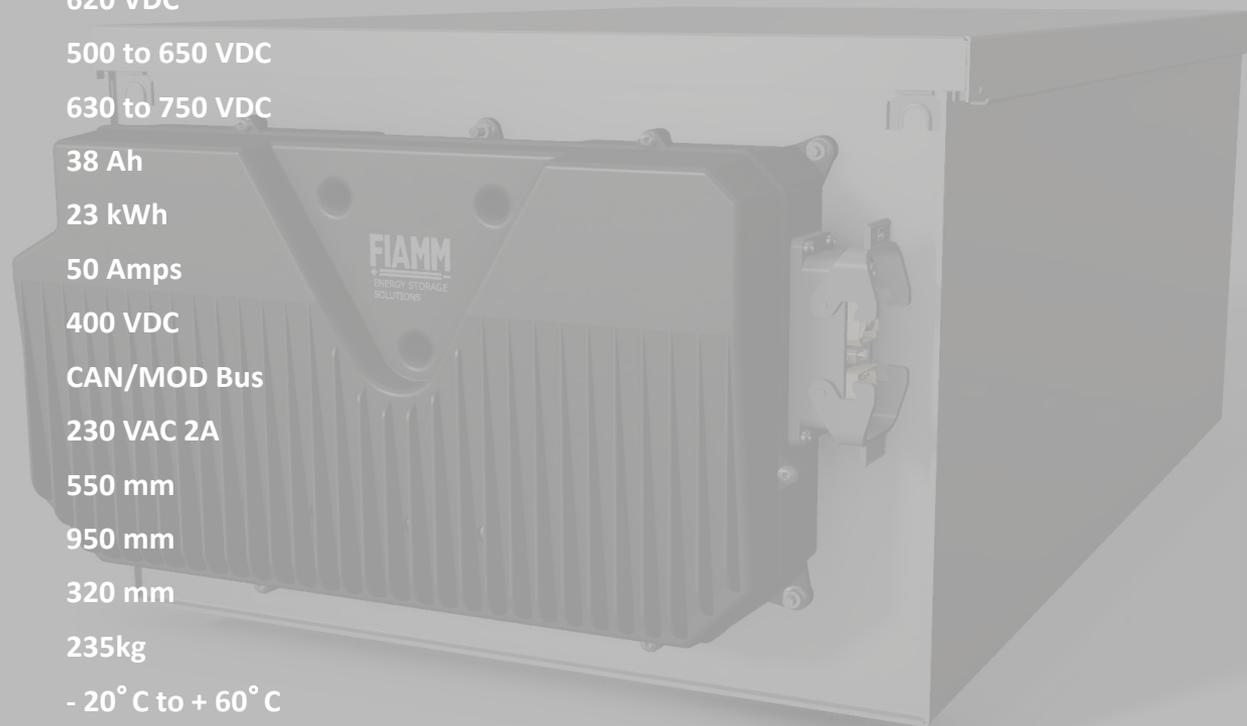
- Contenitore in acciaio
- Pannelli isolamento elettrico
- Lastre isolamento termico
- BMS



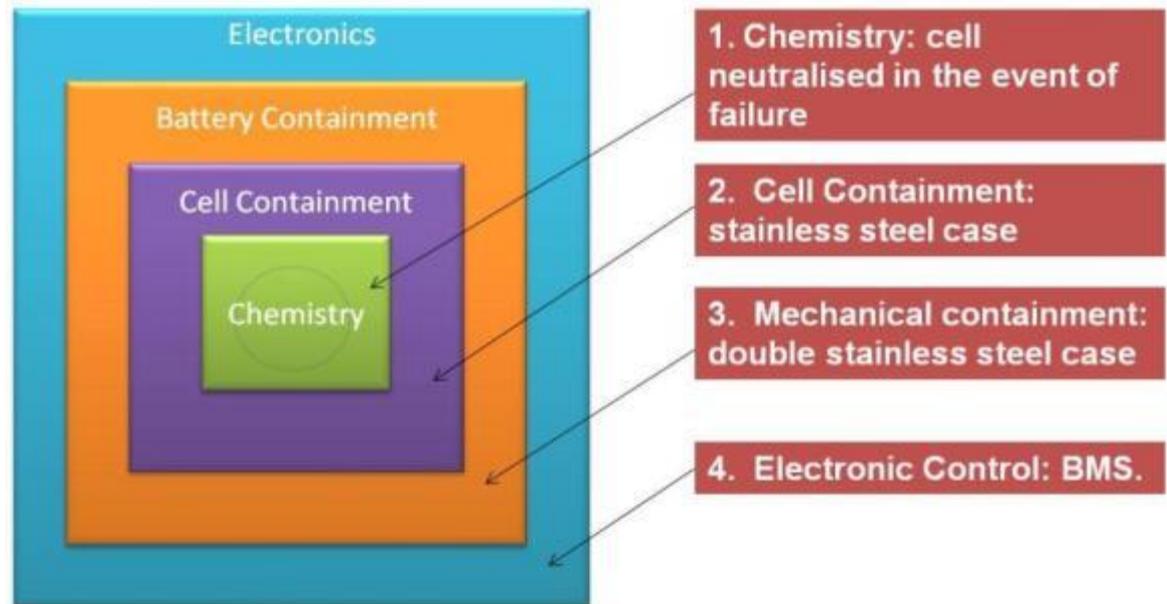
- Celle
- Connessioni intercella
- Battery Control Unit

## FIAMM ESS / Modulo ST523 – Caratteristiche tecniche

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| + Nominal Voltage         | 620 VDC            |
| + Voltage Operating Range | 500 to 650 VDC     |
| + Bus Voltage Range       | 630 to 750 VDC     |
| + Capacity                | 38 Ah              |
| + Nominal Energy          | 23 kWh             |
| + Max Discharge Current   | 50 Amps            |
| + Low Voltage Disconnect  | 400 VDC            |
| + Communication Port      | CAN/MOD Bus        |
| + Alarm Contact           | 230 VAC 2A         |
| + Front                   | 550 mm             |
| + Depth                   | 950 mm             |
| + Height                  | 320 mm             |
| + Weight                  | 235kg              |
| + Environment Temp. Range | - 20° C to + 60° C |



- + Il tipico modo di guasto è un percorso a bassa resistenza con ridotto rilascio di energia
- + Contenitori delle celle e della batteria in acciaio
- + Contenitore esterno in acciaio e lastre di isolante termico inerte
- + La diagnostica integrata nel BMS interviene a più livelli, fino al distacco fisico.
- + Sicurezza di servizio valutata da enti indipendenti nazionali ed internazionali



La composizione elementare di una cella sodio-nichel è la seguente:

|    |      |
|----|------|
| Ni | 23 % |
| Fe | 24 % |
| Na | 8 %  |
| Cl | 19 % |
| Al | 16 % |
| O  | 9 %  |

Nichel è presente come materiale attivo, nel collettore di corrente catodico e come rivestimento protettivo dell'acciaio;

Ferro è presente come materiale attivo e nell'acciaio dei contenitori;

Sodio è presente come materiale attivo anodico e nel catolita;

Alluminio è presente come sale (catolita) e come ossido nella ceramica;

Cloro è presente come materiale attivo e nel catolita;

Ossigeno è presente come ossido nella ceramica.

E' necessaria una infrastruttura per il trattamento delle batterie esauste senza effetti ambientali.

Le batterie al sodio-nichel possono essere convenientemente riciclate in impianti adibiti al trattamento e recupero dei materiali di scarto della produzione da altoforno.

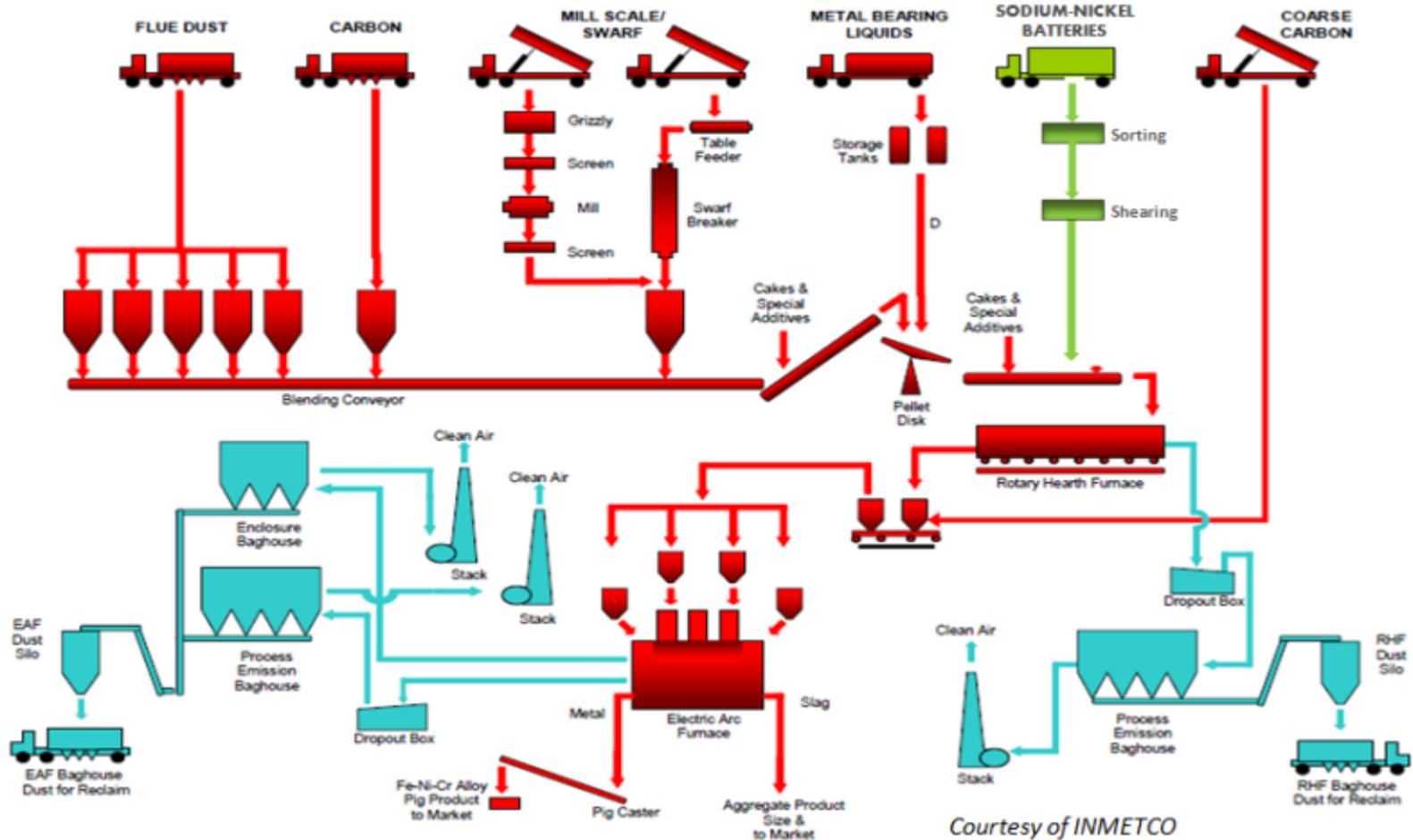
L'outout del processo è costituito da:

- lingotti di leghe acciaio-nichel per la produzione di acciaio inossidabile
- scorie, utilizzate per la costruzione di fondazioni stradali.

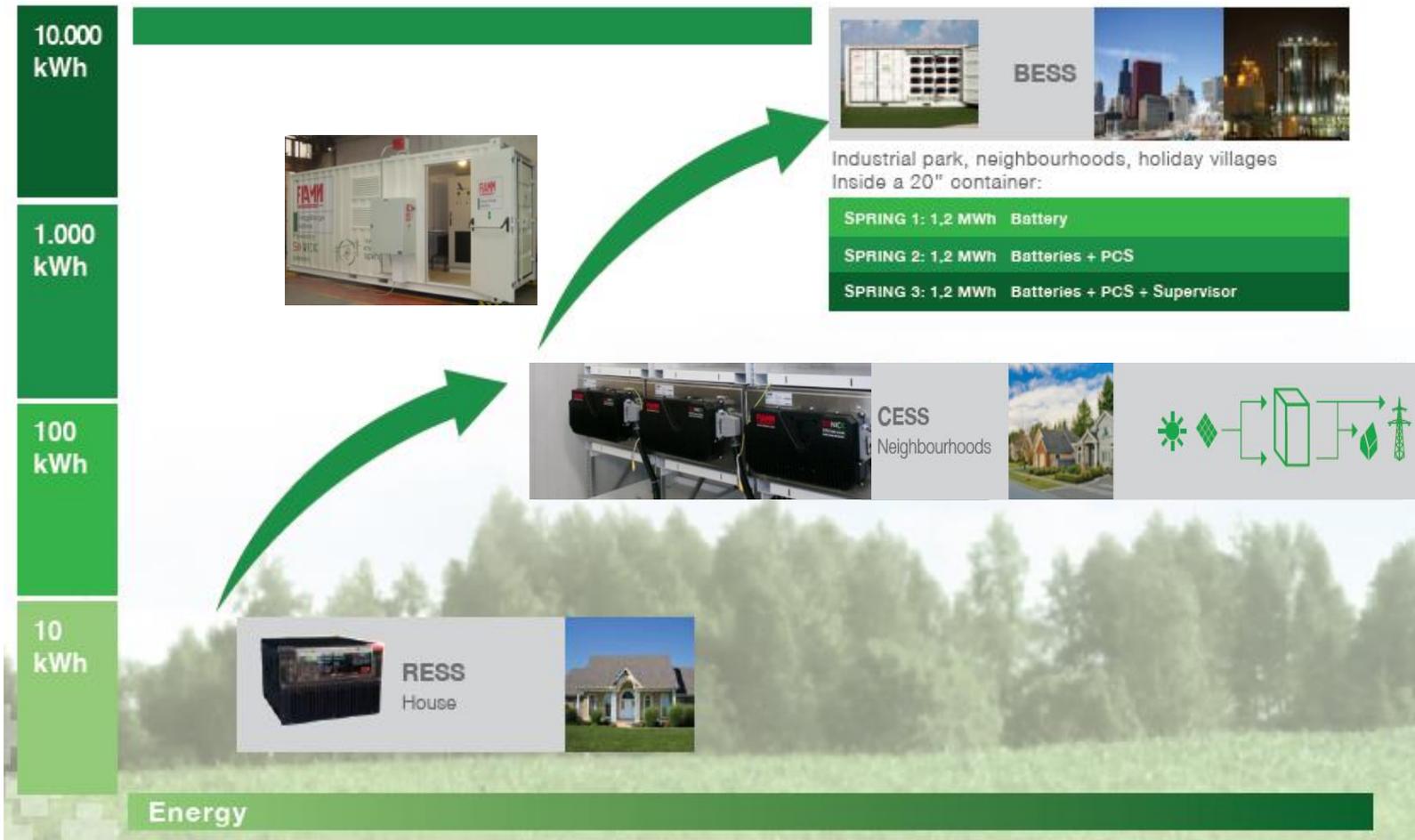
Si stima che l'efficienza del processo sia superiore al 50%.



# FIAMM ESS / Processo di riciclo batterie sodio-nichel



# FIAMM ESS / Applicazioni di accumulo energia



## FIAMM ESS / Applicazioni di Energy Storage

- + On grid
- + Off grid

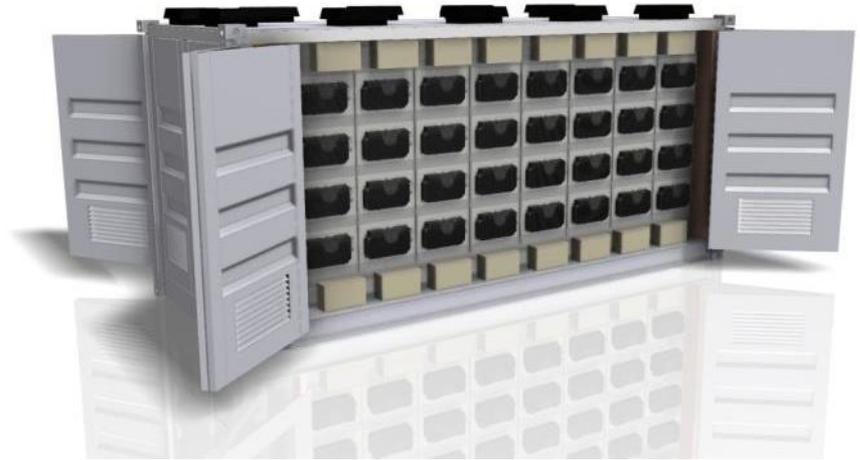


## Spring 164™ MW class concept Energy Storage System



### Spring 164™

- + sistema modulare;
- + elevata densità energia;
- + insensibilità alla temperatura;
- + alta durata ciclica;
- + basso impatto ambientale;
- + progettato per:
  - ✓ *Sicurezza;*
  - ✓ *Disponibilità;*
  - ✓ *Affidabilità;*
  - ✓ *Manutenibilità.*



## FIAMM ESS / Caratteristiche tecniche del sistema Spring 164™

|                                    |  |         |         |
|------------------------------------|--|---------|---------|
| Cell Chemistry:                    | Sodium Nickel Chloride (NaNiCl <sub>2</sub> )              |         |         |
| Total Number of Cells/Module       | 240 / 64   |         |         |
| Battery System Configuration       | 64 x ST523 in 20 ft. ISO Container (6.06m x 2.44m x 2.89m) |         |         |
| Nominal BESS Current Capacity      | 2432 Ah  |         |         |
| Nominal Stored Energy              | 1.5 MWh (100% DOD)   |         |         |
| Battery System Voltage Range       | Minimum  | Nominal | Maximum |
|                                    | 420 VDC  | 620 VDC | 648 VDC |
| Max Charge Voltage                 | 700 VDC (DC Bus)   |         |         |
| Min Discharge Voltage              | 420 VDC (DC Bus)   |         |         |
| Max Discharge Current / Power      | 1920 A / 1150 kW   |         |         |
| Operating Ambient Temperature      | -20°C to 60°C  |         |         |
| Auxiliary power 400VAC 3ph 50/60Hz | 15 kW  |         |         |

# FIAMM ESS / Spring 164™



Italian Passion  
Global Energy

*Giornata di studio AEIT - L'accumulo dell'energia nella rete di trasmissione  
Firenze, 21 Marzo 2014*

**FIAMM**

La validazione dello Spring 164 *Energy Storage System* è stata eseguita attraverso:

- + tools di modellazione e state of the art engineering;
- + prove interne ed esterne secondo normativa esistente ed oltre;
- + prove secondo le “worst case scenario conditions”;
- + valutazione del rischio con tecniche FMEA e FMECA con l’ausilio di esperti indipendenti;
- + valutazione dell’impatto ambientale di grandi installazioni secondo direttiva EU “Seveso”.

## FIAMM ESS / Spring 164 – Prove sismiche e vibrazionali



Italian Passion  
Global Energy

*Giornata di studio AEIT - L'accumulo dell'energia nella rete di trasmissione  
Firenze, 21 Marzo 2014*

**FIAMM**

## FIAMM ESS / Installazione presso INES-CEA (FR)



## FIAMM ESS / Sottostazione presso Duke Energy- Rankin (NC)

Sistema di accumulo 250 kWh 390 kW sottostazione Rankin, Carolina del Nord  
Mitigazione delle fluttuazioni di generazione fotovoltaica



## FIAMM ESS / Installazione presso EDF - Colombiers (FR)



# FIAMM ESS / Installazione pilota EDF - Colombiers (FR)



## Battery performances

Feedback on BESS energy storage pilot plant in Colombiers - France  
 Courtesy of EDF

|                         |  | Datasheet  | Measurements  |
|-------------------------|--|--|---|
| Power                   | Power in charge                                  | See curves   | See curves  |
|                         | Power in discharge (3h / Max)                    | 6,25kW / 6,25kW  | 6,25kW / >10kW <sup>(1)</sup>                       |
| Energy                  | Usable energy (100% DOD at C/10)                 | 22,5 kWh   | 23,7 kWh <sup>(2)</sup>                             |
|                         | SOC range  | 10% - 90%  | For 3 batt: 10% - 88,5%<br>For 32 batt: 12% - 85% ? |
| Efficiency              | DC/DC Round Trip (at 6,25kW & 80% DOD)           | 90%  | 89%   |
| Auxiliaries consumption | BMS Electronic                                   | 12W  | 12,5W +/-10% <sup>(3)</sup>                         |
|                         | Heater in Standby mode - 3 batt                  | 170W   | 150W +/-3% <sup>(3)</sup>                           |
|                         | Heater in Standby mode - Container 64 batt       | < 9kW  | 10,3 kW   |
|                         | Therm. inertia after déch. C/3 80% DOD (3 batt)  | 9h   | 11h   |
|                         | Therm. inertia after déch. C/3 80% DOD (64 batt) | ND   | ND  |
| Response time           | Ramp   | ND   | 0 à Pnom : < 1 sec                                  |
|                         | Reaction time                                    | ND   | < 0,5s <sup>(4)</sup>                               |
|                         | Switch time (charge > discharge)                 | ND   | < 0,5s <sup>(4)</sup>                               |
|                         | Switch time (discharge > charge)                 | ND   | < 0,5s <sup>(4)</sup>                               |
|                         | Start-up time (from Off-mode)                    | ND   | 45s   |
|                         | Communication protocol                           | CAN Open, Modbus TCP                                   | CAN Open, Modbus TCP                                |
| Voltage / Current       | Max voltage in charge                            | 700 Vdc  | 648 Vdc   |
|                         | Min Voltage in discharge                         | 460 Vdc  | 515 Vdc   |
|                         | Nominal voltage                                  | 620 Vdc  | 620 Vdc   |
|                         | Max current in charge                            | ND   | 14,5A   |
|                         | Max current in discharge                         | 50A  | > 20A <sup>(1)</sup>                                |
| Operational constraints | Remote control                                   | Yes  | Yes   |
|                         | Frequency for changing setpoint                  | ND   | > 10 setpoints/sec <sup>(4)</sup>                   |
|                         | Monitoring                                       | SOC, Ubatt, Ibatt, temperature.<br>Values per battery. | SOC, Ubatt, Ibatt.<br>Average values.               |
|                         | Heating time T*amb > T*opérationnal              | Up to 24 hours   | 9h  |

(1) No tested beyond but high enough for our application

(2) Energy discharged between SOC 90% and SOC 10% at 6kW rate = 18,96kWh (calculated from Idc and Vdc sensor near the batteries) >> Extrapolated to 100% DOD = 23,7kWh

(3) Approximated values calculated from SOC variations (no sensor available to measure it directly)

(4) Not measured precisely but high enough for our application

11

Confidential

Damien GUY – March 2014



# FIAMM ESS / Smart microgrid – Campus Universitario di Savona



## FIAMM ESS / Cayenne - Guaiiana francese



Italian Passion  
Global Energy

*Giornata di studio AEIT - L'accumulo dell'energia nella rete di trasmissione  
Firenze, 21 Marzo 2014*

**FIAMM**



- + il progetto dello Spring 164 Energy Storage System è stato condotto utilizzando strumenti di modellazione e la “best practice engineering”;
- + i test di validazione hanno confermato la bontà del progetto;
- + le prove sul campo in “real world conditions” procedono senza particolari problemi e consentono un progressivo affinamento delle soluzioni progettuali e di gestione;
- + anche sotto le “worst case scenario conditions” la tecnologia sodio-nichel dimostra intrinsecamente un livello di sicurezza accettabile.

**Grazie per la Vostra attenzione!**

# Sistemi di accumulo a supporto della regolazione di frequenza di rete: valutazioni preliminari

S. Canevese, E. Ciapessoni, *D. Cirio*, A. Gatti, A. Pitto

Giornata di studio AEIT «L'accumulo dell'energia nella rete di trasmissione»



Firenze, 21 marzo 2014

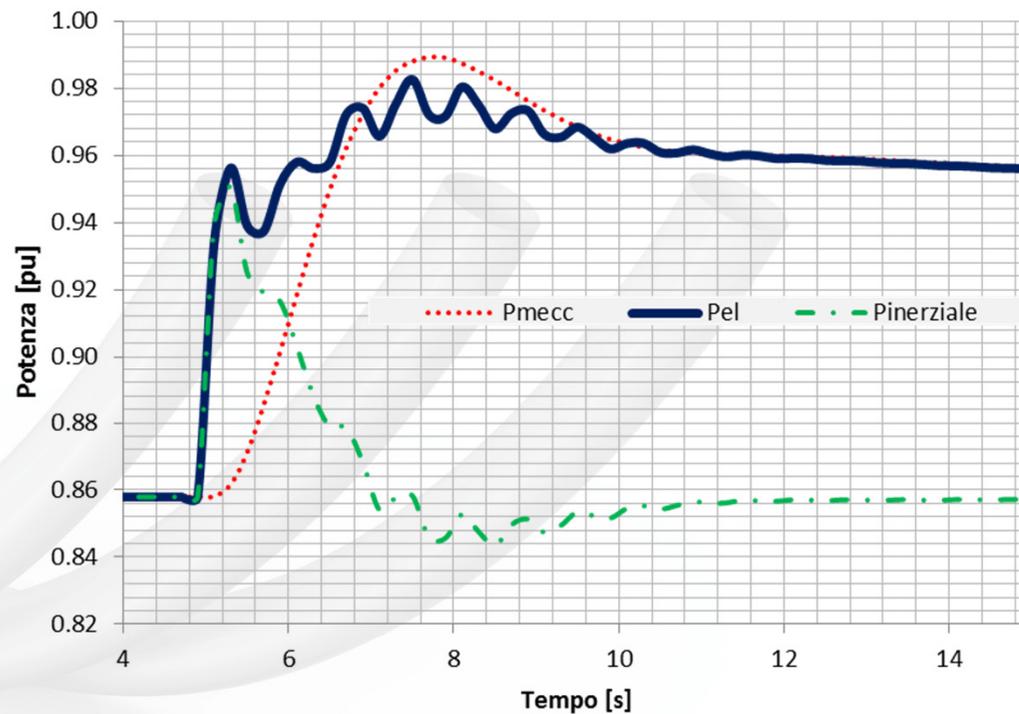
## Sommario

- **Inerzia e Regolazione primaria**
- **Sistemi di Accumulo (SdA) per la regolazione primaria di frequenza**
  - Modello
  - Strategie di gestione
  - Risultati: potenze/energie e valorizzazione
- **Conclusioni**

## Servizi per la sicurezza: *desiderata*

- **Inerzia**
  - Potenza di picco «istantanea» (500 ms)
- **Regolazione primaria**
  - Potenza di picco per alcuni secondi (15-30 s)

- **Regolazione secondaria**
  - Potenza/Energia
- **Regolazione terziaria**
  - Potenza/Energia
- **Supporto di tensione**
  - Condizioni normali
  - Sotto guasto



## Servizi per la sicurezza: valorizzazione

- **Inerzia & Regolazione primaria @ grandi perturbazioni**

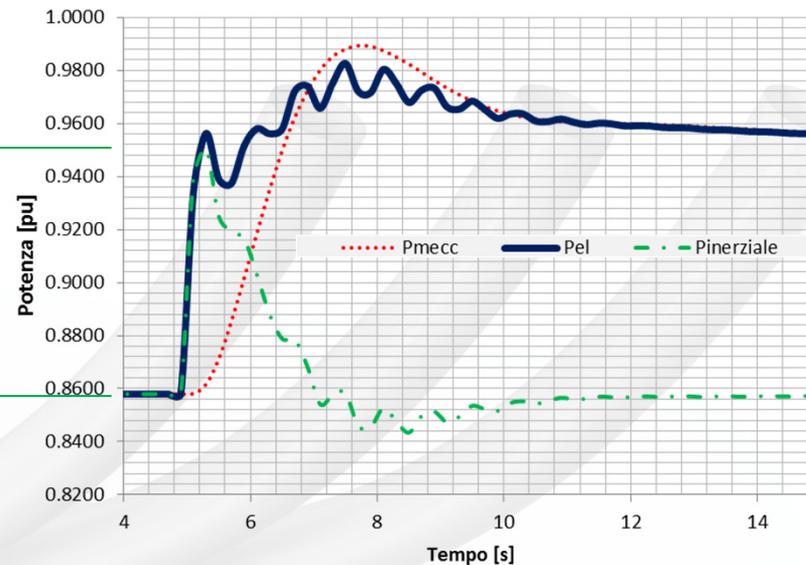
- **Fondamentale per la sicurezza**

- Grandi perturbazioni sono rare --> Poco significativo in termini energetici

- **«Costo della sicurezza» non facile da determinare**

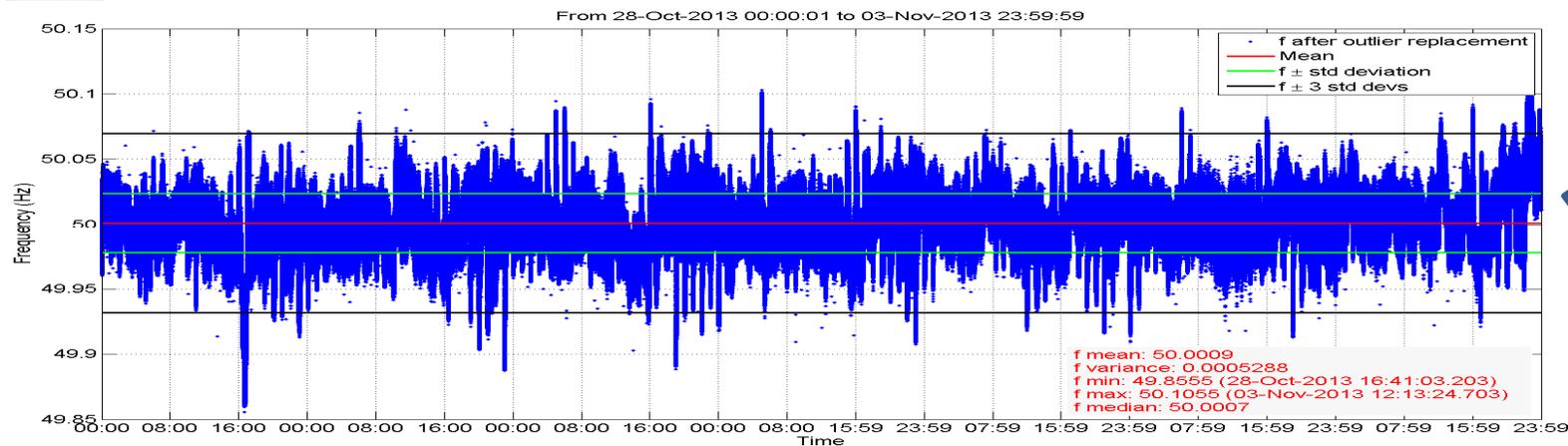
- *Equivalenza rispetto ai gruppi convenzionali es. per l'inerzia*

$\Delta P$



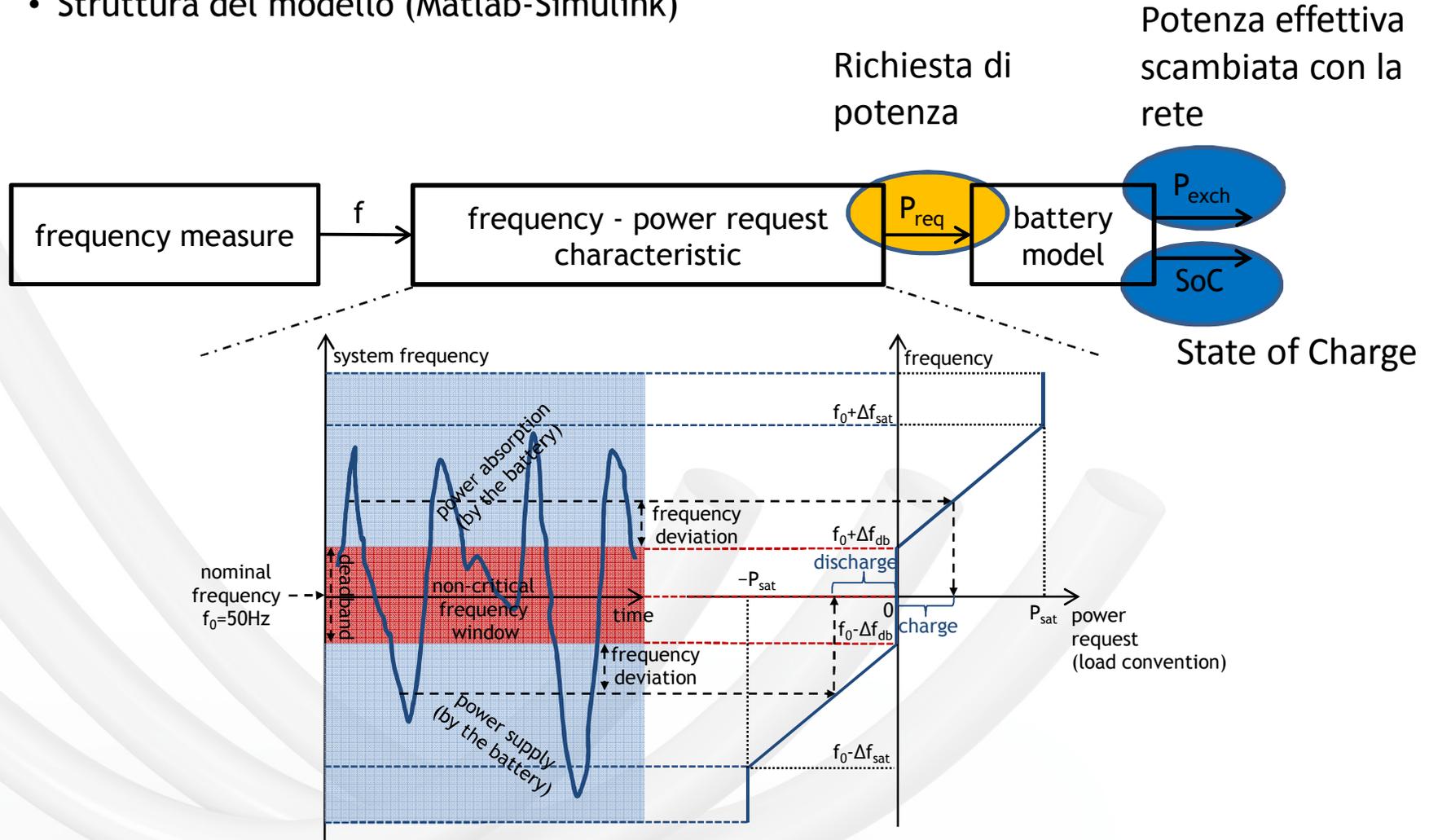
## Servizi per la sicurezza: valorizzazione

- **Regolazione primaria @ deviazioni normali di frequenza, valutata su lunghi periodi**
  - Energia scambiata con la rete in regolazione
- **Regolazione secondaria e terziaria**
  - Energia scambiata con la rete ai prezzi di questi servizi



# SdA per supporto a regolazione primaria

- Struttura del modello (Matlab-Simulink)



## Ipotesi

- $P_n = 2 \text{ MW}$
- $E_n / P_n = 2 \text{ h}$  (es. litio-ioni o sodio-cloruro di nichel)

- $SoC = (0 \div 100\%) SoC_{nom}$  dove  
 $SoC_{nom}$  = quota dedicata alla primaria (SdA per più servizi)

- Potenza  $P_n$  usata per la regolazione primaria

- $0 \leq \eta \leq 1$  in generale diverso fra carica e scarica

$$\eta_{charge} = \eta_{batt} \eta_{inverter}$$

$$\eta_{discharge} = \eta_{inverter}$$

- $SoC(t+1) = SoC(t) + k_i P_{req}(t) \Delta t$

- Perdite di carica nulle

- **Regolatore primario :**

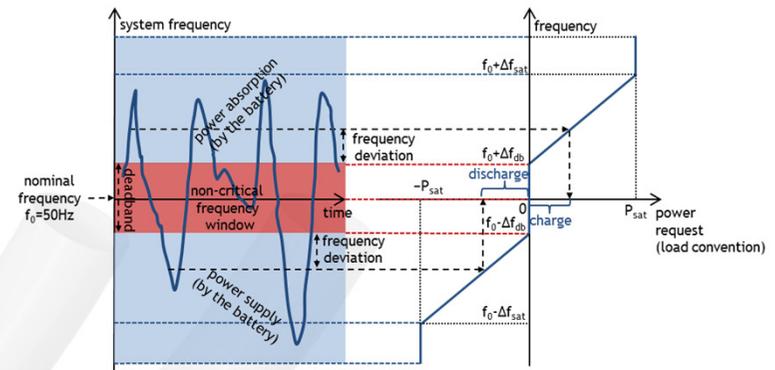
- **banda morta**  $\pm 20 \text{ mHz}$  (cfr. gruppi convenzionali)

- **saturazione** a  $\pm 100 \text{ mHz}$ , con potenza  $P_n$

- Caratteristica lineare --> statismo permanente di regolazione = 0.2% (gruppi convenzionali: tipicamente 5%)

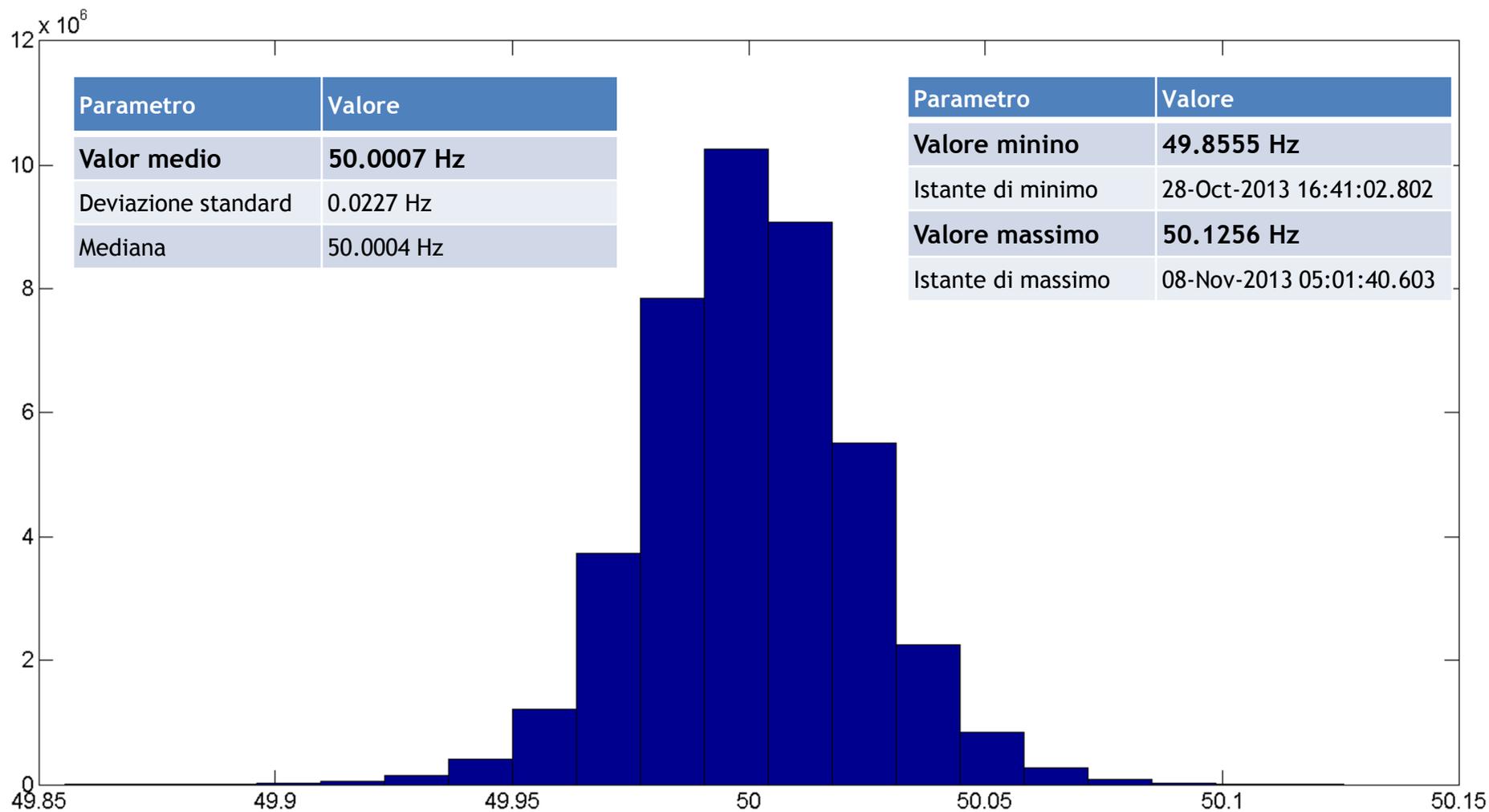
- **Analisi «in anello aperto»** (no effetti sulla rete)

Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A.



## Statistiche frequenza

- Dati misurati ogni 100 ms, bassa tensione
- Esempio: intervallo di **7 settimane, dal 30 settembre al 17 novembre 2013**

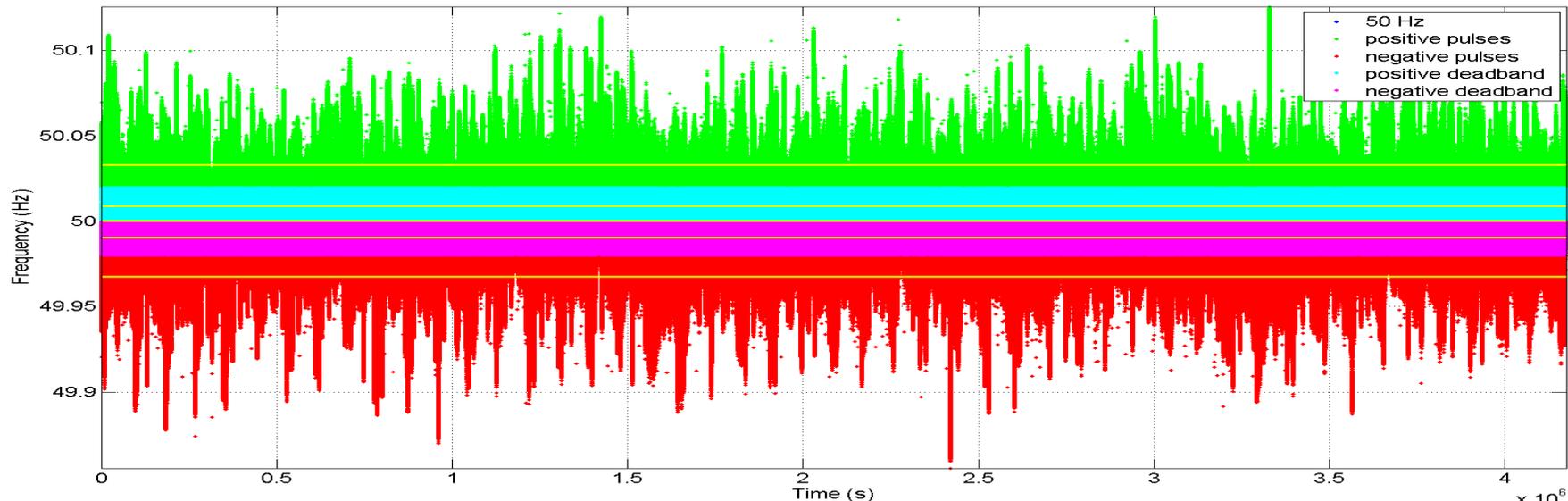


## Risultati: sommario potenza ed energia richieste in regolazione

| Grandezza calcolata ( $\Delta f := f - f_0$ ), in 7 settimane   | Calcolo a partire da f (*)       |
|---|----------------------------------|
| Durata cumulata impulsi positivi (i.e. frazione di tempo in cui $\Delta f > 20\text{mHz}$ )                                 | 18.4062 %                        |
| Durata cumulata impulsi negativi (i.e. frazione di tempo in cui $\Delta f < -20\text{mHz}$ )                                | 16.6717 %                        |
| <b>Durata cumulata impulsi (positivi+negativi)<br/>(frazione di tempo in cui <math> \Delta f  &gt; 20\text{mHz}</math>)</b> | <b>35.0779 %</b>                 |
| Media f in impulsi positivi   | 50.0333 Hz                       |
| Media f in impulsi negativi   | 49.9673 Hz                       |
| Potenza media assorbita in impulsi positivi   | 0.1658 $P_n$                     |
| <b>Energia da assorbire in impulsi positivi</b>   | <b>35.39 <math>P_n h</math></b>  |
| Potenza media erogata in impulsi negativi   | -0.1591 $P_n$                    |
| <b>Energia da erogare in impulsi negativi</b>   | <b>-30.75 <math>P_n h</math></b> |

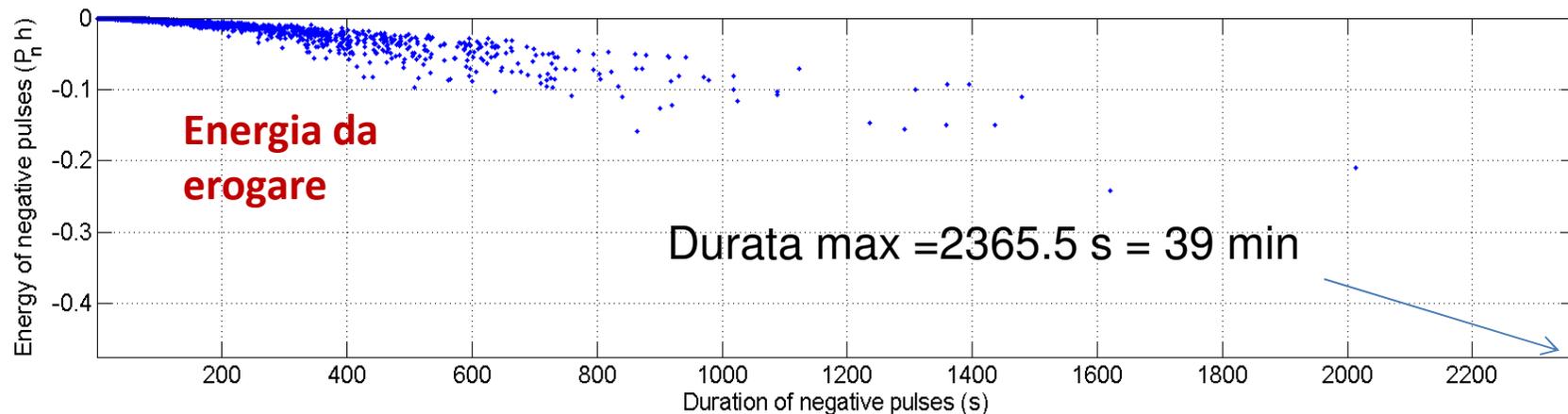
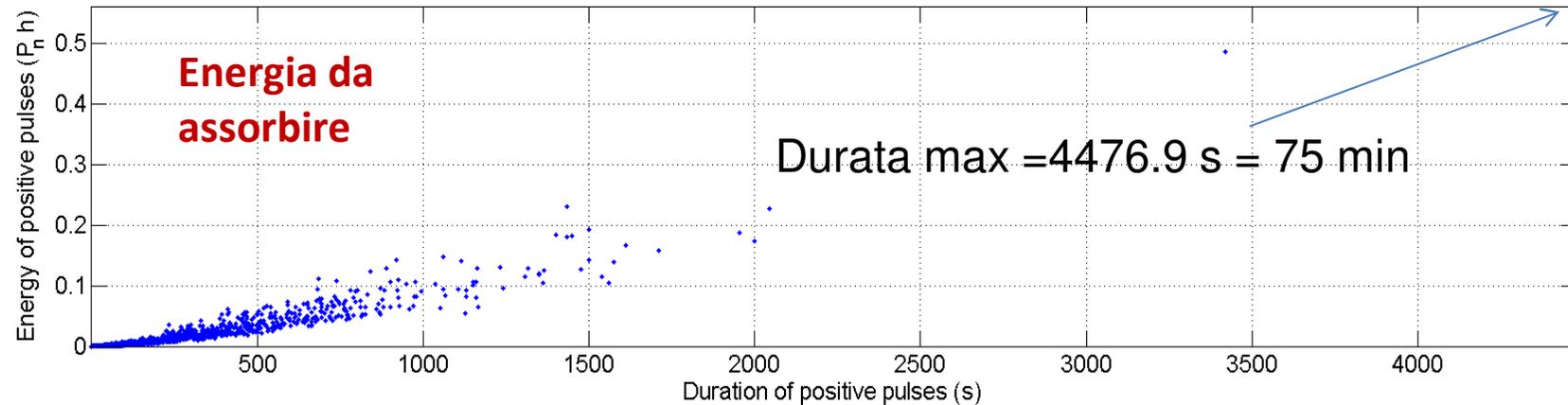
SdA ideale:

- SoC illimitata
- $\eta = 1$
- P illimitata



## Richieste dalla regolazione primaria: potenza ed energia

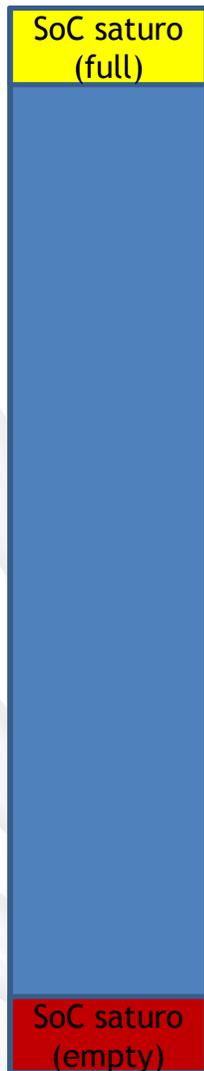
- «Distribuzione» energia pulse positivi e negativi (calcolo con MA(10))



90% delle richieste continuative («impulsi»):

- Durata minore di 20 s
- Energia minore di  $3 \times 10^{-4} P_n h$  (ns. ipotesi = 0.6 kWh)

## Strategie di controllo del SdA



### S1: «Pura» regolazione

- Scambio con la rete in regolazione di frequenza
- No controllo dello stato di carica
- **Regolazione**
  - $|\Delta f| > 20$
  - Erogazione o assorbimento
- **Stand-by forzato**
  - $\Delta f > 20$  ms e SoC full, oppure
  - $\Delta f < -20$  ms e SoC empty
  - Non fa nulla

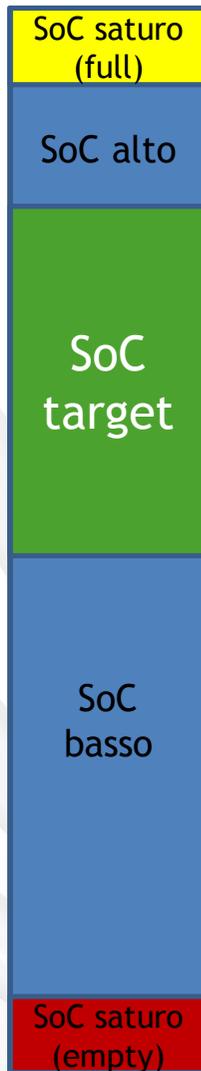
## Strategie di controllo del SdA



### S2: Regolazione + ripristino al 100%

- Scambio con la rete in regolazione di frequenza
  - Ripristino al 100% dello stato di carica (SoC target = 100%)
- 
- **Regolazione**
    - $|\Delta f| > 20$
    - Erogazione o assorbimento
  - **Ripristino**
    - $|\Delta f| < 20$  ms e SoC non full
    - Assorbimento
  - **Stand-by forzato**
    - $\Delta f > 20$  ms e SoC full, oppure
    - $\Delta f < -20$  ms e SoC empty
    - Non fa nulla

## Strategie di controllo del SdA

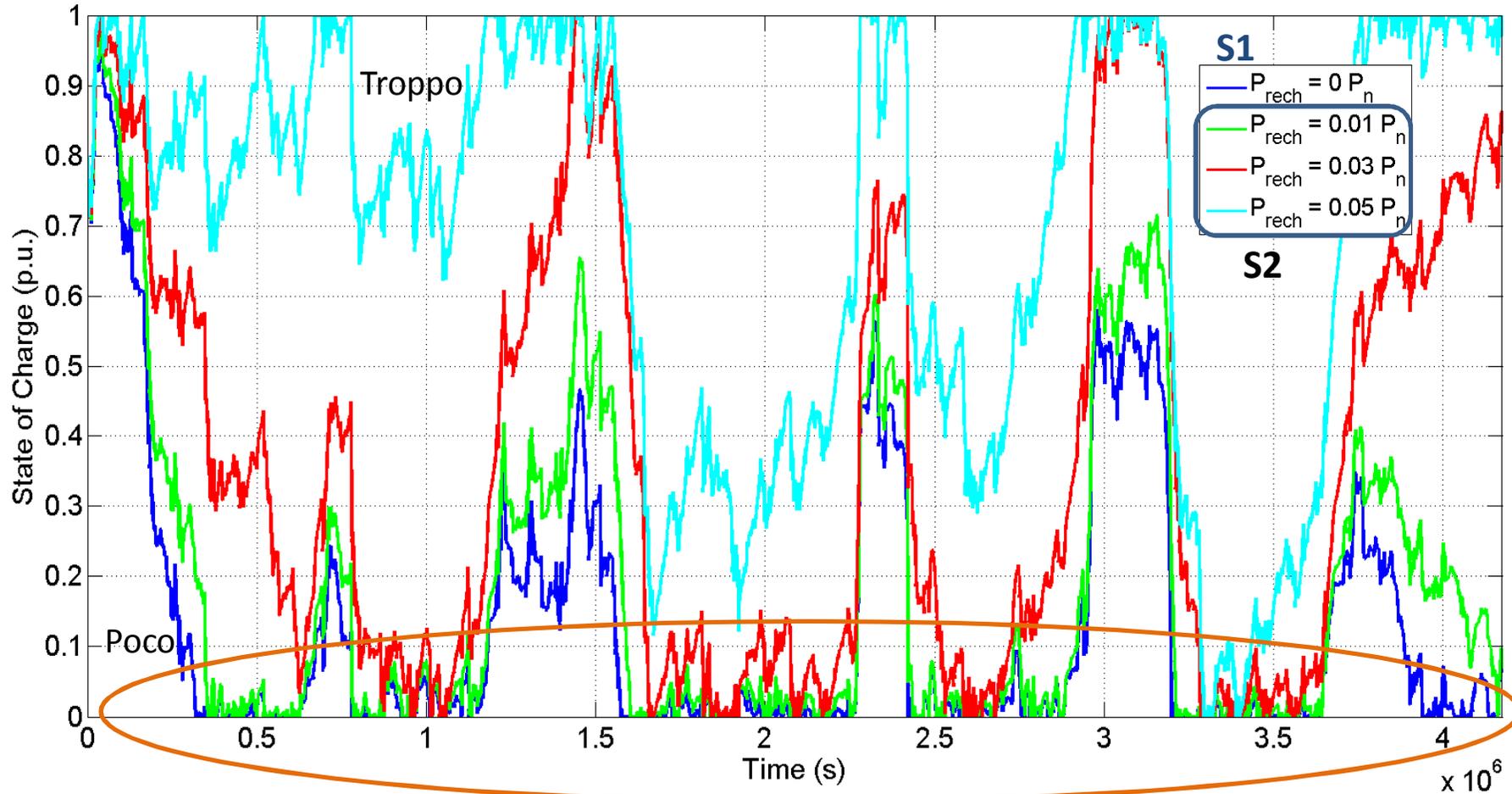


### S3: Regolazione + ripristino in una banda SoC target

- Scambio con la rete in regolazione di frequenza
- SoC target compreso tra  $SoC_{tgt\_min}$  e  $SoC_{tgt\_max} < 100\%$
- **Regolazione**
  - $|\Delta f| > 20$  ms e SoC normale (alto/target/basso)
  - Erogazione o assorbimento
- **Ripristino**
  - $|\Delta f| < 20$  ms e SoC alto/basso
  - Erogazione o assorbimento
- **Stand-by «idle»**
  - $|\Delta f| < 20$  ms e SoC target
  - Non fa nulla
- **Stand-by forzato**
  - $\Delta f > 20$  ms e SoC full, oppure
  - $\Delta f < -20$  ms e SoC empty
  - Non fa nulla

## Risultati: SoC

- S1 (recharge power = 0)
- S2 (ricarica al 100%), per diversi valori di potenza di ricarica espressi in funzione di  $P_n$
- $\eta = 0.7$ ,  $\text{SoC}_{\text{ini}} = 0.8$



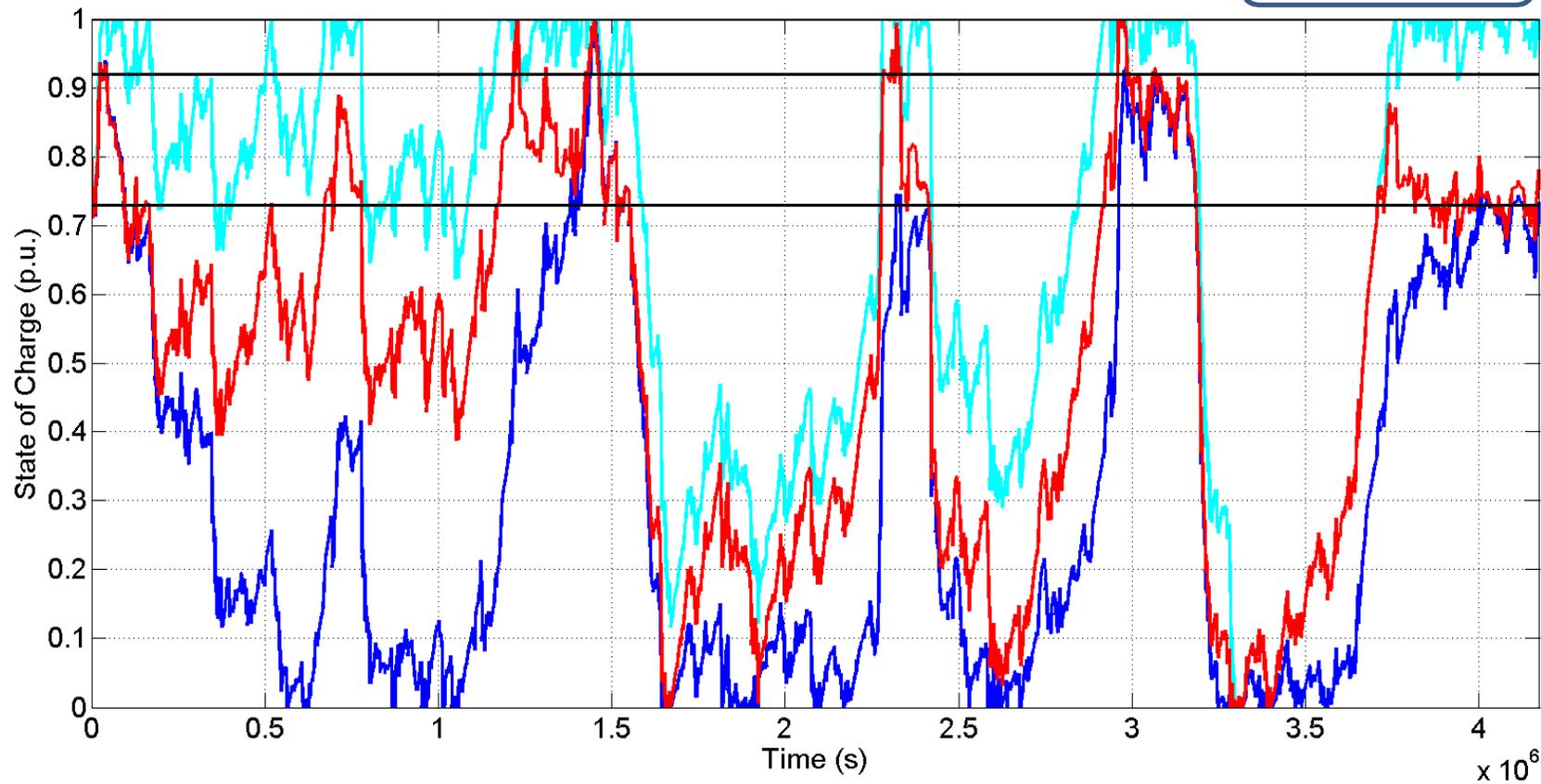
alto rischio annullamento SoC in assenza di ricarica adeguata

## Risultati: SoC

- S2 con  $P_{\text{ricarica}} = 0.05 P_n$  (dalla slide precedente)
- S3 con diversi valori di potenza di ripristino (uguali in carica e scarica)
- $\eta = 0.7$ ,  $\text{SoC}_{\text{iniziale}} = 0.8$

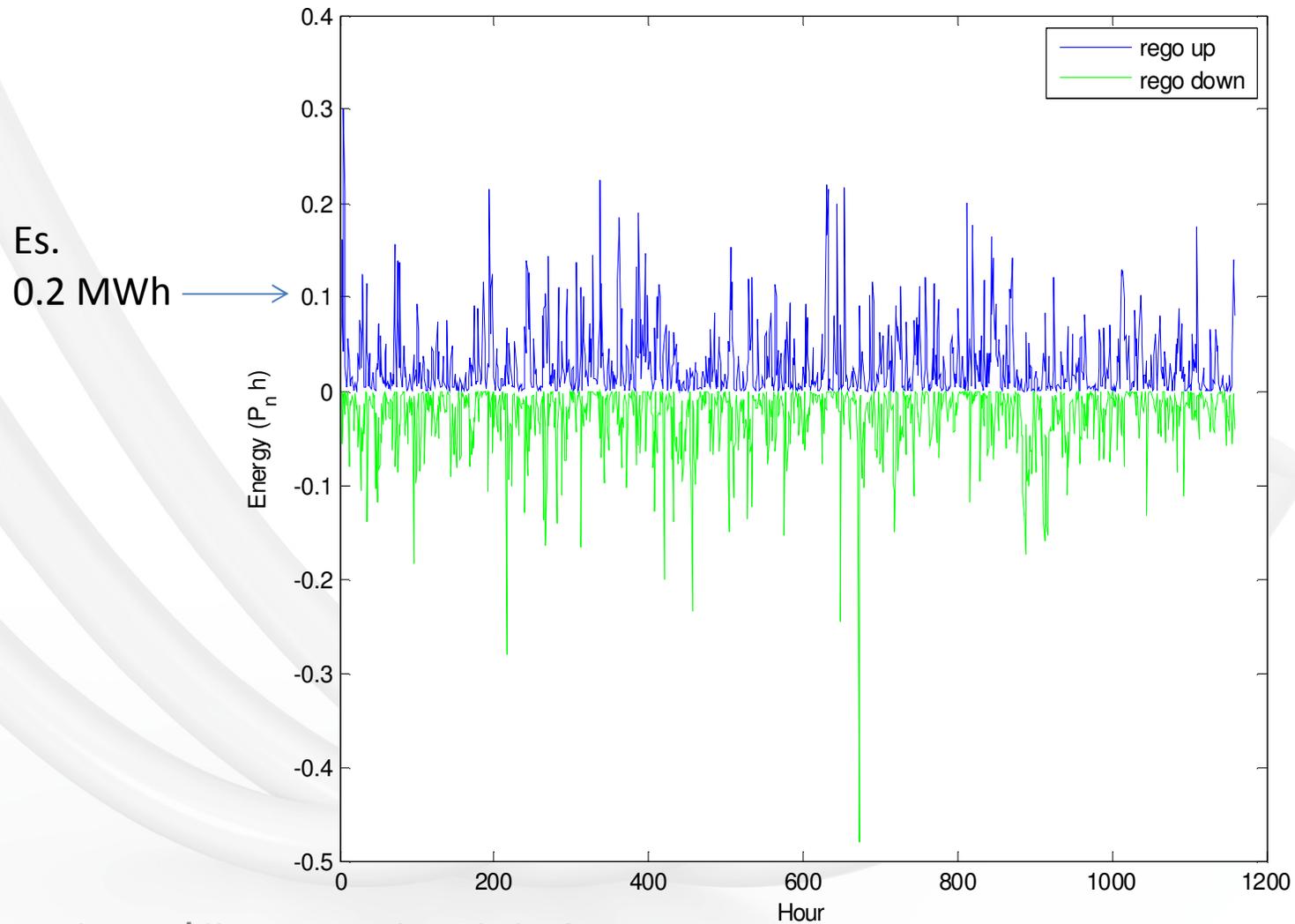
S2:  $P_{\text{ricarica}}$   
S3:  $P_{\text{ripristino}}$

|                                    |
|------------------------------------|
| $P_{\text{rech}} = 0.05 P_n$       |
| $P_{\text{rech,disch}} = 0.03 P_n$ |
| $P_{\text{rech,disch}} = 0.05 P_n$ |



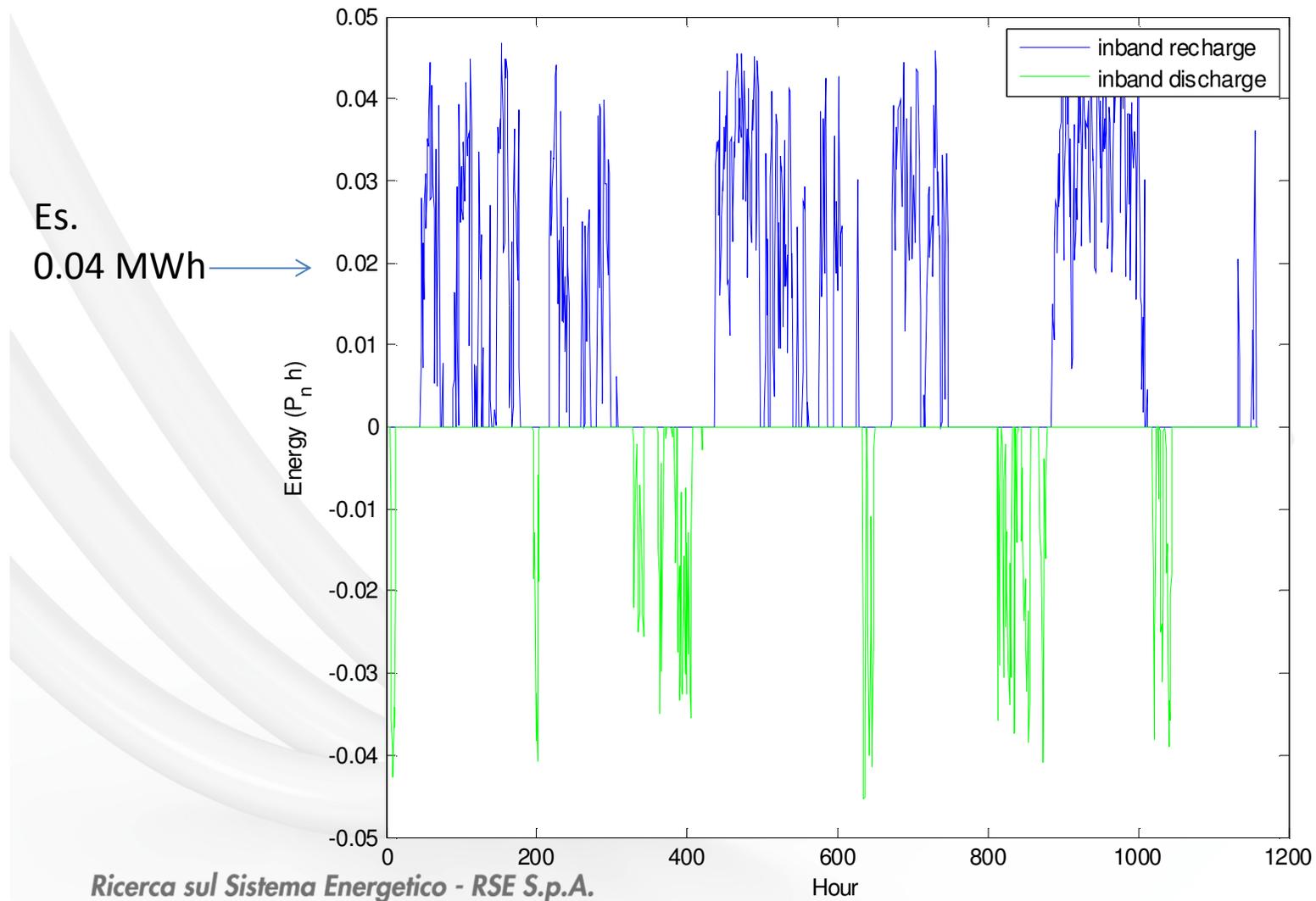
## Risultati: Energia oraria in regolazione

- S3
- $\eta_{\text{inverter}} = 0.9$ ,  $\eta_{\text{batteria}} = 0.9$



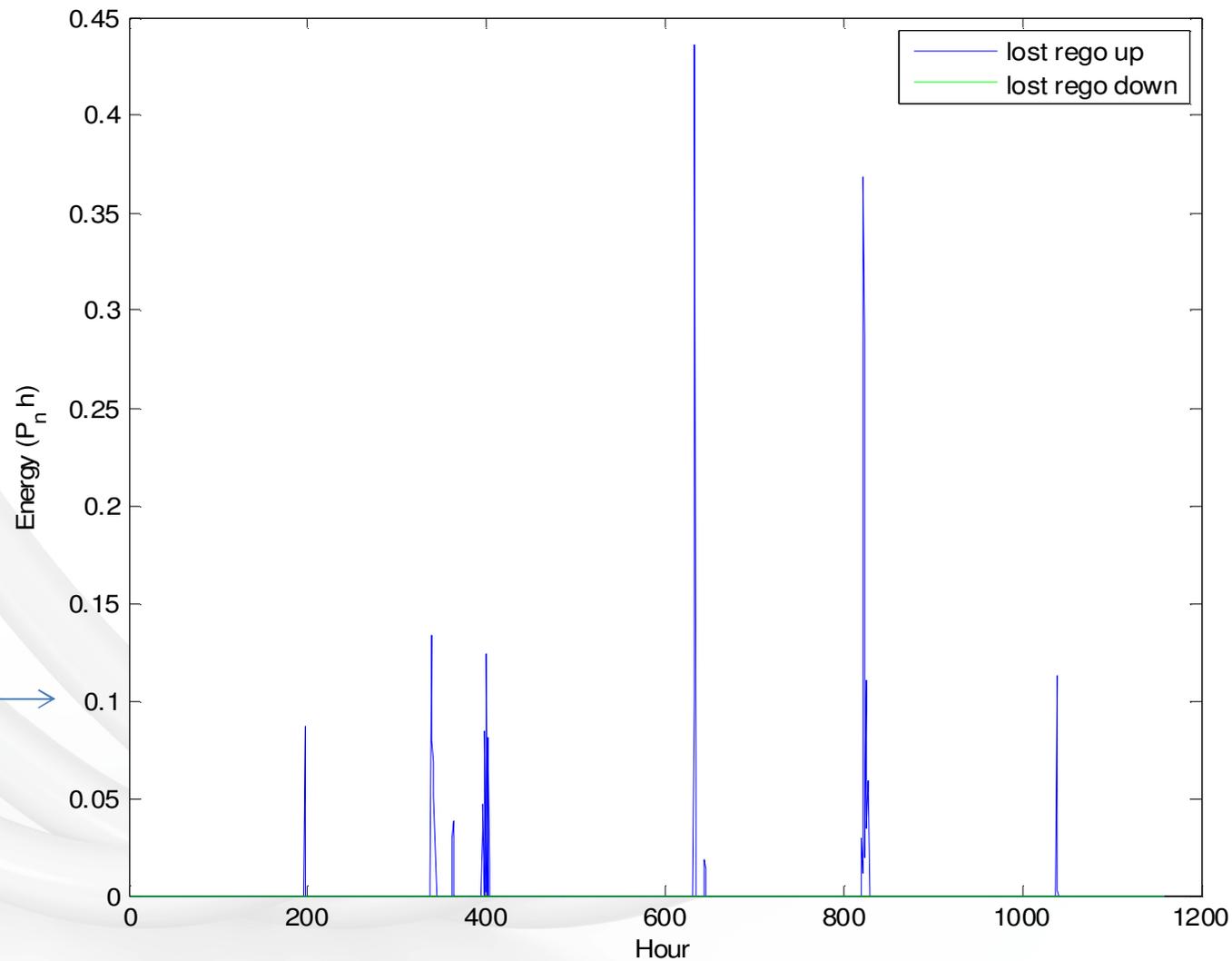
## Risultati: Energia oraria in ripristino

- S3
- $\eta_{\text{inverter}} = 0.9$ ,  $\eta_{\text{batteria}} = 0.9$



## Risultati: Energia oraria “persa” ai fini della regolazione

- S3
- $\eta_{\text{inverter}} = 0.9$ ,  $\eta_{\text{batteria}} = 0.9$



Es.  
0.2 MWh →

## Valorizzazione energia in regolazione

Delibera **231-13** dell'AEEG:

### Erogazione:

- il **prezzo zonale** di vendita registrato sul Mercato del Giorno Prima (**MGP**) nella zona in cui è localizzata l'UP,
- **umentato** di un valore pari alla metà del differenziale medio annuo registrato nell'anno precedente fra due valori:
  - il **prezzo medio ponderato** delle offerte **accettate** per la regolazione **secondaria** a salire sul Mercato per il Servizio di Dispacciamento (**MSD**),
  - la **media** dei **prezzi zonal di vendita** registrati sul **MGP ponderata** per le quantità accettate per la regolazione secondaria a salire nelle relative zone;
- Simile per l'**assorbimento**

## Valorizzazione energia in ripristino

Valorizzata **al pari degli sbilanciamenti di unità non abilitate**, in base ai **prezzi medi MSD** a salire e a scendere ed ai **segni degli sbilanciamenti aggregati zonali** pubblicati da TERNA ([www.terna.it](http://www.terna.it)).

In ogni periodo rilevante, ossia in ogni ora, si sono adottati i seguenti prezzi (si vedano anche la 281/2012/R/EFR e la delibera n. 111/06):

- in caso di *sbilanciamento aggregato zonale positivo*, il valore *minimo* tra
  - il prezzo medio delle *offerte di acquisto accettate nel MSD* ai fini del bilanciamento in tempo reale, ponderato per le relative quantità, nel medesimo periodo rilevante, nella *macrozona* di appartenenza del punto di dispacciamento considerato;
  - il prezzo di valorizzazione delle *offerte di vendita accettate nel MGP* nel medesimo periodo rilevante nella *zona* in cui si trova il punto di dispacciamento;
- in caso di *sbilanciamento aggregato zonale negativo*, il valore *massimo* tra
  - il prezzo medio delle *offerte di vendita accettate nel MSD* ai fini del bilanciamento in tempo reale, ponderato per le relative quantità, nel medesimo periodo rilevante, nella *macrozona* di appartenenza del punto di dispacciamento considerato;
  - il prezzo di valorizzazione delle *offerte di vendita accettate nel MGP* nel medesimo periodo rilevante, nella *zona* in cui si trova il punto di dispacciamento.

## Costi e ricavi

Batteria  $P_n = 2 \text{ MW}$ ,  $E_n = 2 P_n \text{ h}$

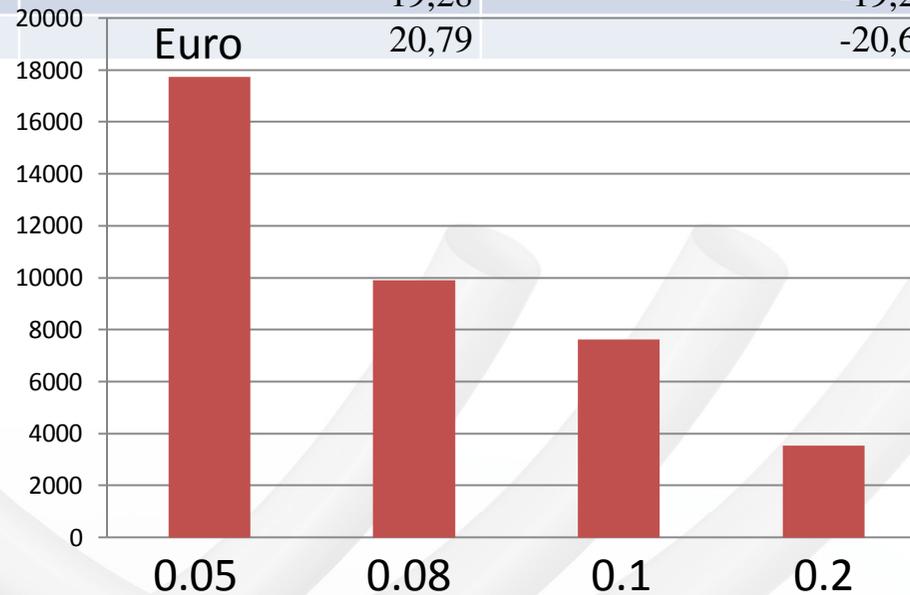
| <b>Ricavi potenziali<br/>(<math>\eta = 1</math>, SoC illimitato, potenza limitata) (+)</b> | <b>NORD</b>           | <b>SICILIA</b>         |
|--|-----------------------|------------------------|
| Richiesta di regolazione di assorbire potenza  | +2624.62 euro         | +3815.37 euro          |
| Richiesta di regolazione di erogare potenza  | +2624.62 euro         | +8265.89 euro          |
| <b>Totale</b>  | <b>+9 067.75 euro</b> | <b>+12 081.26 euro</b> |

| <b>Ricavi (+) e costi (-) effettivi<br/>(<math>\eta &lt; 1</math>, SoC limitato, potenza limitata)</b> | <b>NORD</b>                     | <b>SICILIA</b>                  |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Potenza assorbita in regolazione   | +2486.68 euro                   | +3634.23 euro                   |
| Potenza erogata in regolazione   | +6443.13 euro                   | +8265.89 euro                   |
| Potenza NON assorbita in regolazione   | Mancato guadagno di 137.94 euro | Mancato guadagno di 181.14 euro |
| Potenza NON erogata in regolazione   | Mancato guadagno di 0 euro      | Mancato guadagno di 0 euro      |
| Potenza erogata in ripristino  | +229.13 euro                    | +481.90 euro                    |
| Potenza assorbita in ripristino (ricarica)   | -1531.49 euro                   | -2179.58 euro                   |
| <b>Totale bilancio ricavi e costi</b>  | <b>+7 627.45 euro</b>           | <b>+10 202.44 euro</b>          |

## Variazione statismo: Costi e ricavi

Batteria  $P_n = 2 \text{ MW}$ ,  $E_n = 2 P_n \text{ h}$

| $\Delta f_{\text{sat}}$ (Hz) | $\Delta f_{\text{db}}$ (Hz) | Numero di cicli in carica | Numero di cicli in scarica | Bilancio totale ricavi e costi (euro) |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 0.05                         | 0.02                        | 39,67                     | -39,58                     | 17722.09                              |
| 0.08                         | 0.02                        | 23,81                     | -23,75                     | 9896.53                               |
| 0.1                          | 0.02                        | 19,28                     | -19,24                     | 7627.42                               |
| 0.2                          | 0.02                        | 20,79                     | -20,65                     | 3535.83                               |



## Osservazioni

- Grandezze rilevanti ai fini di analisi costi-benefici:
  - energia scambiata con la rete in regolazione (produzione/assorbimento)
  - energia scambiata con la rete in ripristino (produzione/assorbimento)
  - «mancata energia scambiata» per saturazione SoC
- Analisi effettuate su profili di frequenza «storici»
  - Evoluzione dell'assetto regolatorio potrebbe portare a una diversa (maggiore) disponibilità di risorse di regolazione primaria quindi diverse (minori) opportunità per le batterie
- Dipendenza dei risultati
  - dalle strategie...
  - ... dai parametri di controllo (guadagno del regolatore, SoC target)...
  - da  $P_n$ ,  $E_n/P_n$ ,  $\eta$
- Guadagni elevati di regolazione --> ricavi superiori, però...
  - eccessivi stress con riduzione della vita della batteria? Trade-off da valutare
- Valutazione «allocazione ottima» della capacità del SdA fra più servizi (es. primaria e terziaria).



***Grazie per l'attenzione***

diego.cirio@rse-web.it



## Giornata di studio

# L'ACCUMULO DELL'ENERGIA NELLA RETE DI TRASMISSIONE

*21 marzo, Firenze*

# Accumulo e Mercato

***Romano GIGLIOLI***

*Prof. Ord. Sistemi Elettrici per l'Energia*



**UNIVERSITA' DI PISA DESTEC**

# Accumulo e Mercato

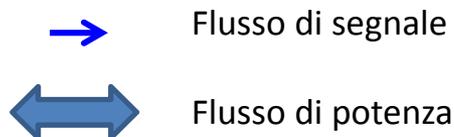
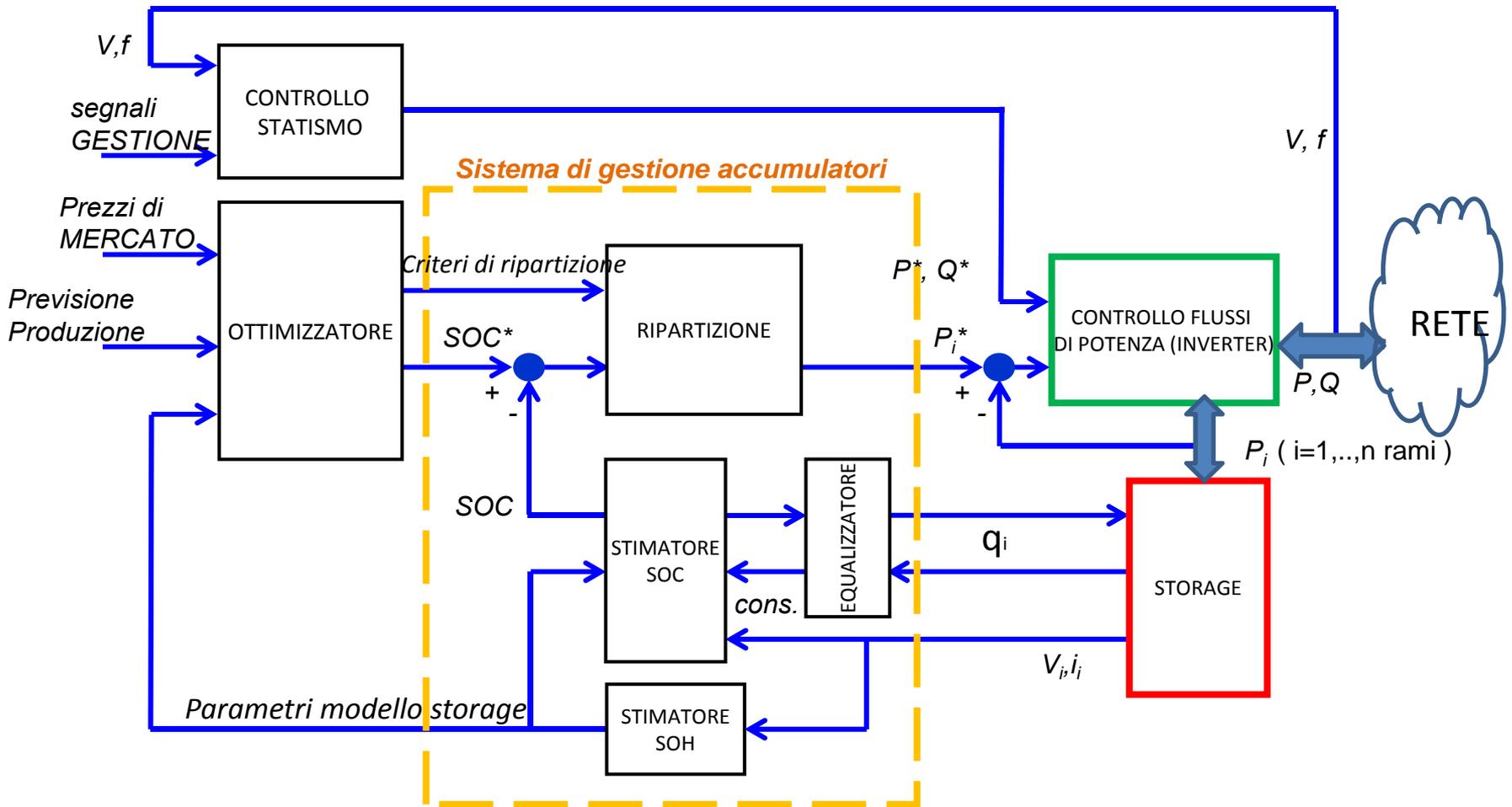
## Valorizzazione economica dei servizi

elaborazione da dati SANDIA (VAN dei benefici in 10 anni, €/kW)

| Power        |                 |                |          |             | Energy                        |              |                       |                         |                   |
|--------------|-----------------|----------------|----------|-------------|-------------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| Security     |                 |                | PQ       | access      | secu-<br>rity                 | PQ           | access<br>&<br>market |                         |                   |
| peak shaving | decongestioning | bridging power | ramp     | black start | act. Filter,<br>flicker, etc. | peak shaving | load<br>levelling     | longer<br>interruptions | load<br>levelling |
| 400          | 50              | 1000           | 600      | 180         | 350                           | 250          | 400                   | 450                     | 250               |
| ÷<br>600     | ÷<br>150        | ÷<br>1200      | ÷<br>800 | ÷<br>200    | ÷<br>800                      | ÷<br>300     | ÷<br>600              | ÷<br>400                | ÷<br>400          |

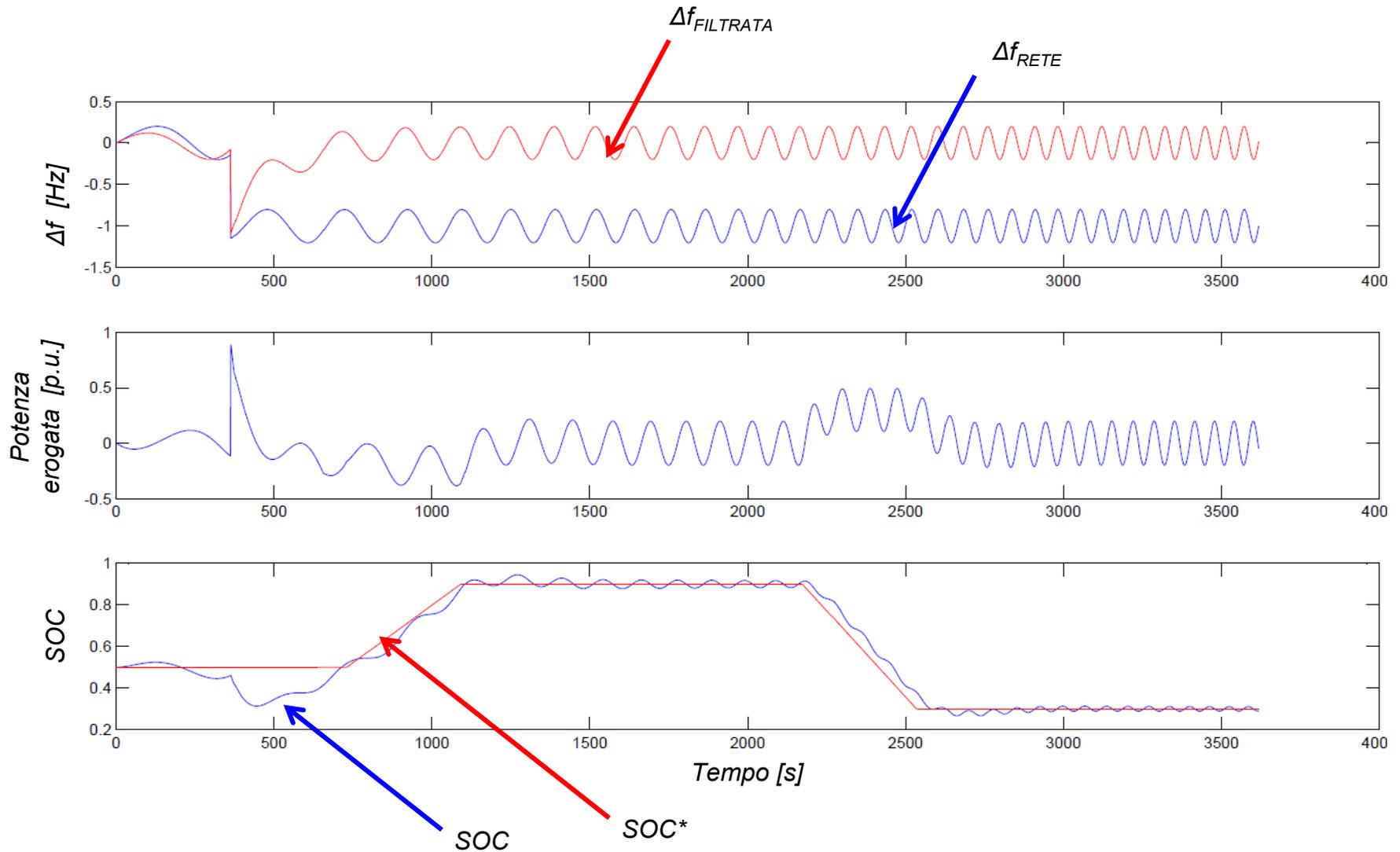
Price levelling

# Gestione sistema di accumulo elettrochimico

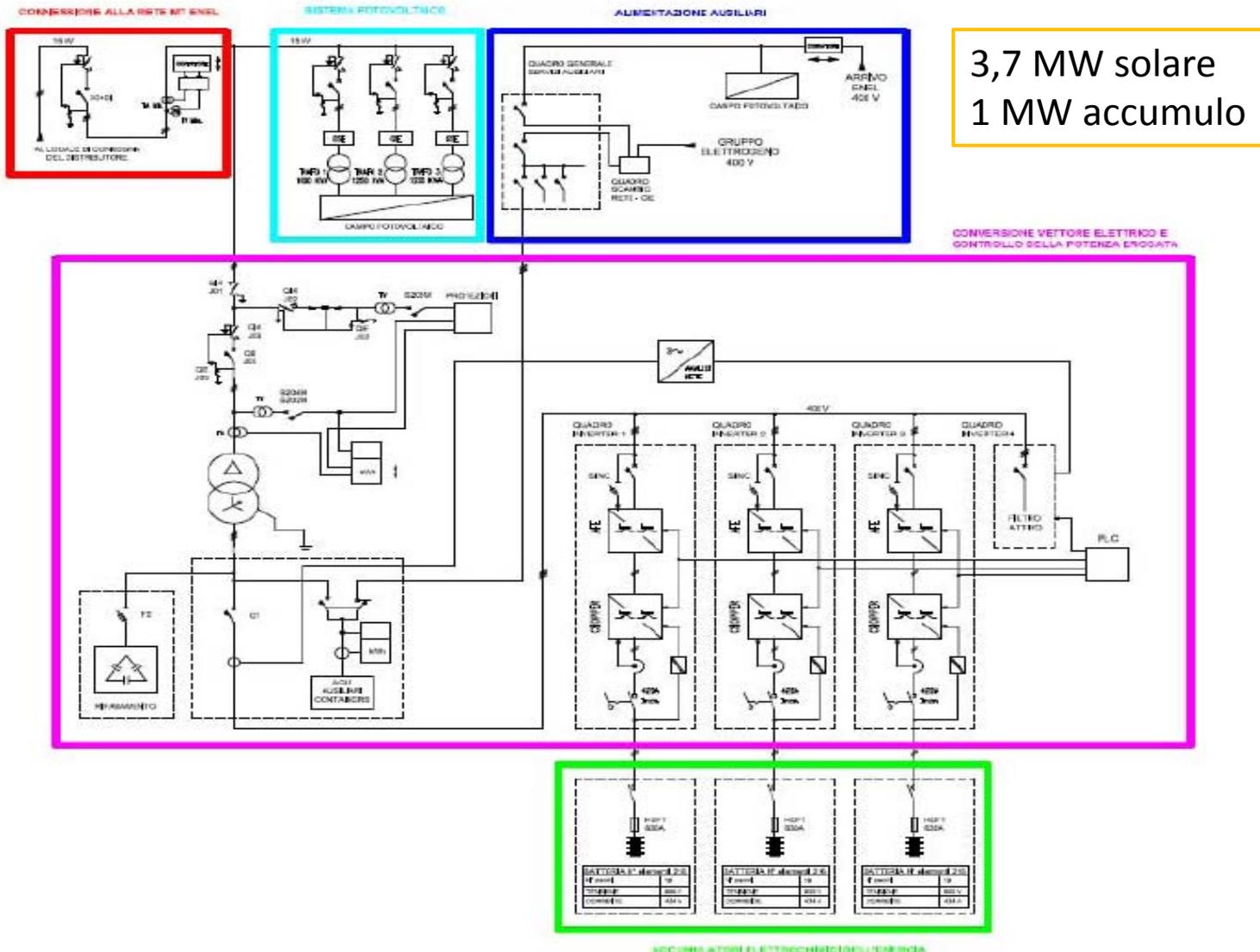


SOC stato di carica  
SOH stato di «vita»

# Esempio di risposta del sistema



# Impianto Sol Maggiore

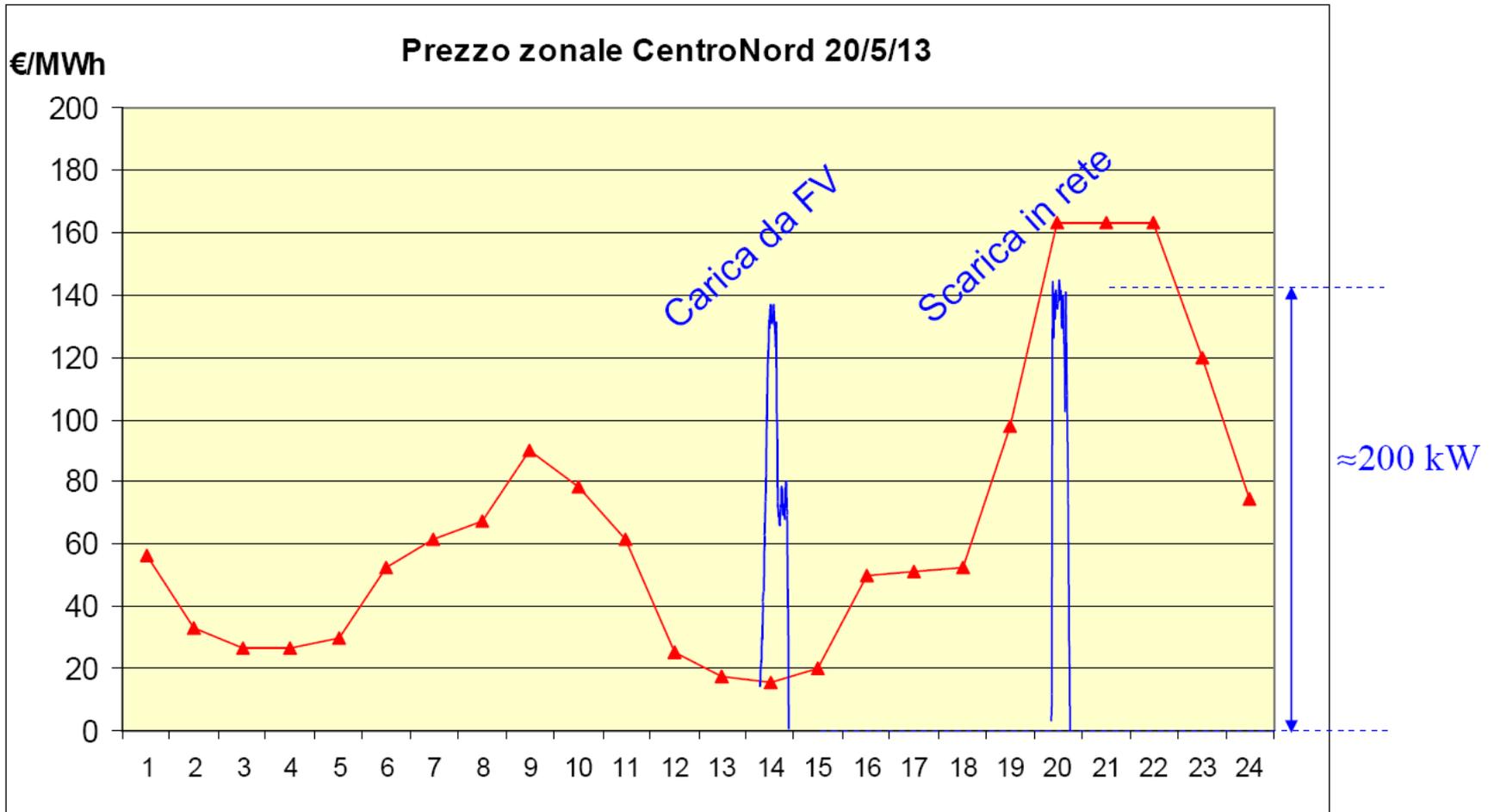


3,7 MW solare  
1 MW accumulo



Impianto realizzato con il contributo della Regione Toscana nel progetto «Smart Grid Navicelli»

# Prova sull'impianto Sol Maggiore



# Costo di accumulo

Ipotesi : costo potenza 150€/kW , vita utile 25 anni, ore equivalenti anno 500  
costo accumulatori 300€/kWh, vita utile 5000 cicli  
tasso di interesse 8%

Quota di ammortamento impianto per unità di potenza /ore equivalenti anno : 25-30 €/MWh

Quota ammortamento accumulatori per unità di energia/ numero cicli anno : 55-65 €/MWh

Costo energia persa per rendimento di «round trip» per unità di energia : 3-5 €/MWh

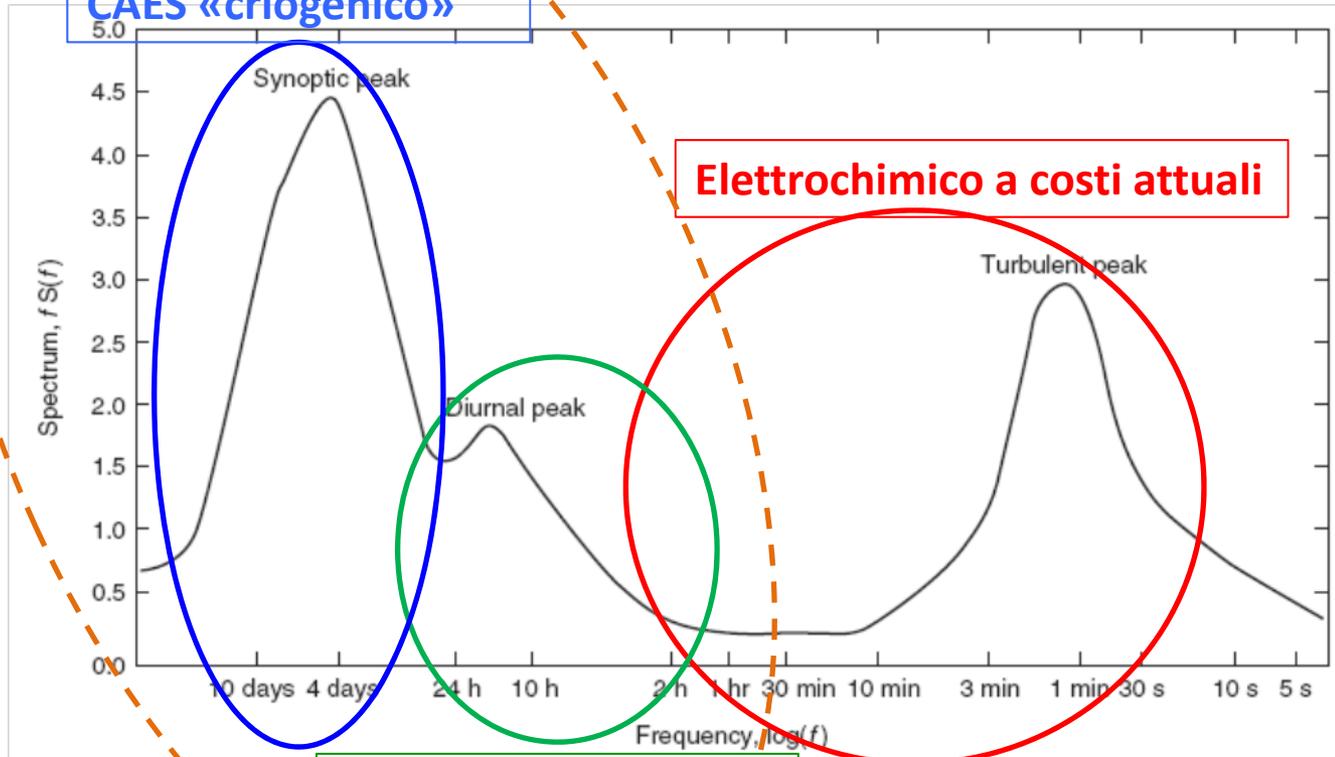
Costo di accumulo : **80-100 €/MWh**

Stime di medio termine ( 5 anni) il costo accumulatori scenderà a 100€/kWh (7-10 kcicli)

Costo accumulo : **25-30€/kWh**

# Quali tecnologie

Idraulico a serbatoio  
CAES «criogenico»



Elettrochimico a costi attuali

Elettrochimico a costi  
di medio termine

Possibilità di **market parity** per le rinnovabili variabili aleatorie

# Impianto fotovoltaico «Sol Maggiore» di Toscana Energia Gree

Sistema di compensazione  
con accumulo elettrochimico

**GRAZIE DELL'ATTENZIONE**





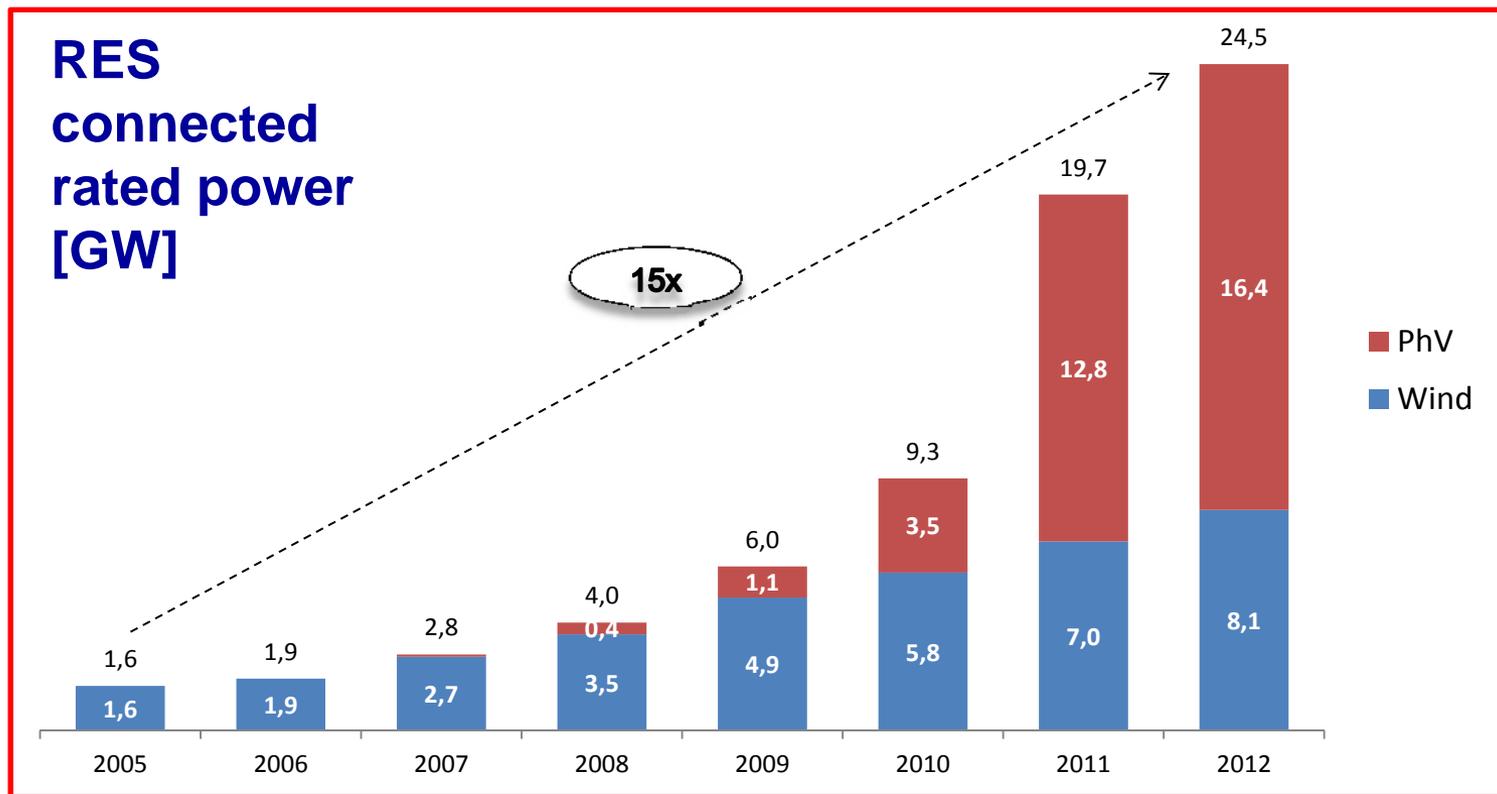
# Pilot projects for storage: the regulatory framework

**Luca Lo Schiavo**

AEEGSI, Italian Regulatory Authority  
for Electricity, Gas and Water system  
Infrastructure Division of the Regulation Department

AEIT, Firenze, 21 marzo 2014

# RENEWABLES HIGH PENETRATION: The challenge for the Italian power system

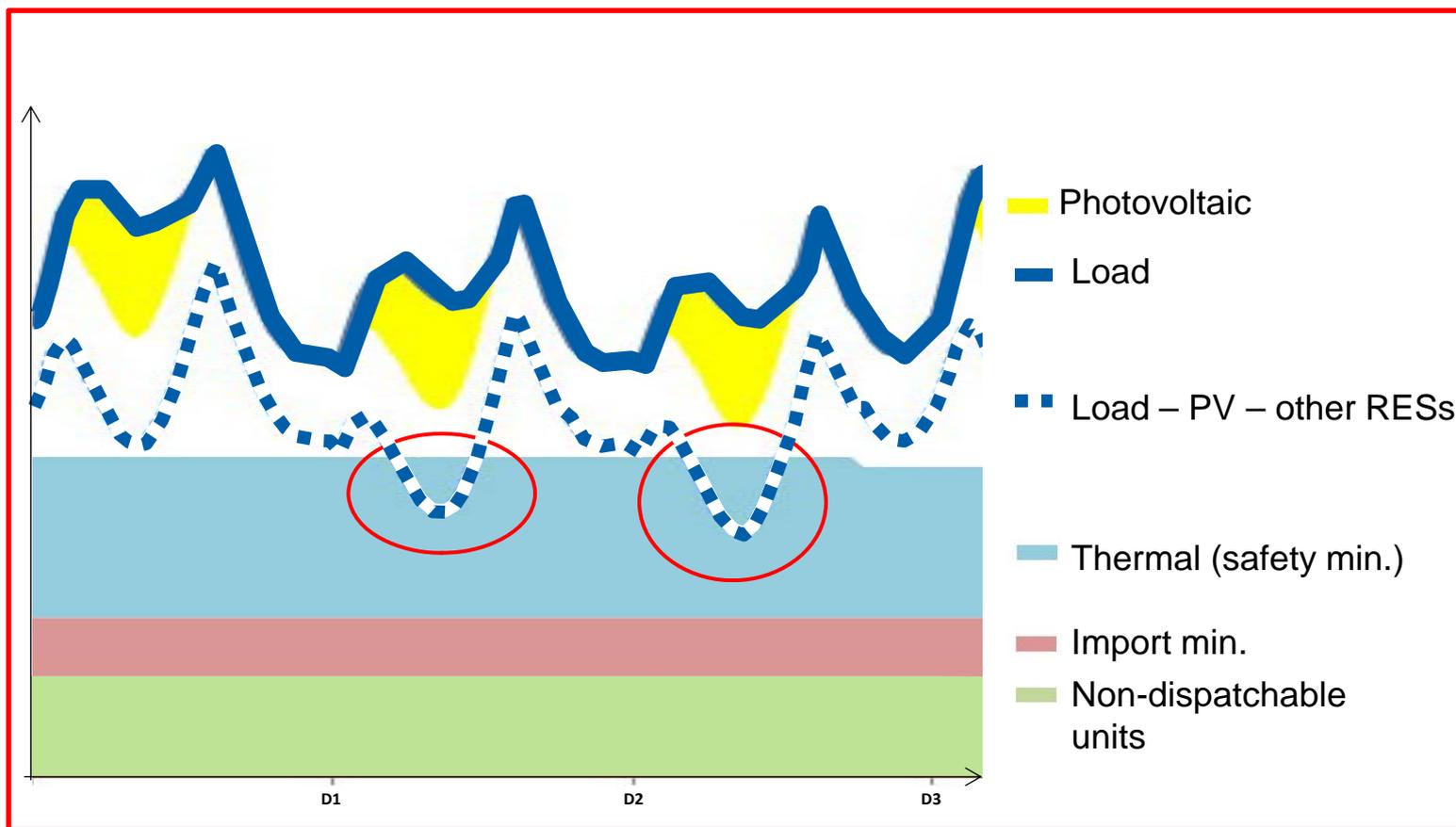


Italian Power System:

51 GW (peak), 22 GW (valley), 35 Mill.users, 330 TWh/y

# THE ENERGY TRANSITION: ITALY

## Effect of RES penetration on security

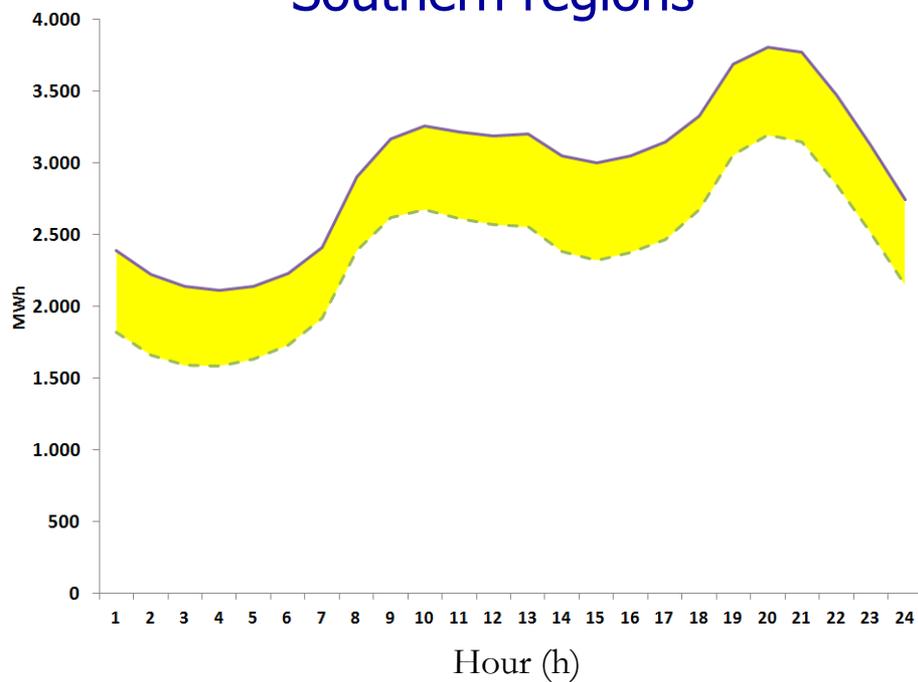


Risk of RES curtailment in **Sunny Summer Sundays!**  
*Defending the system to avoid further risk on load*

# IMPACT OF HIGH RES PENETRATION

## Modification of hourly residual load (1/2)

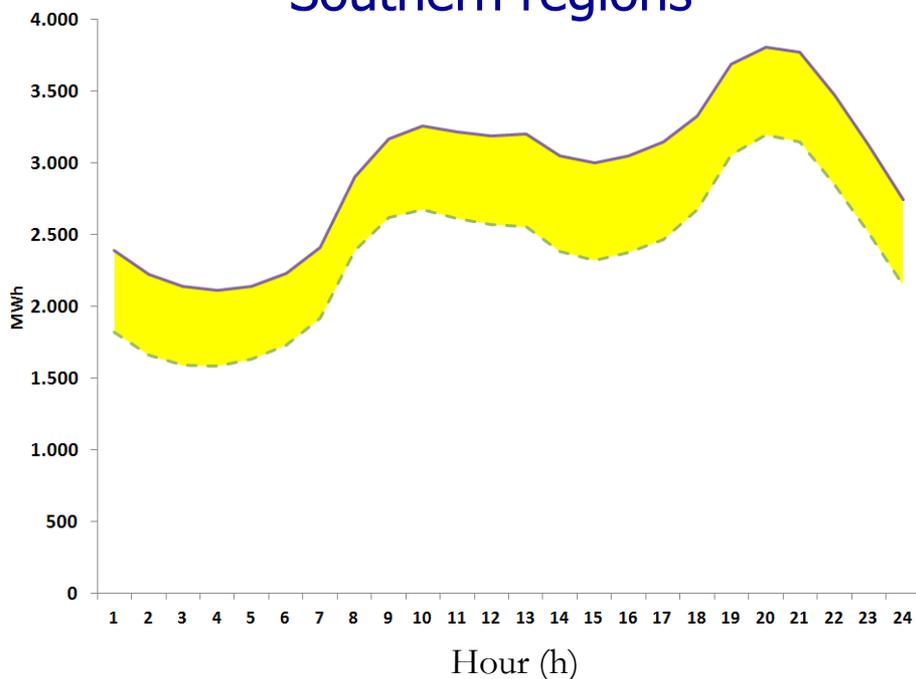
March 2010 – working days,  
Southern regions



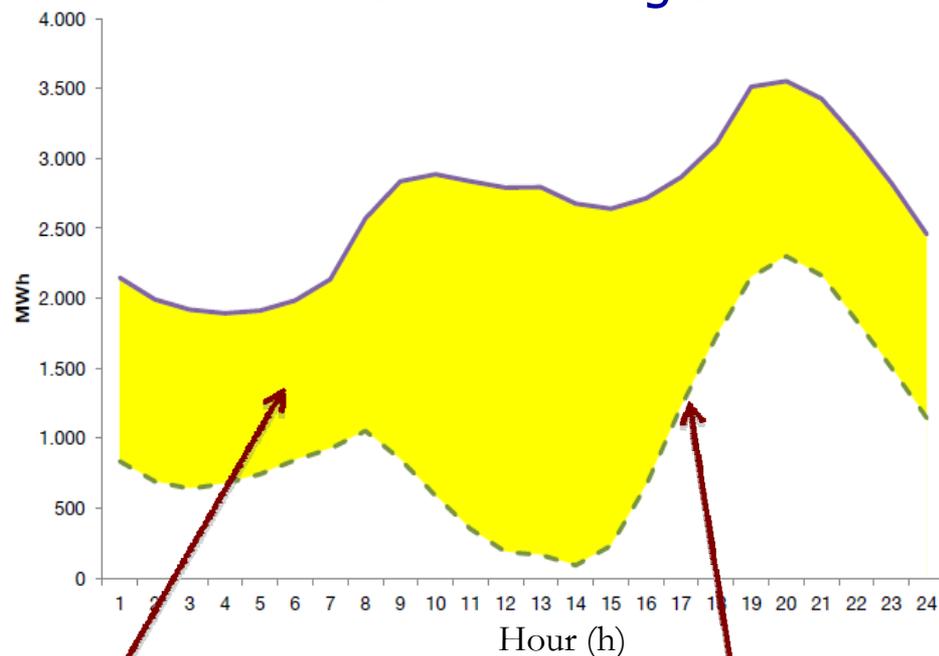
# IMPACT OF HIGH RES PENETRATION

## Modification of hourly residual load (1/2)

March 2010 – working days,  
Southern regions



March 2013 – working days,  
Southern regions



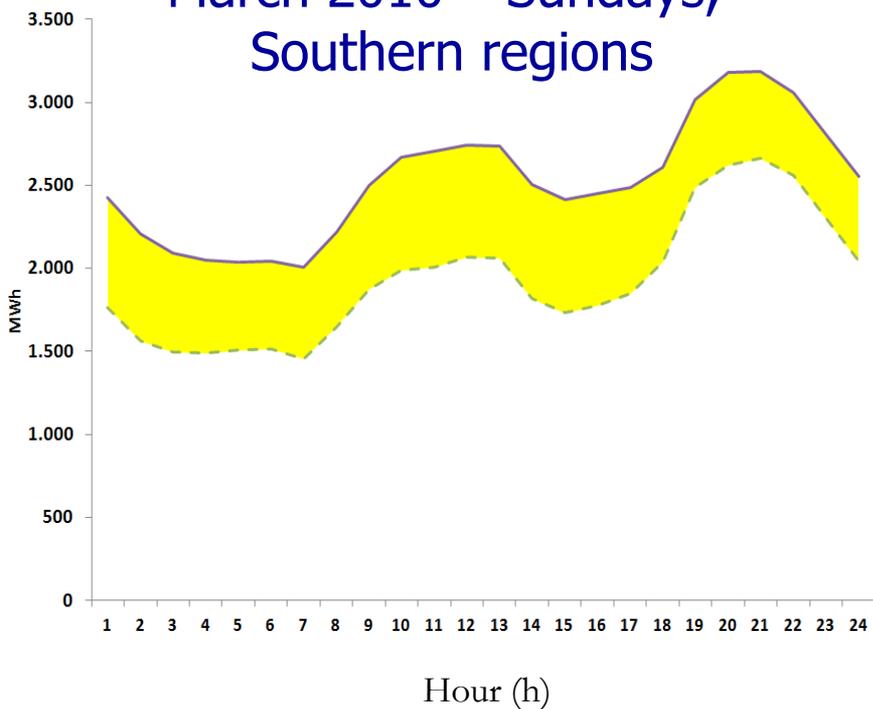
Load covered by  
wind and PV

Higher ramps  
in the evening

# IMPACT OF HIGH RES PENETRATION

## Modification of hourly residual load (2/2)

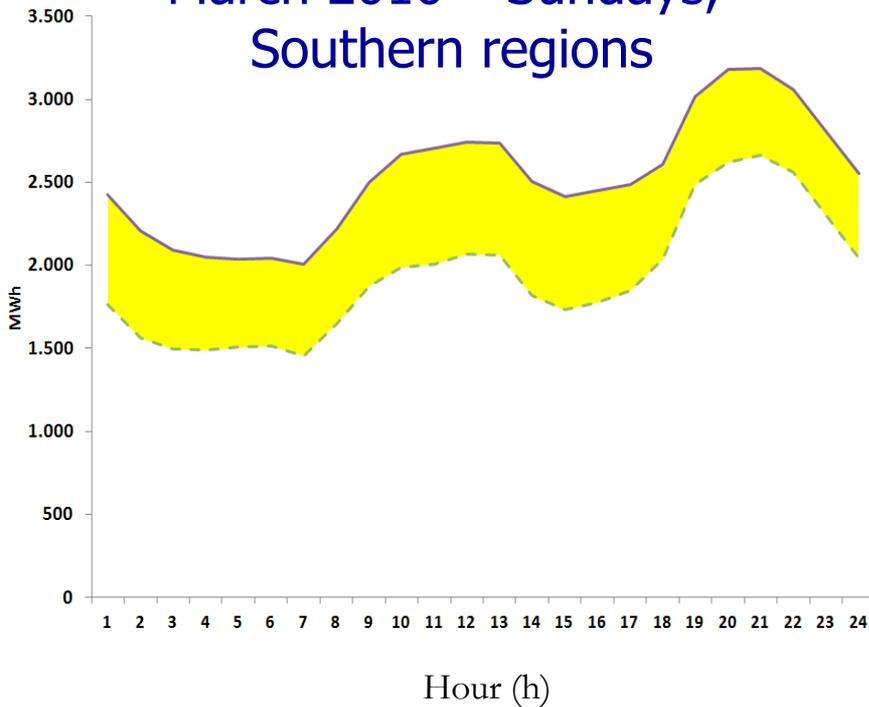
March 2010 – Sundays,  
Southern regions



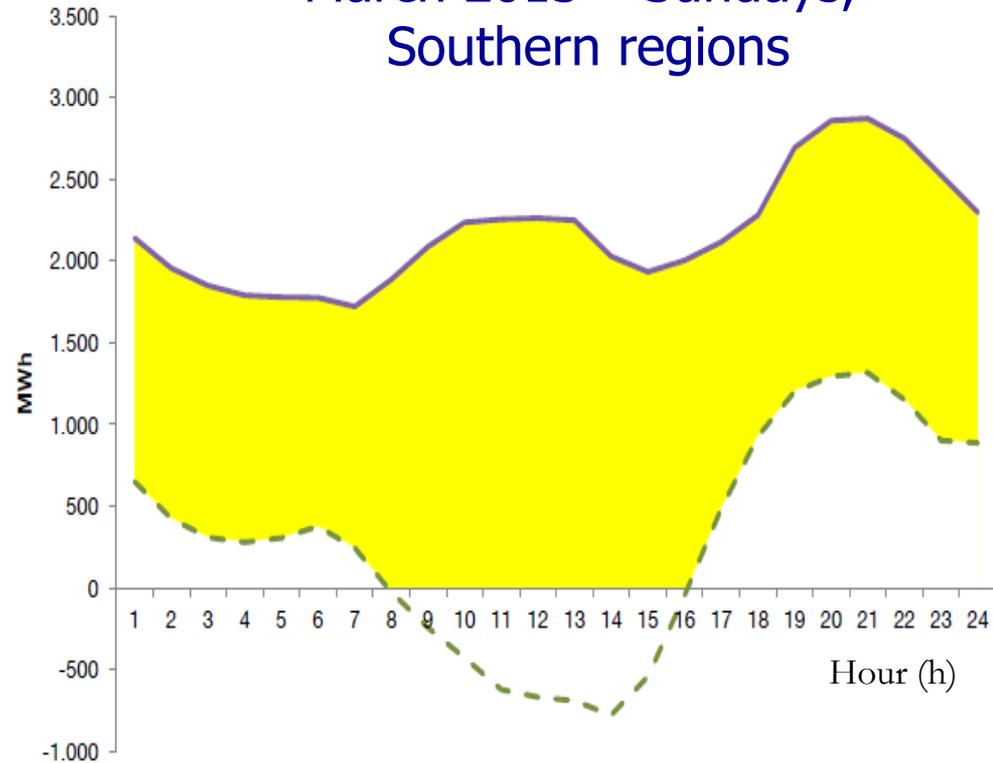
# IMPACT OF HIGH RES PENETRATION

## Modification of hourly residual load (2/2)

March 2010 – Sundays,  
Southern regions



March 2013 – Sundays,  
Southern regions

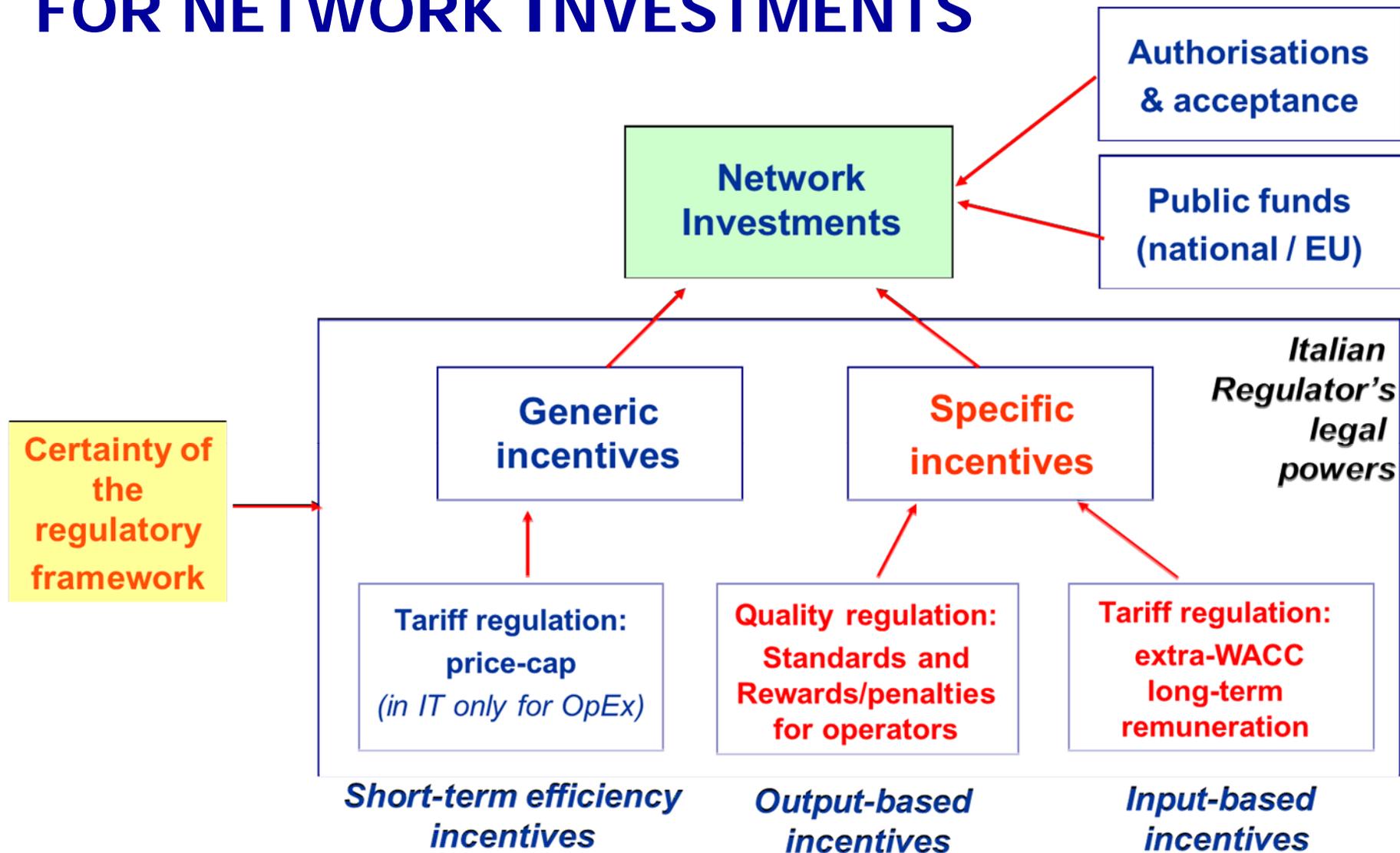


# EREGG SMART GRIDS POSITION PAPER

## Final recommendations (2010)

- *Ensure* stable regulatory framework and long-term return on Investments
  - *Decouple* profits and volume for grid operators
  - *Introduce* output regulation: value for money of users
  - *Improve* consumer awareness for energy use and market opportunities
  - *Incentivise* innovative solutions (demonstration)
- *Perform* societal cost-benefit assessment
  - *Disseminate* the results and lessons learned from the demonstration projects
  - *Adopt* open protocols and standards for interoperability
  - *Distinguish* grid- vs market-related activities
  - *Learn* from best regulatory practices

# THE REGULATORY FRAMEWORK FOR NETWORK INVESTMENTS



# PILOT PROJECTS FOR INNOVATION

## A synthesis of Italian regulatory experience

### OUTPUT-BASED

- *e.g.* Quality of Supply
- **Reliable and fair metrics:**  
key outcome indicators that must be cleansed from out-of-control effects; authoritative and enforceable guidance for data recording and auditing
- **Baseline**  
(natural improvement trend): output based incentive should be related only to additional improvements on top of natural improvement trend (historically observable)
- **Output valuation**  
value of outcome should be assessed taking into consideration both customers view and societal welfare (CEER 2011 report compares VoLL values)

### INPUT-BASED

- *e.g.* Innovation
- **Metrics not yet fully available**  
however, regulator's need for simple cost/benefit ratios, in order to avoid "lengthy proceedings" (differently from US)
- **Demonstration projects**  
"real networks, real voltages, real currents, real bills"; **selection indexes** for identifying critical network areas
- **Incentive as extra-WACC**  
+2% for 12 years on top of ordinary WACC
- **Learning process**  
evaluation and selection process, monitoring performance and dissemination of results; evolution in output-based regulation

## Critical issues... (1/2)

The notable and almost exponential growth of the contribution to electric generation from renewable sources, and in particular from wind and photovoltaic (most of which connected to DSO), has induced technical and economical criticalities in the system.

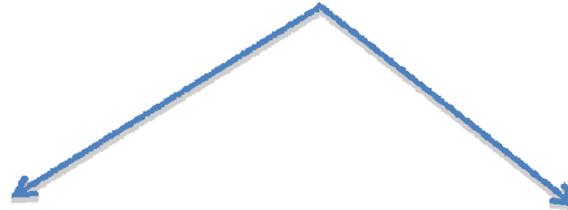
The Regulator is defining new rules concerning dispatching, as well as promoting new grid infrastructures, in order to promote the **integration of RES, exploiting their potential as well as ensuring the security** of the national electricity system.



**Energy Storage Systems (ESS)** could represent a feasible solution for the reduction of such criticalities

## Critical issues... (2/2)

Some criticalities



Modification of the  
residual load profile for  
hourly zonal loads



**Higher ramps**  
during the day, to be  
covered by thermo and big  
hydro power plants

Aleatory and partial  
"invisibility" of wind and  
PV power plants



Increasing need for  
**reserve margins** because  
Terna doesn't know the profile  
of injection from PV and wind  
to the grid

## NP-RES integration in the grid

- In some areas (as Southern Italy) the grid is not able to accept all the NP-RES generation (470 GWh of “**curtailed energy from wind**” in 2010, progressively decreased until 2012, again increasing in 2013)
- The “curtailed energy from wind” must be replaced by conventional production (and payed to the curtailed generators too)
- Grid reinforcement: medium-long time scale
- In the short-time: well scaled and located ESS could be a choice

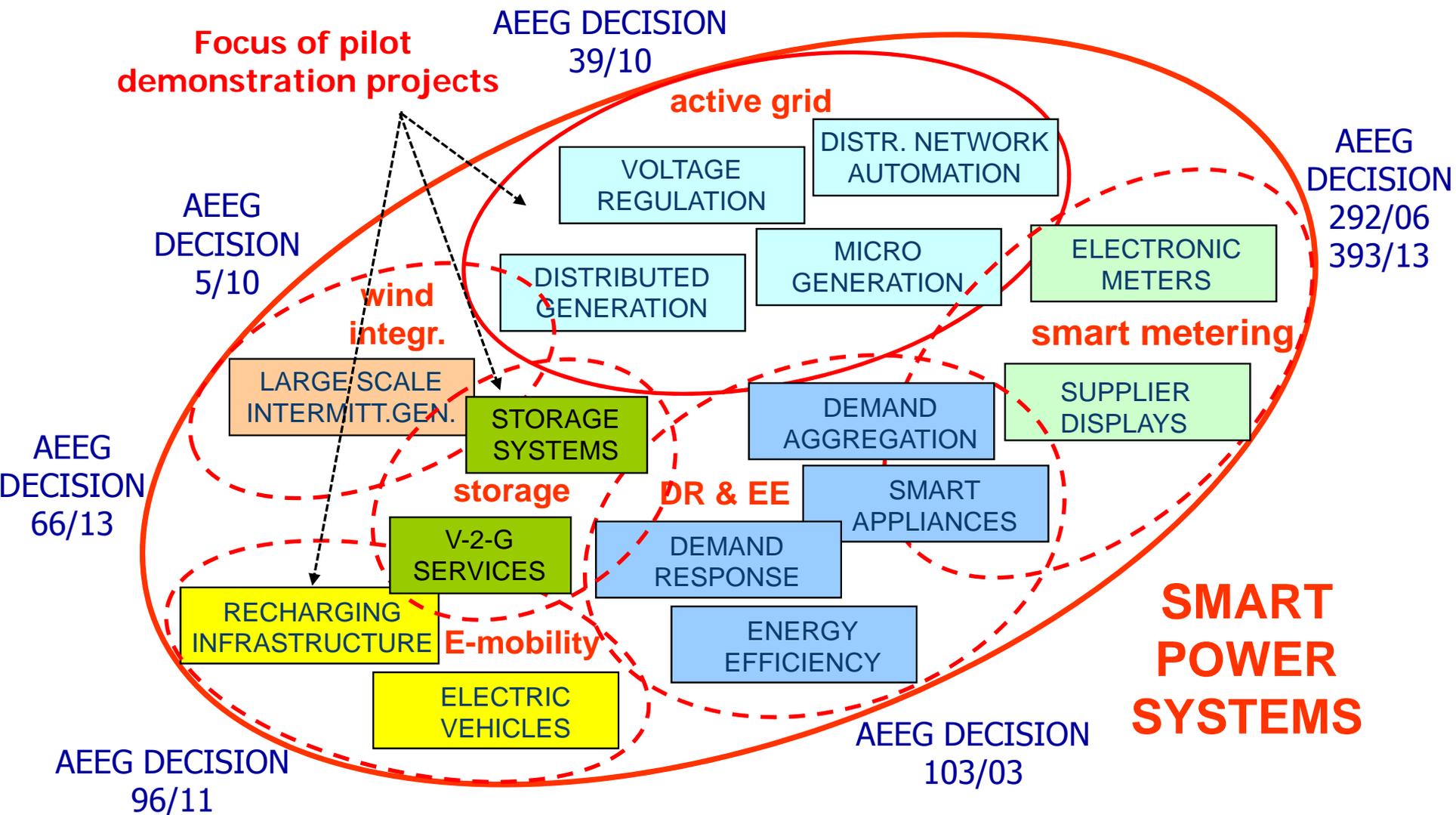
# REGULATION AND INNOVATION

## The demonstration projects approach

- Demonstration pilot: real operations in real grid (no lab)
- Regulatory attention to both effectiveness (performance) and efficiency (cost): pilots are paid by all customers....
- Transparency of the rules: procedures, evaluation methods and criteria, etc., known ex-ante
- With the involvement and the support of the best expertise (Research Institutes and University)
- Continuous monitoring (in the medium and long term: efficacy during the systems' life-time)
- Replicability of the best-practice
- Output disclosure: because demonstrations are paid by all customers => results must be public



# DEMONSTRATION PROJECTS



# KEY FEATURES OF STORAGE SYSTEMS DEMONSTRATION PROJECTS

## Minimum requirements

1. well-identified **portion of the national transmission grid** subject to RESs penetration with **temporary criticalities**
2. portion of grid must be equipped with control systems assessing the maximum network transit limits as a function of external conditions (**dynamic thermal rating**);
3. to **reduce the curtailments** on RESs production during standard operation (meshed network), due to congestions, for at least 150 charge/discharge cycles / year;
4. to **manage the reactive power flows** on the grid (for voltage regulation along transmission lines in the network portion)
5. to **provide primary frequency regulation** on a control band equal to 5% of their rated power for at least 15 min
6. costs for the ESS transfer to other sites lower than 15% of the project cost

# ENERGY STORAGE SYSTEMS (ESSs) DEMONSTRATION PROJECTS

The ranking of proposed projects is defined according to a Merit Indicator (IM):

$$IM = RBC \cdot (1 + 0,5 \cdot Q_{tec} + 0,5 \cdot Q_{opz})$$

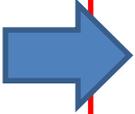
Where:

- RBC is the benefits/costs ratio of the project, defined as

$$RBC = \frac{\text{Energy saving}}{\text{costs of investments}}$$

- $Q_{tec}$  is the contribute of the technical requirements (between 0 and 1);
- $Q_{opz}$  is the contribute of the opzional requirements (between 0 and 1).

# ENERGY STORAGE SYSTEMS (ESSs) DEMONSTRATION PROJECTS

Ratio benefit /cost 

$$RBC = \frac{\text{Avoided energy curtailments to RESs in the area} \times Q_{\text{rid-MPFR}} * \eta * P_{\text{En}}}{\text{Total project costs (OPEX+CAPEX) (actualised costs)}}$$

Charge/discharge efficiency

Price of energy

# ENERGY STORAGE SYSTEMS (ESSs) DEMONSTRATION PROJECTS

The benefit/cost ratio is integrated with two factors that take into account feasibility and quality of proposal and further optional factors:

$$Q_{tec} = \frac{\sum_{i=1}^3 k_{tec-i} \cdot c_{tec-i}}{\sum_{i=1}^3 k_{tec-i}}$$

$$Q_{opz} = \frac{\sum_{i=1}^5 k_{opz-i} \cdot c_{opz-i}}{\sum_{i=1}^5 k_{opz-i}}$$

| Requirement   | Weight coeff. |
|---|---------------|
| Implementation timing of the project  | 1             |
| Availability of documented experimentations in operation for the ESSs technologies proposed | 1             |
| Quality and coherence of the proposal   | 3             |

| Requirement   | Weight coeff. |
|---|---------------|
| Project involving more ESSs operating independently and installed on different buses                      | 2             |
| Project composed by more ESSs with different technologies   | 2             |
| Availability of a system for the <b>forecasting of RESs production</b> on the portion of critical network | 4             |
| Project equipped with a system for the <b>forecasting, measurement and collection of weather data</b>     | 1             |
| ESSs <b>able to regulate frequency</b> on a control band equal to their rated power                       | 2             |

# ENERGY STORAGE SYSTEMS (ESSs) DEMONSTRATION PROJECTS

Final ranking of projects proposed by TSO Terna:

| Project | HV section                 | Size           | Freq. control    | RES forecast | IM   | RBC  | Q <sub>tec</sub> | Q <sub>opz</sub> |
|---------|----------------------------|----------------|------------------|--------------|------|------|------------------|------------------|
| A1      | Campobasso - Benevento 2 - | 6 MW<br>40 MWh | Yes              | Yes          | 0,35 | 0,22 | 0,50             | 0,64             |
| A2      | Volturara - Celle San Vito |                | Yes              | Yes          | 0,35 | 0,22 | 0,50             | 0,64             |
| B1      | Benevento 2 - Bisaccia 380 |                | Yes              | Yes          | 0,32 | 0,21 | 0,50             | 0,64             |
| B2      |                            |                | Yes              | Yes          | 0,32 | 0,21 | 0,50             | 0,64             |
| C1      |                            |                | Yes              | Yes          | 0,31 | 0,20 | 0,50             | 0,64             |
| C2      |                            |                | 4.8 MW<br>32 MWh | Yes          | Yes  | 0,29 | 0,18             | 0,50             |

Two further projects have been approved for power-intensive storage in Sardinia and in Sicily (8 MW each, with very fast control performance)



*Please visit:*

**[www.autorita.energia.it](http://www.autorita.energia.it)**  
**[www.energy-regulators.eu](http://www.energy-regulators.eu)**

**Suggested reading on the Italian case**

*CHANGING THE REGULATION FOR REGULATING THE CHANGE*

*Innovation-driven regulatory developments in Italy*

**ICER Distinguished regulatory scholar Award 2012**

[http://www.iern.net/portal/page/portal/IERN\\_HOME/ICER\\_HOME/ABOUT\\_ICER/Distinguished\\_Scholar\\_Award\\_2012](http://www.iern.net/portal/page/portal/IERN_HOME/ICER_HOME/ABOUT_ICER/Distinguished_Scholar_Award_2012)

*Thank you for your attention*  
**[lloschiavo@autorita.energia.it](mailto:lloschiavo@autorita.energia.it)**



# **Il ruolo chiave degli impianti di pompaggio nel sistema elettrico Italiano**

*Luigi Michi*

GIORNATA DI STUDIO SULL'ACCUMULO DELL'ENERGIA  
Enel Produzione SpA

Firenze, 21 Marzo 2014



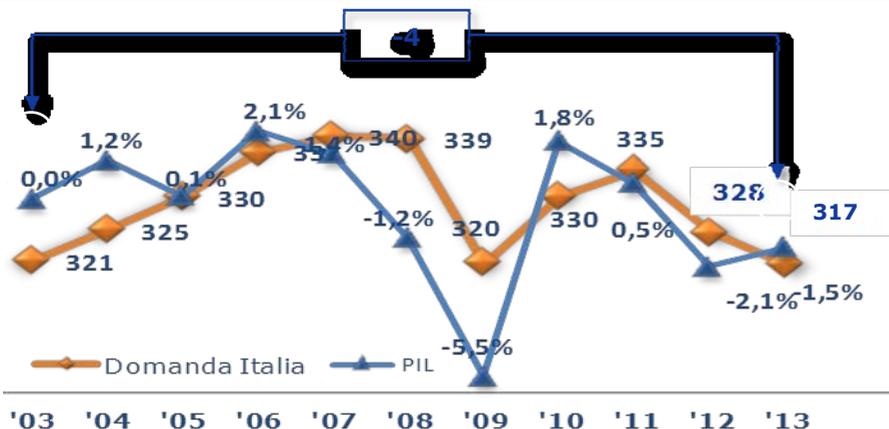
# Agenda



- **Evoluzione contesto**
- **Requisiti di Gestione di un sistema elettrico e servizi ancillari**
- **Comparazione efficacia dei diversi sistemi di accumulo**
- **Impianti di pompaggio: il parco Enel**
- **Modalità di gestione degli impianti e relativi drivers**
- **Il pompaggio come fattore abilitante per l'integrazione delle fonti rinnovabili**
- **Sviluppi di Rete necessari per un più efficace utilizzo degli impianti**

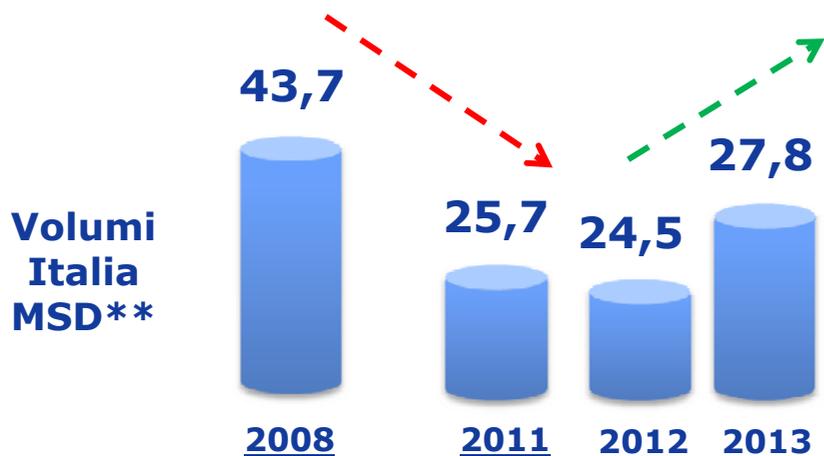
# Evoluzione contesto

## Domanda [TWh] vs PIL

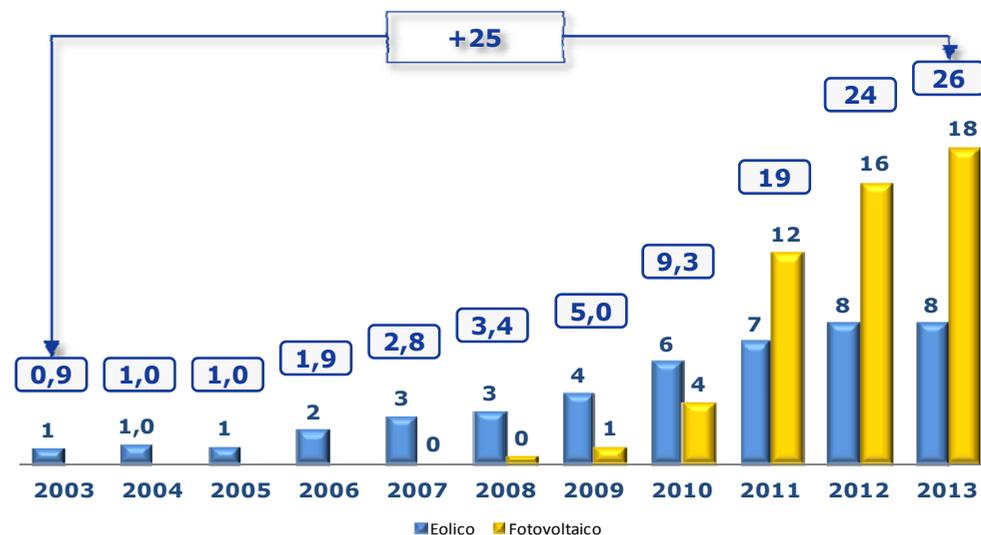


\* PIL '11: consuntivo Gen-Dic'11; PIL '12-13 stima Enel

## Richiesta di servizi [TWh]



## Evoluzione capacità installata FRNP\* [GW]



- Sistema elettrico caratterizzato da significativa **overcapacity e forte penetrazione FRNP**
- Generazione intermittente obbliga sistema ad un maggiore utilizzo di risorse flessibili
- Impianti di pompaggio risorsa ideale per la gestione in sicurezza del sistema elettrico e fattore abilitante per le FRNP

\* Fonti rinnovabili non programmabili  
 \*\* Mercato Servizi di Dispacciamento

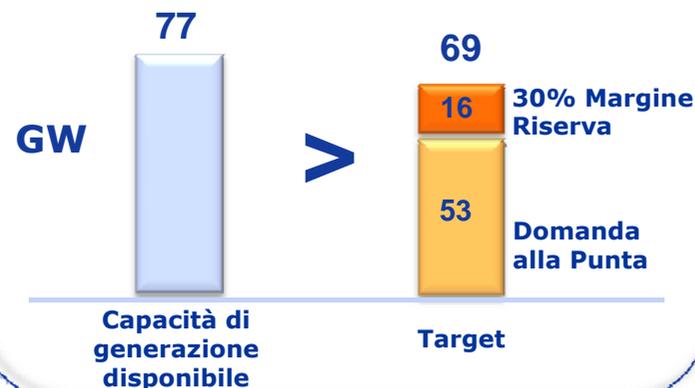
# Requisiti di Gestione di un Sistema Elettrico di Potenza

## Adeguatezza, Sicurezza e Qualità

L'esercizio di un Sistema Elettrico di Potenza deve essere Affidabile, cioè Adeguatezza e Sicuro

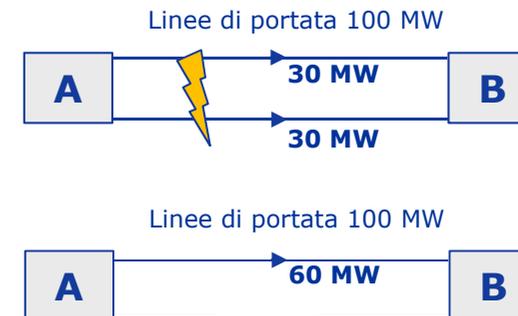
### Adeguatezza

Risorse sufficienti a soddisfare il carico atteso più un prefissato margine di riserva



### Sicurezza

Resistere a mutamenti o perturbazioni senza che si verifichino violazioni dei limiti di funzionamento del sistema stesso



### Qualità

In ogni istante l'energia elettrica possiede specifiche caratteristiche (tensione, frequenza, forma d'onda, componenti di sequenza etc..) che ne garantiscono la qualità e conseguentemente il corretto funzionamento di tutte le apparecchiature connesse

Frequenza : 50 Hz  
Tensione: 220 V



Per garantire un funzionamento Adeguatezza, Sicuro e di Qualità, necessario fare ricorso ai Servizi di Dispacciamento

# I Servizi di Dispacciamento

## Chi li fornisce

 Grado di fornitura e livello di prestazioni

€ Servizio remunerato

*Servizi*

*Termo Tradizionale CCGT Pompaggi FRNP*

### Regolazione della frequenza

- 1. Primaria €
- 2. Secondaria €
- 3. Terziaria (bilanciamento) €

### Regolazione della tensione

- 1. Locale (primaria)
- 2. Remoto (secondaria)

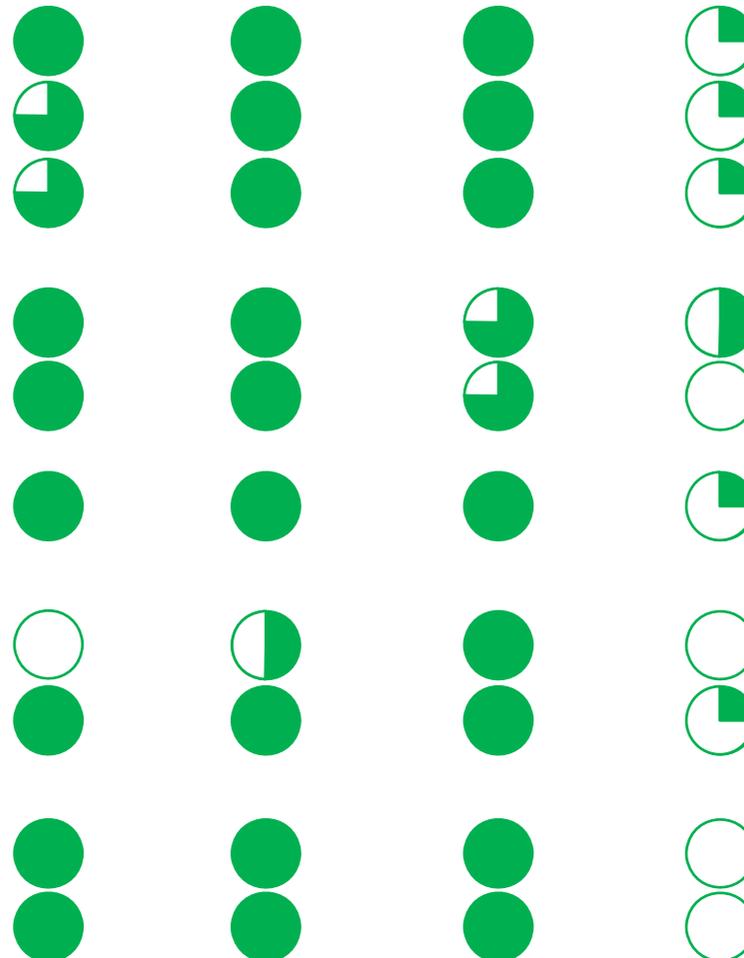
### Risoluzioni di congestioni/teledistacco €

### Riaccensione

- Blackstart
- Load rejection

### Altri contributi

- Potenza di ctocto
- Inerzia sistema



- ✓ Prestazioni elevate: CCGT (>30 MW/min) e pompaggi (500 MW/min)
- ✓ Eolico e FV possono fornire servizio a scendere; servizio a salire solo con installazione di opportuni convertitori
- ✓ Normativa attuale rende conveniente solo servizio a scendere dell'eolico

- ✓ Generatori sincroni forniscono servizio locale e da remoto; pompaggi con possibilità di funzionamento da compensatori
- ✓ Regolazione locale da eolico solo con nuovi sistemi di connessione

- ✓ Fondamentali termo e pompaggio situati in punti nevralgici della rete
- ✓ Eolico e FV forniscono servizio parziale solo se telecontrollati e solo "a scendere"

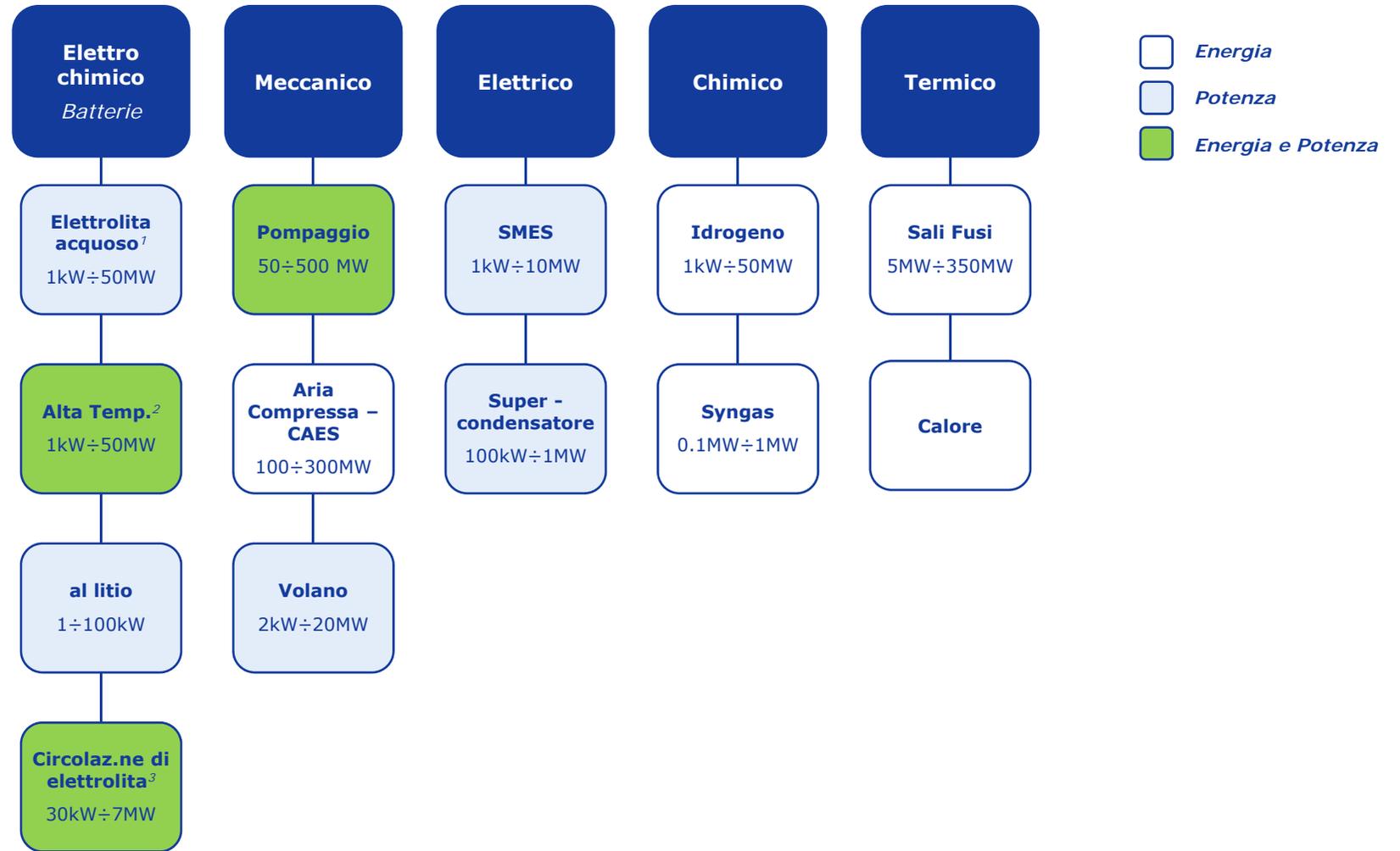
- ✓ Impianti idro o TG con capacità di sostenere reti in isola e carichi zavorra (Eolico, FV e termo tradizionale non in grado)
- ✓ Potenzialmente tutti impianti in grado

Servizi tipici da macchine rotanti dotate di grandi masse che offrono:

- ✓ stabilità nei transitori di tensione (Pcc) e di frequenza (Inerzia)
- ✓ qualità della forma d'onda (armoniche) della fornitura di energia elettrica

# Sistemi di accumulo

## Classificazione



(1) NiCd (Nichel Cadmio), Pb-acid (Piombo acido)  
 (2) NaS (Sodio-Zolfo), NaNiCl Zebra (Sodio Cloruro Nichel)  
 (3) VRB (Redox-Vendadio), VRB (circolazione di elettrolita al Vanadio)  
 (4) SMES (Superconductive Magnetic Energy Storage)

# Sistemi di accumulo

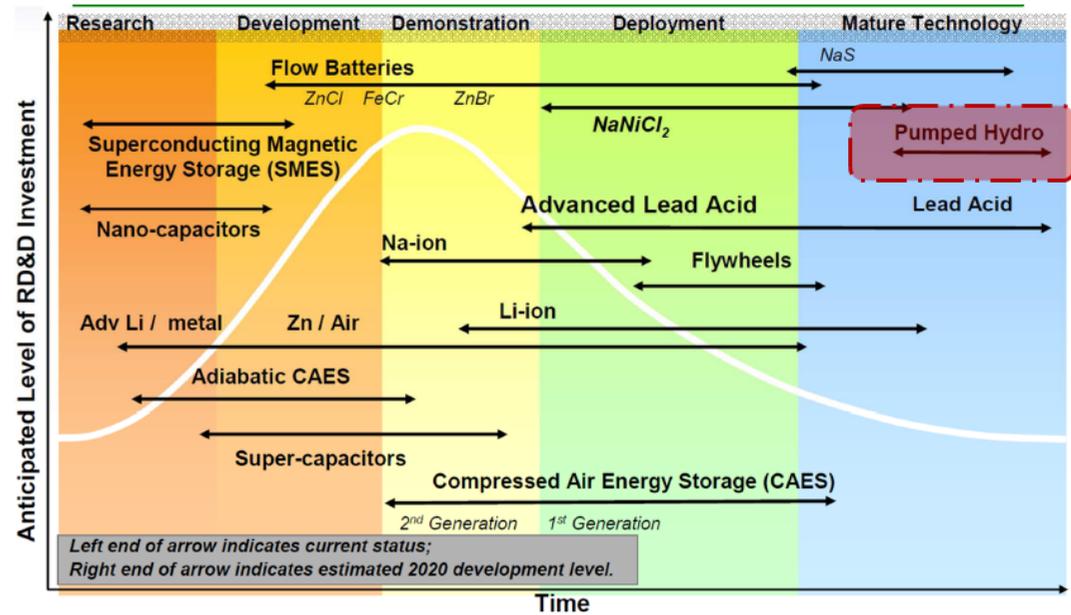
## Confronto (servizi erogabili e maturità tecnologica)

### Adeguatezza per i diversi servizi

| APPLICAZIONE                                   | Idro | CAES | Na/S | Na/NiCl | Li/ion | Ni/Cd | Ni/MH | Pb/acido | Redox | Volani | SC |
|--|------|------|------|---------|--------|-------|-------|----------|-------|--------|----|
| Time-shift                                     | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Integrazione rinnovabili (Profilo prevedibile) | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Differimento investimenti rete                 | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Regolazione primaria                           | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Regolazione secondaria                         | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Regolazione terziaria (Riserva pronta)         | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Riaccensione sistema elettrico                 | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Supporto di tensione                           | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |
| Qualità del servizio (power quality)           | ●    | ●    | ●    | ●       | ●      | ●     | ●     | ●        | ●     | ●      | ●  |

● Sistema adatto all'applicazione    
 ● Sistema meno adatto degli altri all'applicazione    
 ● Sistema non adatto all'applicazione

### Livello di maturità tecnologica



- Pompaggio come tecnologia di storage caratterizzato da:
  - ❑ **fornitura simultanea di servizi di flessibilità**
  - ❑ **ampio spettro di erogazione sia in potenza che in energia**
- Impianti di pompaggio già disponibili **senza ulteriori investimenti per il sistema**



# Impianti di pompaggio: il parco Enel



## Caratteristiche Tecniche

| Zona   | Nome              | Liv. Tensione | N Gruppi | Pomp MW | Gener MW |
|--------|-------------------|---------------|----------|---------|----------|
| Nord   | Campomoro         | 220 KV        | 1(1)     | -34     | 36,5     |
| Nord   | Edolo             | 380 KV        | 8(8)     | -965    | 950      |
| Nord   | Entracque Chiotas | 380 KV        | 8(8)     | -1257   | 1064     |
| Nord   | Entracque Rovina  | 380 KV        | 1(1)     | -125    | 125      |
| Nord   | Fadalto           | 220 KV        | 2(2)     | -152    | 210      |
| Nord   | Gargnano          | 220 KV        | 2(2)     | -137    | 137,2    |
| Nord   | Pracomune         | 220 KV        | 1(1)     | -42     | 35       |
| Nord   | Riva del Garda    | 132 KV        | 2(1)     | -47,5   | 117      |
| Nord   | Roncovalgrande    | 380 KV        | 8(7)     | -850    | 1000     |
| Nord   | S.Massenza        | 220 KV        | 7(2)     | -57     | 377      |
| Nord   | San Fiorano       | 380 KV        | 2(4)     | -215    | 568      |
| C-Nord | Bargi             | 380 KV        | 2(2)     | -293    | 281      |
| C-Sud  | Capriati          | 220 KV        | 2(2)     | -110    | 113      |
| C-Sud  | Presenzano        | 380 KV        | 4(4)     | -985    | 1000     |
| C-Sud  | Provvidenza       | 220 KV        | 3(3)     | -168    | 139      |
| C-Sud  | San Giacomo       | 220 KV        | 5(1)     | -61     | 490      |
| Sard   | Taloro            | 220 KV        | 3(3)     | -242    | 240      |
| Sici   | Anapo             | 220 KV        | 4(4)     | -587    | 500      |
| Sici   | Guadalami         | 150 KV        | 3(2)     | -58     | 80       |

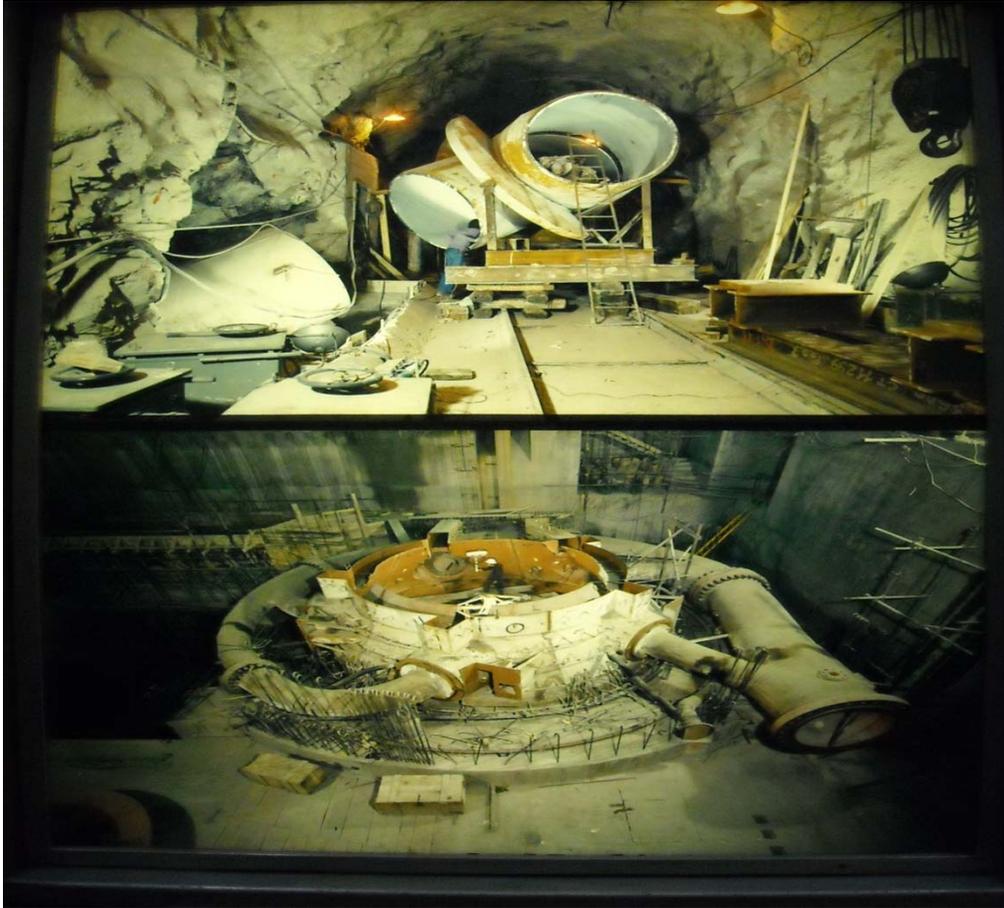
() numero di pompe

6386

7463

**Distribuzione geografica della potenza installata pompaggi sul continente concentrata nell'area NORD (ca. 70%)**

# Impianti di pompaggio: costruzione (parte meccanica)



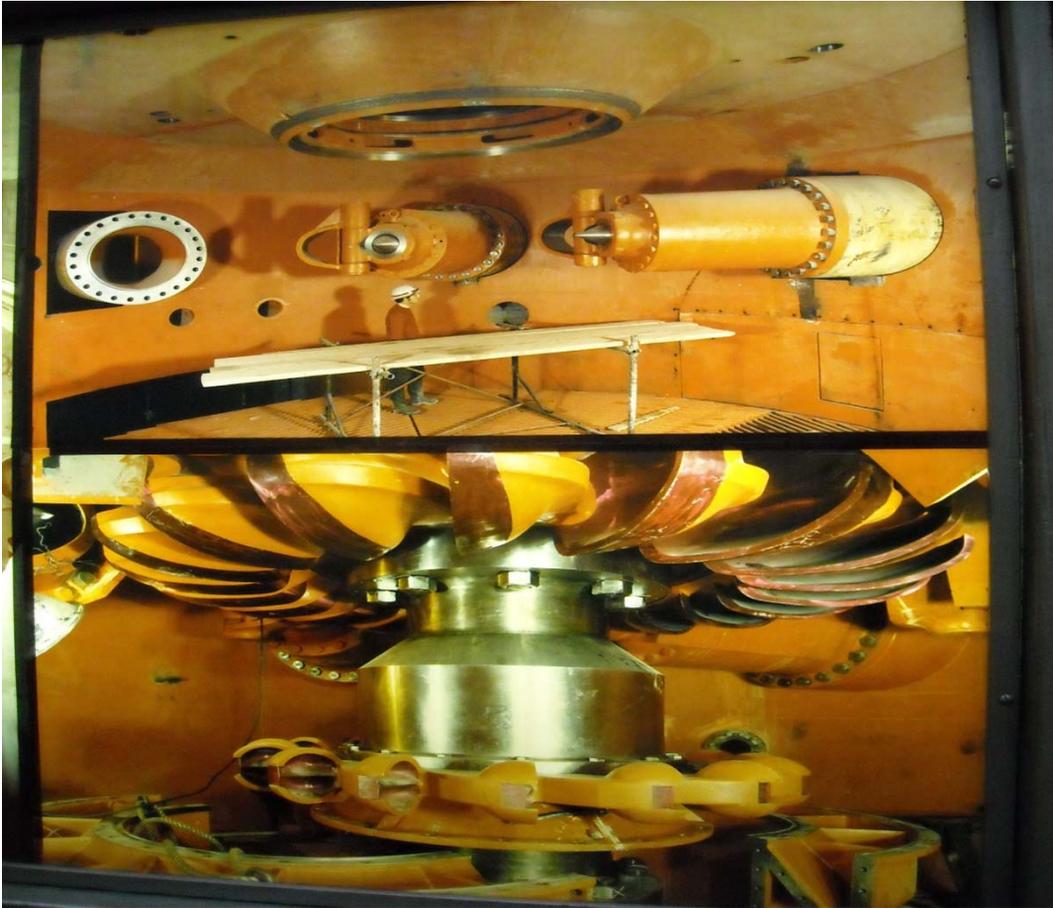
**Importanti investimenti già effettuati hanno messo a disposizione del sistema rilevante potenza installata in grado di fornire diversi servizi ancillari anche in contemporanea**

# Impianti di pompaggio: costruzione (opere civili)



**L'installazione ha richiesto un ingente impiego di capitali, persone e mezzi con una costante attenzione verso la tutela del territorio**

# Impianti di pompaggio: turbine



**Know-how elemento fondamentale ai fini della corretta conduzione degli impianti e della gestione dei cicli di ispezione e manutenzione**

# Modalità di gestione degli impianti e relativi drivers

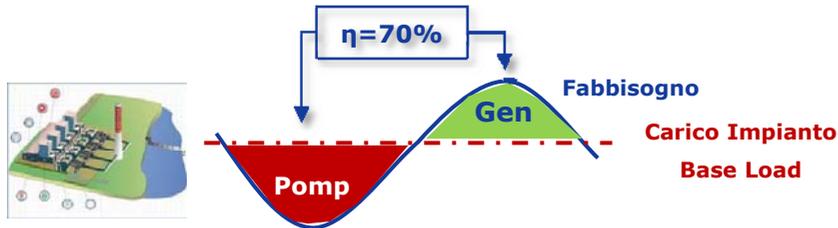
## Mercato dell'energia

### Principali drivers di utilizzo

- Dato un rendimento tipico del ciclo di pompaggio ca. 70% è richiesto:

$$\frac{Pz \text{ generazione}}{Pz \text{ pompaggio}} \geq 1,4$$

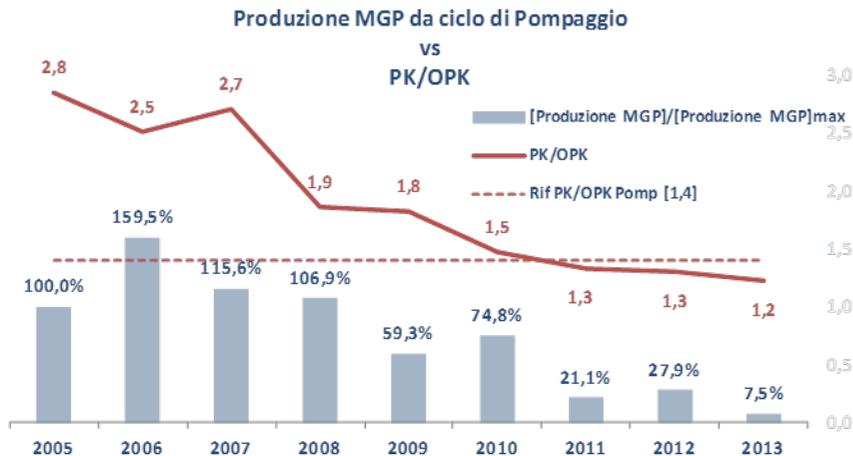
- Ottimizzazione integrata parco: time-shift generazione Base Load



- Rispetto limiti tecnici di svaso/invaso vasche di monte/valle

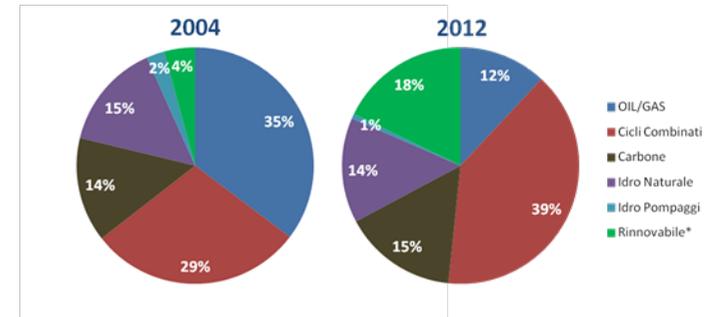
### Evoluzione utilizzo pompaggio sui ME

- Progressiva riduzione redditività e quindi utilizzo su mercato dell'energia



### Evoluzione Mercato Energia Italia

- Evoluzione Mix di Generazione da Base-Load a Mid-Merit con forte penetrazione FRNP:



- Parco più flessibile e forte presenza generazione incentivata determina riduzione Peak Leverage

Evoluzione mix di generazione e forte presenza di FRNP hanno causato un appiattimento dei profili di prezzo e conseguente:

- minore remunerazione del pompaggio sui mercati dell'energia
- progressivo spostamento volumi sul mercato dei servizi di dispacciamento

# Modalità di gestione degli impianti e relativi drivers

## Mercato dei servizi di dispacciamento

### Principali drivers di utilizzo

- ❑ Operatore offre intera capacità di produzione/pompaggio a TSO con indicazione di prezzo di vendita/acquisto
- ❑ Pompaggio utilizzato dal TSO in virtù delle caratteristiche di estrema flessibilità:
  - ❑ per copertura punta e rampa di presa di carico della domanda residua (fabbisogno elettrico al netto della produzione FRNP)
  - ❑ Servizi di bilanciamento rapidi
  - ❑ Gestione congestioni e servizi locali
- ❑ **Contratti a termine Operatore-TSO** (dal 2010) per la fornitura di riserva di generazione e pompaggio

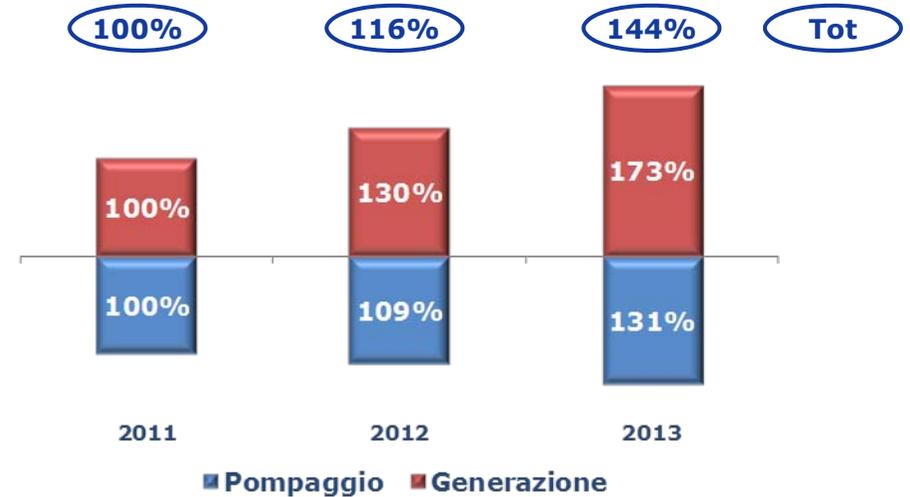
### Evoluzione utilizzo pompaggio

- ❑ Progressivo incremento utilizzo flessibile



### Gli impianti di pompaggio su MSD

Incremento vs anno di riferimento 2011



- Risorsa pompaggio pienamente disponibile per il TSO ai fini dell'esercizio in sicurezza della rete
- Principale utilizzo di questi impianti attualmente concentrato nella fornitura di servizi di rete con un trend di utilizzo in aumento

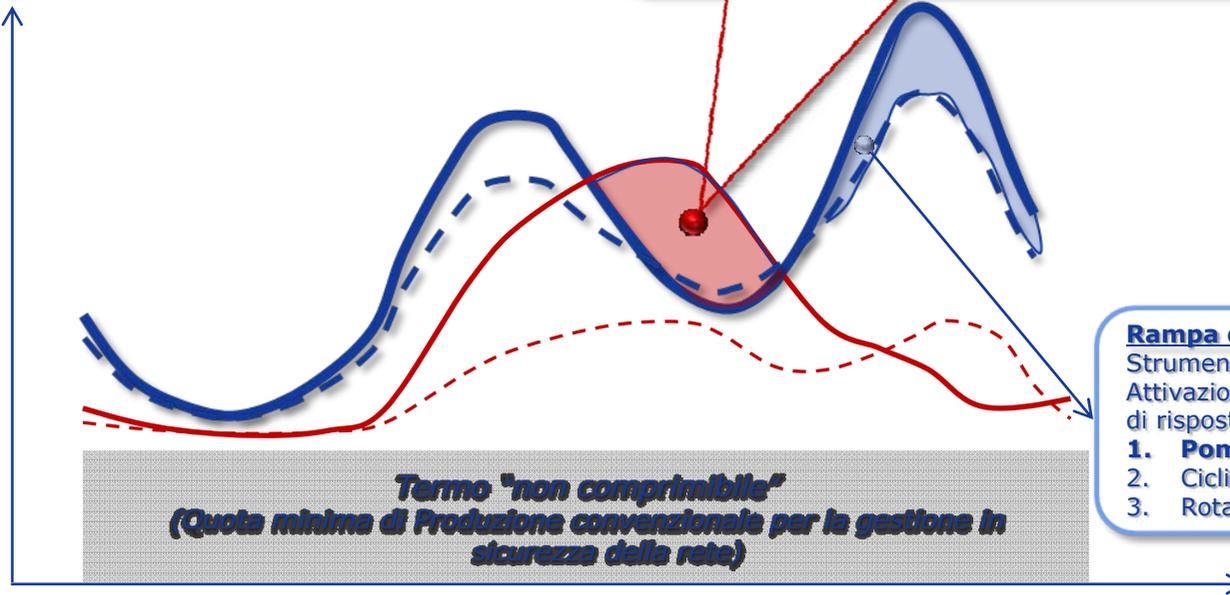
# Il pompaggio come fattore abilitante per l'integrazione delle fonti rinnovabili

## Ruolo Pompaggi su Mercato dei servizi

### Impatto FRNP:

- ❑ Riduzione del numero di impianti termoelettrici sincronizzati
- ❑ Incremento gradiente di rampa di presa di carico
- ❑ Incremento fabbisogno di riserva

- *FRNP mercato*
- *FRNP*
- *Fabbisogno mercato*
- *Fabbisogno Fisico*



### Surplus di generazione

Strumenti di gestione del TSO:

1. Riduzione/spegnimento termico
2. **Attivazione gruppi di pompaggio**
3. Taglio di produzione idrica
4. Taglio dell'import
5. Taglio della produzione eolica e idrico rigido

### Rampa di carico a gradienti elevati

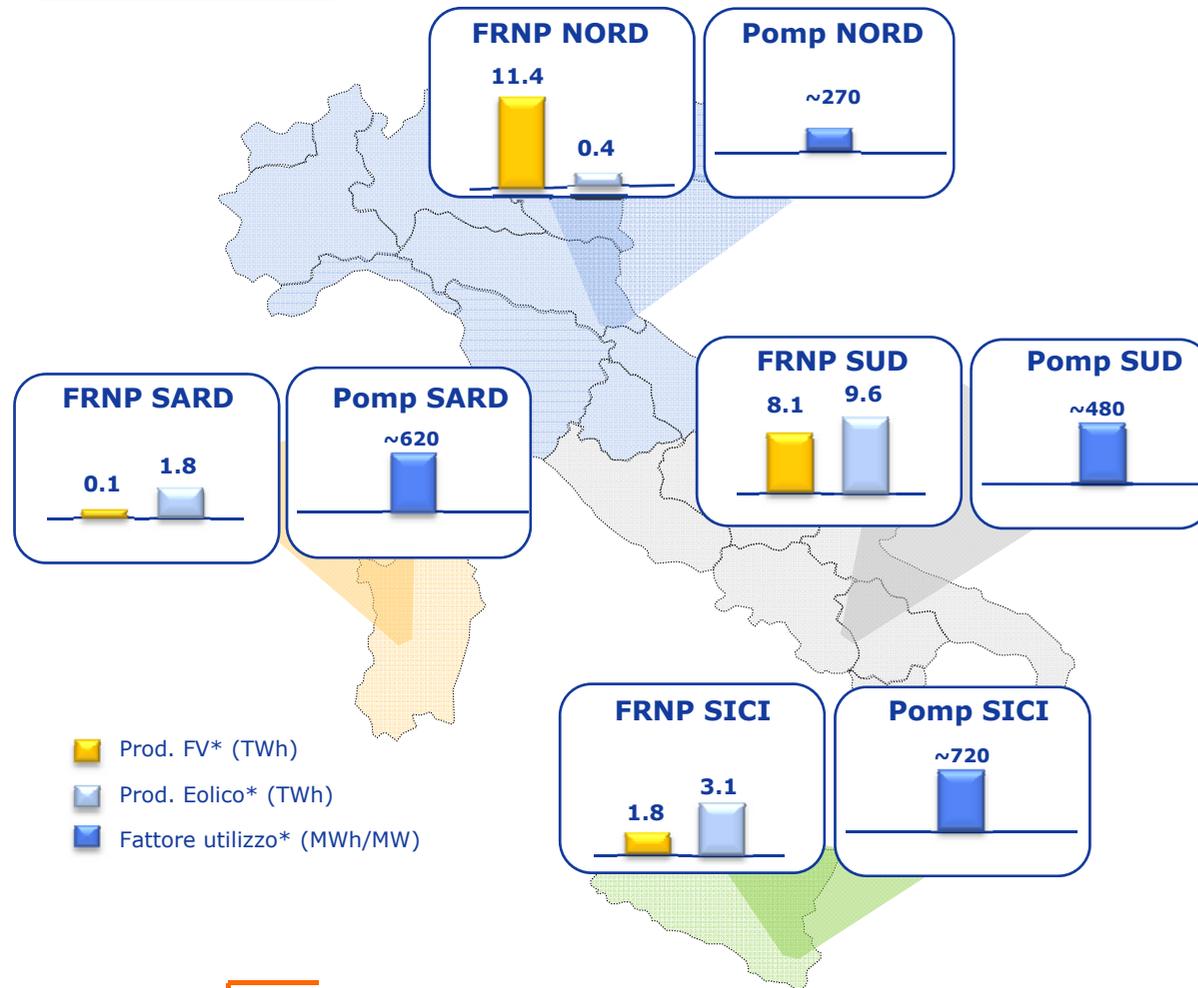
Strumenti di gestione del TSO:  
Attivazione risorse con elevati gradienti di risposta:

1. **Pompaggi**
2. Cicli combinati
3. Rotante carbone

Fondamentale la capacità degli impianti di pompaggio di garantire:

- ❑ Attivazione rapida di riserva su rampe di carico
- ❑ Assorbimento dell'overgeneration ed evitare taglio FRNP
- ❑ Mantenimento in servizio della capacità termoelettrica minima necessaria alla sicurezza del sistema elettrico
- ❑ Fornitura di servizi di regolazione di frequenza e tensione sia direttamente che indirettamente (attraverso la capacità termoelettrica che consente di mantenere in servizio)

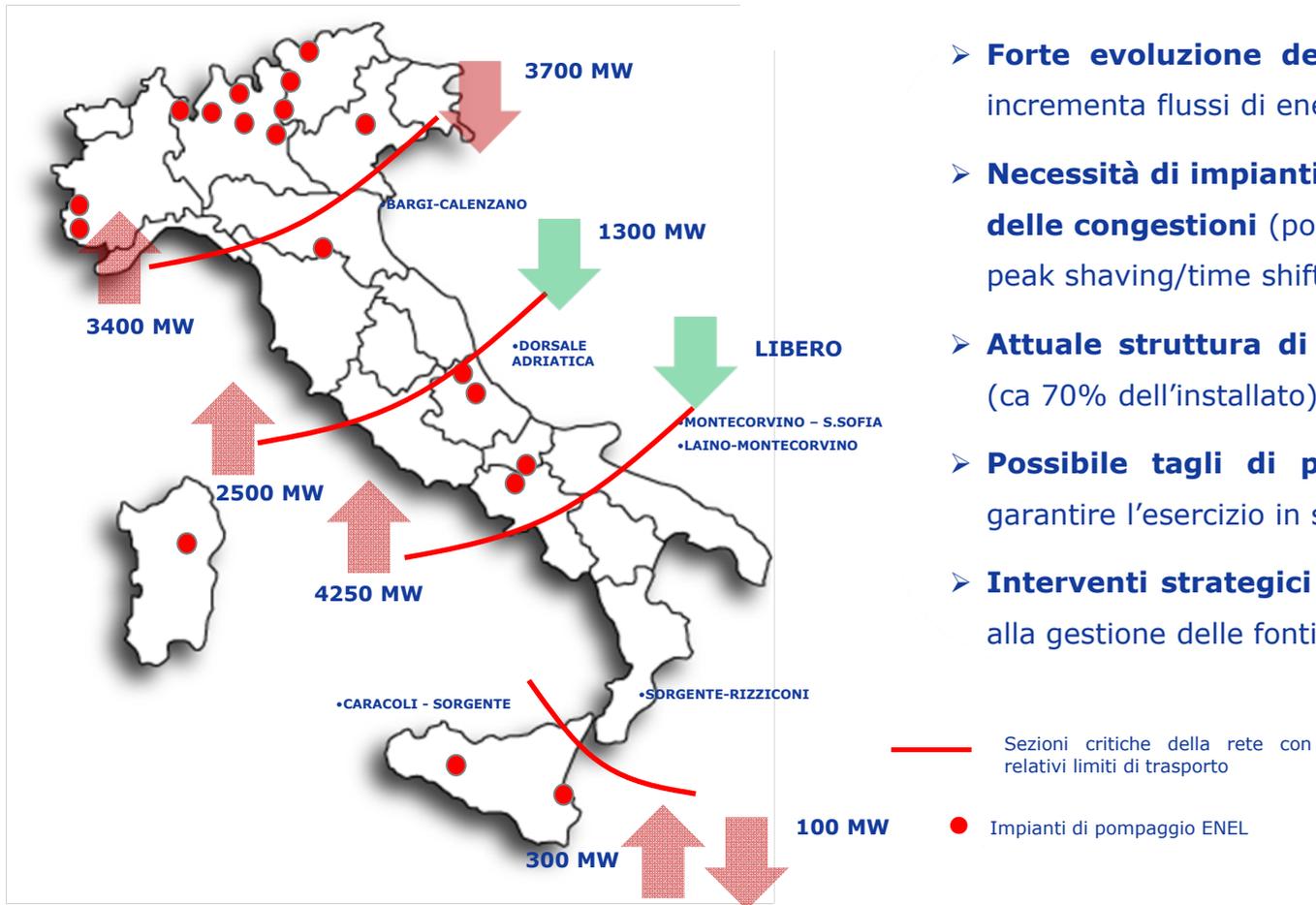
# Localizzazione geografica fonti rinnovabili e utilizzo impianti di pompaggio



- **Produzione fotovoltaica** concentrata principalmente sul continente (91%) ed in particolare nella macroarea Nord (53%). Rilevante produzione anche al Sud (38%).
- **Produzione eolica** concentrata principalmente al SUD (64%). Importante contributo anche sulle isole (Sici 21%, Sard 12%) con conseguenti problematiche di gestione flessibile delle restanti fonti di produzione.
- **Funzionamento in pompaggio** concentrato a Sud e sulle isole a fronte di maggiore necessità di gestione della produzione da FRNP (soprattutto da eolico). Limitato utilizzo del pompaggio al nord.
- **Potenzialità di pompaggio** non sfruttate al massimo. Disponibilità di capacità di storage anche a fronte di futuri incrementi della produzione da FRNP.

**Potenzialità di pompaggio attualmente non utilizzata al massimo**  
**Possibile sfruttamento ottimo della risorsa a fronte di adeguamento RTN**

# Sviluppi di Rete necessari per un più efficace utilizzo degli impianti



- **Forte evoluzione della capacità di generazione da FRNP al Sud** incrementa flussi di energia sulle dorsali di trasmissione tra SUD e NORD
- **Necessità di impianti in grado di realizzare servizi per superamento delle congestioni** (pompaggio tecnologia matura ed efficace ad effettuare peak shaving/time shifting delle condizioni di sovrapproduzione)
- **Attuale struttura di rete AAT** limita contributo dei pompaggi al Nord (ca 70% dell'installato) per il bilanciamento del Sud
- **Possibile tagli di produzione da FRNP**, tipicamente al SUD, per garantire l'esercizio in sicurezza della rete
- **Interventi strategici sulla RTN** consentirebbero un migliore contributo alla gestione delle fonti intermittenti

**Rete elettrica attuale limita potenzialità di utilizzo del pompaggio.  
Necessario finalizzare gli interventi già previsti sulla RTN per favorirne un maggior contributo ai servizi di sistema**

# Conclusioni

- **Pompaggio** tecnologia di storage matura, economica e immediatamente disponibile per le esigenze del sistema
- **Risorsa fondamentale per** il sistema elettrico in virtù delle caratteristiche di estrema **flessibilità e** come **fattore abilitante** per la crescente penetrazione delle **FRNP**
- Attuale utilizzo caratterizzato da:
  - ridotte opportunità su Mercati Energia per appiattimento Peak Leverage (a seguito flessibilizzazione parco di produzione e contemporaneo incremento della generazione incentivata);
  - crescenti opportunità su Mercato Servizi di Dispacciamento per effetto dell'impatto sul sistema elettrico della generazione intermittente;
  - in generale fattore di utilizzo limitato da vincoli strutturali del sistema elettrico (risorsa a Nord, fabbisogno a Sud, strozzature nei transiti Nord-Sud)
- **Miglioramento collegamenti Nord-Sud**, previsti nel piano di sviluppo della Rete, potranno garantire un migliore utilizzo e presumibilmente un maggiore funzionamento della risorsa pompaggio

---

# Accumuli elettrochimici Peak Intensive per la Rete di Trasmissione Nazionale

Anna Carolina Tortora

Firenze, 21 Marzo 2014

# Agenda

- Contesto regolatorio e Piano di difesa
- Progetto Storage Lab
- Contributi dei Sistemi di Accumulo non Convenzionale (SANC)  
Power Intensive
- Validazione tecnologie - Stress Test
- Virtual Storage Plant
- ANNEX

## Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG)



| Documento di riferimento | Data di pubblicazione | Oggetto  |
|--------------------------|-----------------------|--|
| Delibera 288/12/R/EEL    | Luglio 2012           | L'Autorità invita Terna a proporre progetti pilota volti a ridurre la mancata produzione da Fonte Rinnovabile Non Programmabile. La delibera illustra i requisiti minimi e opzionali ai quali i progetti pilota dovranno rispondere. Viene riconosciuta l'extraremunerazione I4. |
| Delibera 43/2013/R/EEL   | Febbraio 2013         | L'Autorità ammette al trattamento incentivante I4 due progetti pilota <b>Power Intensive</b> di taglia massima pari a 8MW cadauno relativi alle Isole Maggiori.  |

## Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE)



| Documento di riferimento                          | Data di pubblicazione | Oggetto   |
|---|-----------------------|---|
| Lettera di Approvazione Piano di Difesa 2012-2015 | Ottobre 2012          | Il MiSE approva il Piano di Difesa 2012-2015. In merito ai Sistemi di Accumulo <b>Power Intensive</b> il Ministero chiede di essere informato circa l'esito delle attività di valutazione . |

### Criticità

L'integrazione delle FRNP in reti isolate e caratterizzate da un rapporto generazione rinnovabile/carico sfavorevole comporta:

- Riduzione della capacità regolante che, in condizione di basso carico, assume aspetti di rilevante criticità;
- Riduzione dell'inerzia del sistema e, di conseguenza, della stabilità della rete, con rischio di disservizi di elevate dimensioni;
- Difficoltà nella gestione dei minimi notturni (wind) e diurni (PV + wind)

### Benefici

L'installazione di 20 MW di Sistemi di Accumulo con risposta ultrarapida e caratteristiche tipicamente Power Intensive sia in Sardegna che in Sicilia permetterà di:

- Reintegrare la capacità regolante;
- Limitare l'effetto della riduzione dell'inerzia del sistema grazie a performance di regolazione in grado di erogare fino al 200% della potenza nominale in tempi tali da emulare il comportamento delle masse rotanti dei generatori tradizionali;
- Erogazione dei servizi per la rete:
  - Regolazione di tensione primaria e secondaria;
  - Regolazione primaria e secondaria frequenza;
  - Servizi di Power Quality

Power Intensive + Integrazione con il SEN

### Piano di Difesa 2012

- 1<sup>st</sup> fase – Sperimentale – **Storage Lab**
- 2<sup>nd</sup> fase – Completamento PdD

40 MW

16 MW

24 MW

# Agenda

➤ Contesto regolatorio e Piano di difesa

➤ Progetto Storage Lab

➤ Contributi dei Sistemi di Accumulo non Convenzionale (SANC)  
Power Intensive

➤ Validazione tecnologie - Stress Test

➤ Virtual Storage Plant

➤ ANNEX

# Il Progetto Power Intensive

## 1 Fase (Storage Lab)

Sardegna:

**8 MW**

Codrongianos



Sicilia:

**8 MW**

Ciminna



Totale previsto **16 MW**

## 2 Fase

Sardegna:

**12 MW**

Codrongianos



Sicilia:

**12 MW**

Casuzze



Totale previsto **24 MW**

**Totale previsto 40 MW**

## 16 MW di Sistemi di Accumulo Power Intensive

### Obiettivi

- **Fornire i servizi essenziali**
  - Regolazione di frequenza
  - Regolazione di tensione
  - Gestione FRNP
  - Integrazione nei Sistemi di Controllo e Conduzione
  - Power Quality
- **Valutazione delle performance delle differenti soluzioni tecnologiche**
- **Sviluppo di un Sistema di Controllo avanzato per la gestione di molteplici sistemi di accumulo**

### Tecnologie

- **1° Fase 16 MW:**

Lithium-Ion  
ZEBRA  
Altre tecnologie

# Schema sperimentazione

## Prove di tipo

- Test numero di cicli standard
- Test di invecchiamento su servizi di rete
- Test di overcharge/discharge
- Test di sovraccaricabilità
- Test di cortocircuito
- Test di prestazione
- Test termici e climatici

- Connessione alla rete\*
- Efficienza\*
- Funzionamento dei servizi ausiliari\*\*
- Assorbimento dei servizi ausiliari\*
- Distorsione armonica ed immunità\*\*
- Energia accumulata \*
- Sistema di controllo e protezione\*\*
- Sistema di monitoraggio\*
- Radio-interferenza\*\*
- Test termici\*\*
- Rumore\*\*
- ...

## Prestazione in rete

- Accumulo/rilascio di energia
- Regolazione di tensione
- Regolazione primaria frequenza
- Regolazione secondaria di frequenza
- Telescatto

- Analisi tempi di risposta
- Analisi efficienza totale
- Analisi di compatibilità con i sistemi DSC di "secondo livello"

## Integrazione applicazioni Smart Grid

- Regolazione di tensione avanzata
- Regolazione di frequenza /potenza avanzata
- Islanding
- Integrazione con i sistemi di difesa
- Integrazione con la gestione dinamica delle reti
- Integrazione con i sistemi predittivi della produzione da FRNP
- Virtual Storage Plant

Prove eseguite sui moduli



Prove eseguite sul ESS



Attività di sperimentazione e sviluppo



# Sistemi di Accumulo: Tecnologie aggiudicate

| Tipologia di accumulo | Descrizione  | E/P     | Energia Specifica* (Wh/kg) | Potenza Specifica* (W/kg) | Numero di cicli | Rendimento DC/DC |
|-----------------------|--|---------|----------------------------|---------------------------|-----------------|------------------|
| Litio-ioni            | LiNiCoAlO <sub>2</sub>    | 0,5 – 2 | 108                        | 205                       | 3000            | 97               |
|                       | LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>    |         | 65                         | 65                        | 5000            | >97              |
|                       | LiFePO <sub>4</sub>   |         | 100                        | 105                       | 4000            | 95               |
|                       | LiNiMnCoO <sub>2</sub>    |         | 80                         | 160                       | 3000            | 91               |
|                       | Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>   |         | 73                         | 73                        | 6000            | 93               |
| ZEBRA                 | Na-Ni-Cl <br> | 2 - 4   | 85                         | 40                        | 4500            | 90               |

Avviata fase di scouting per 2,5-3,5 MW di nuove tecnologie di accumulo elettrochimico (Flow, Super-cap, etc...)

# Agenda

- Contesto regolatorio e Piano di difesa
- Progetto Storage Lab
- Contributi dei Sistemi di Accumulo non Convenzionale (SANC)  
Power Intesive
- Validazione tecnologie - Stress Test
- Virtual Storage Plant
- ANNEX

# Terna - Azione avviate e contributi dei SANC “power intensive”

## Effetti FRNP

Riduzione della capacità regolante che, in condizione di basso carico, assume aspetti di rilevante criticità

Riduzione dell’inerzia del sistema e, di conseguenza, della stabilità della rete

Ricaduta sui sistemi di difesa del SEN e sui rischi di disservizio di ampie dimensioni

Difficoltà nella gestione dei minimi notturni (wind) e diurni (PV + wind)

Risorse di sostituzione necessarie maggiori e, a volte, incompatibili con il punto precedente

## Principali azioni Terna

Riduzione estero

Regolazione delle protezioni degli impianti eolici rilevanti

Transito della Sicilia in export con scatto e regolazione di eolici a evento

Prescrizione di PV di retrofitting

Ri-taratura dei sistemi di difesa

Utilizzo di impianti di pompaggio in produzione e assorbimento nelle isole

## Contributi SANC

Reintegro della capacità di regolazione

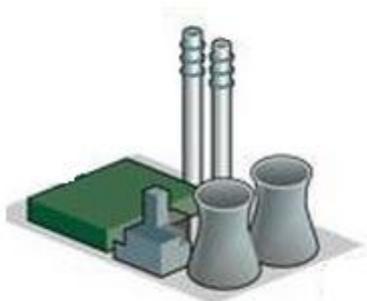
Alta performance di regolazione

Integrazione nei sistemi di difesa

Mezzo per consentire l’attivazione di risorse di DSC veloci

# Reintegro della capacità di regolazione

## PRODUZIONE CONVENZIONALE



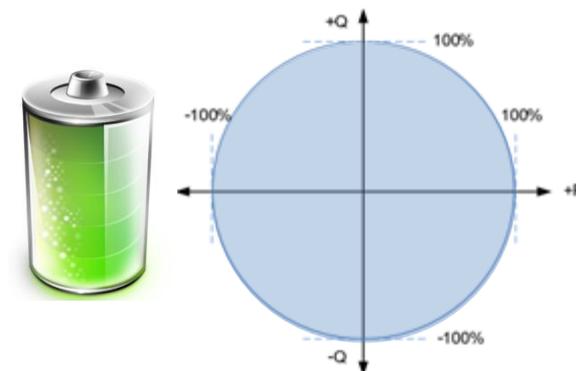
- Regolazione primaria con banda di regolazione:  $\pm 1,5\% P_{\text{eff}}^{(*)}$

## FRNP



- No regolazione primaria
- Riduzione potenza immessa con  $50.3\text{Hz} < f < 51.5\text{Hz}$

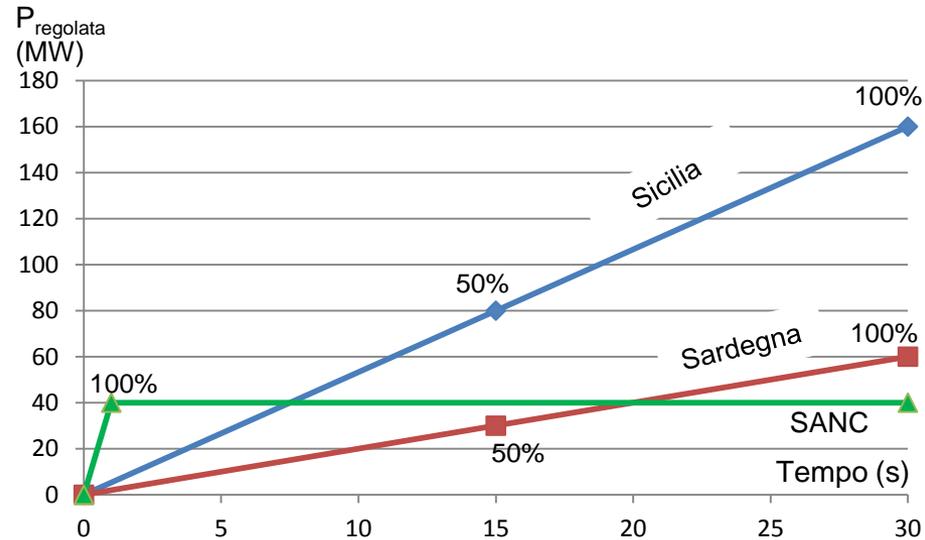
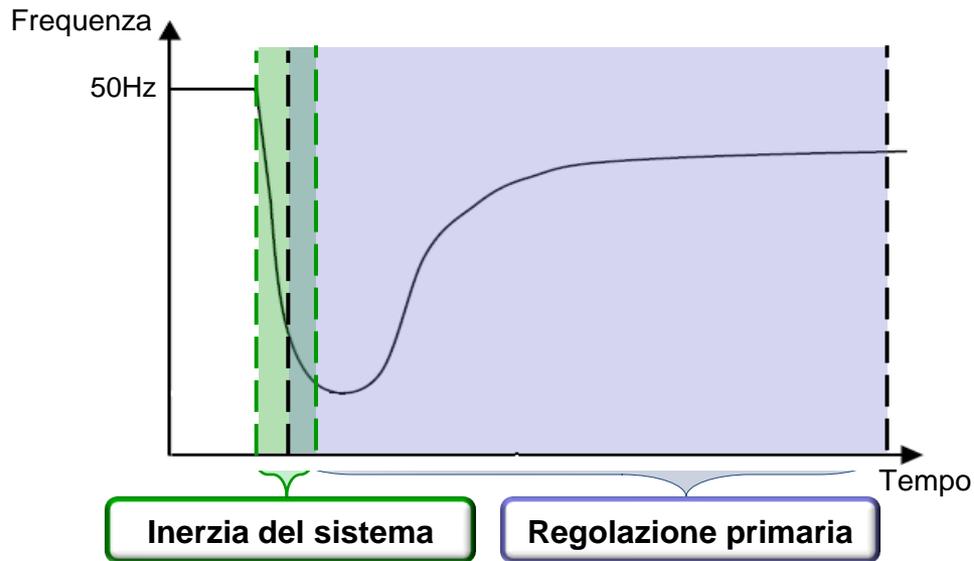
## SANC



- Regolazione primaria con banda di regolazione:  $\pm 100\% P_{\text{ nominale}}$  dell'impianto

**Possibilità di ovviare alla riduzione della capacità regolante causata dalla forte penetrazione degli impianti di generazione da FRNP**

# Performance nella regolazione



- Disponibilità riserva primaria Sicilia: 160 MW
- Disponibilità riserva primaria Sardegna: 60 MW + BMI ( $\approx 80$  MW)

## Termoelettrico

### Regolazione primaria

- Banda di regolazione:  $\pm 1,5\% P_{eff}$
- Almeno metà entro 15 sec
- Tutta entro 30 sec
- Mantenimento per almeno 15 min

### Inerzia del sistema

- Inerzia delle masse rotanti
- Effetto non regolabile (statismo)

## SANC

- Banda di regolazione:  $\pm 100\% P_{nom}$  dell'impianto
- Tutta entro 1 sec (regolazione ultrarapida)
- Eventuale sovraccaricabilità

- Inerzia sintetica
- Effetto regolabile

## Funzione del SANC

Riduzione rischio  
under/over frequency

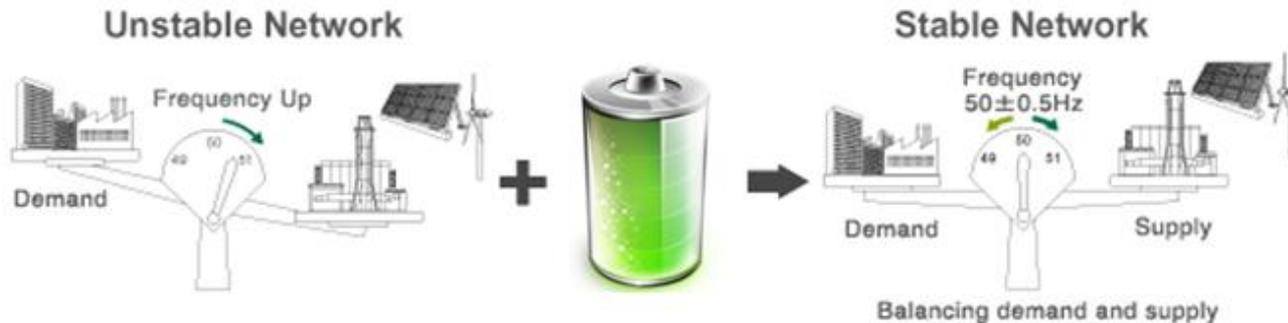
- Regolazione ultrarapida di frequenza
- Uso integrato con il piano di distacco del carico

Black Start

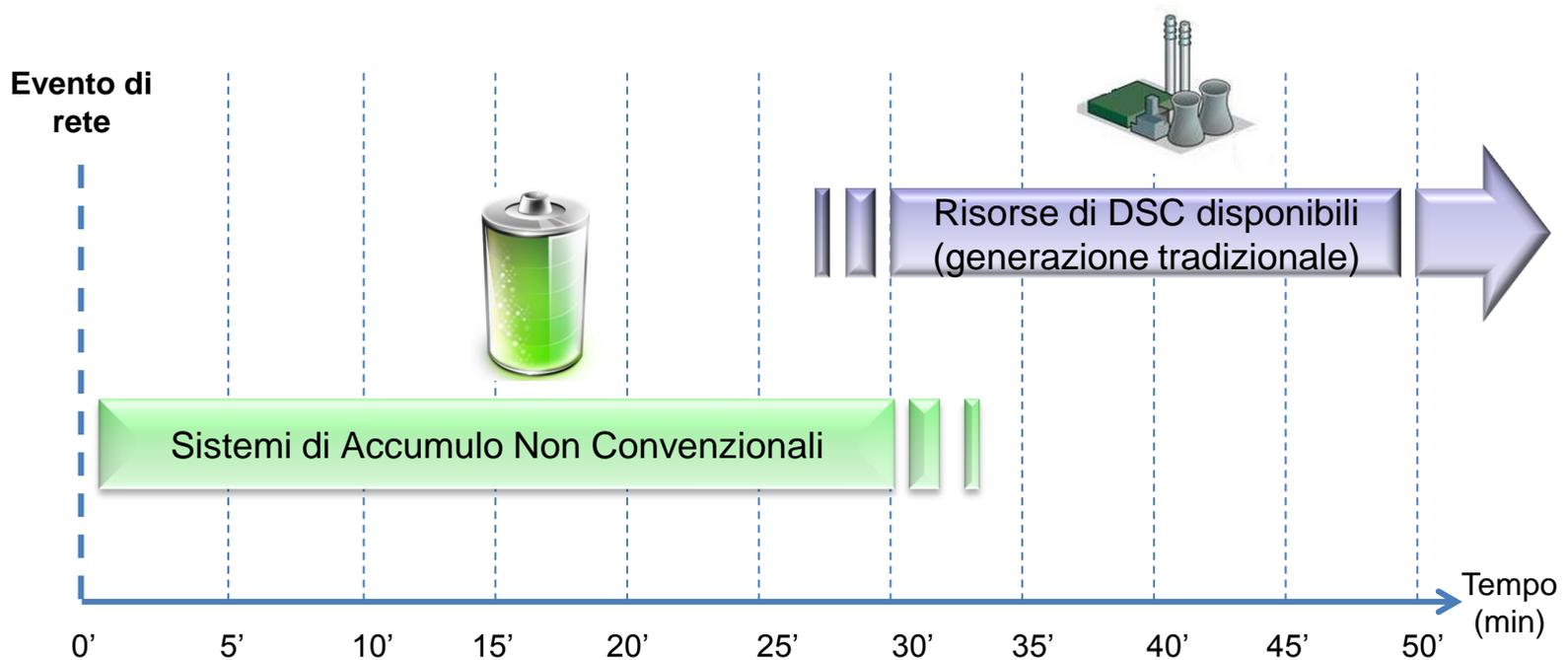
- Connessione ad una rete avente potenza di cortocircuito nulla
- Contributo ad energizzare il trasformatore della stazione di connessione
- Regolazione di tensione

Islanding

- Rispetto delle funzioni per il Black Start
- Regolazione locale di frequenza
- Garanzia della stabilità dinamica e permanente della rete



# Mezzo per consentire l'attivazione di risorse di DSC veloci



**Possibilità di intervenire su evento in maniera tale da poter mitigare situazioni potenzialmente critiche dovute ad esempio alla mancanza di disponibilità di risorse veloci**

# Agenda

- Contesto regolatorio e Piano di difesa
- Progetto Storage Lab
- Contributi dei Sistemi di Accumulo non Convenzionale (SANC)  
Power Intensive
- Validazione tecnologie - Stress Test
- Virtual Storage Plant
- ANNEX

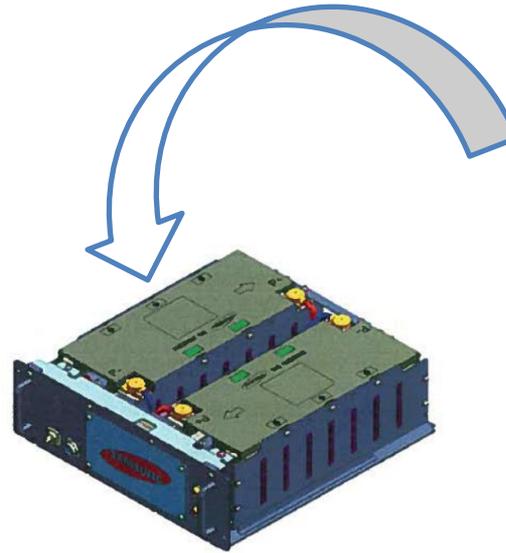
# Validazione tecnologie - Stress test

Al fine di validare le tecnologie di accumulo è stata avviata un'intensa campagna di test su moduli batteria da effettuarsi all'interno di laboratori specializzati

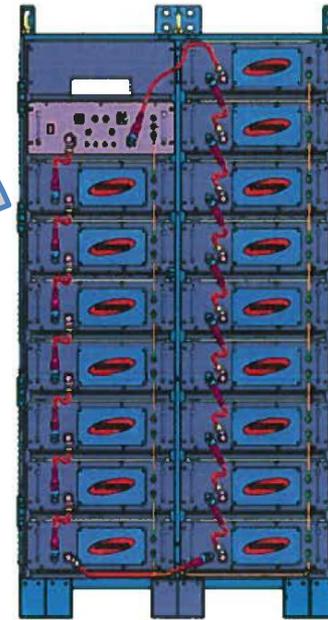
## TEST PREVISTI:

Verranno effettuati vari test sia su moduli batteria che su rack completi:

- Test numero di cicli standard
- Test di invecchiamento su servizi di rete
- Test di overcharge/discharge
- Test di sovraccaricabilità
- Test di cortocircuito
- Test di prestazione\*
- Test termici e climatici\*



Modulo batteria



Rack batterie

Laboratori

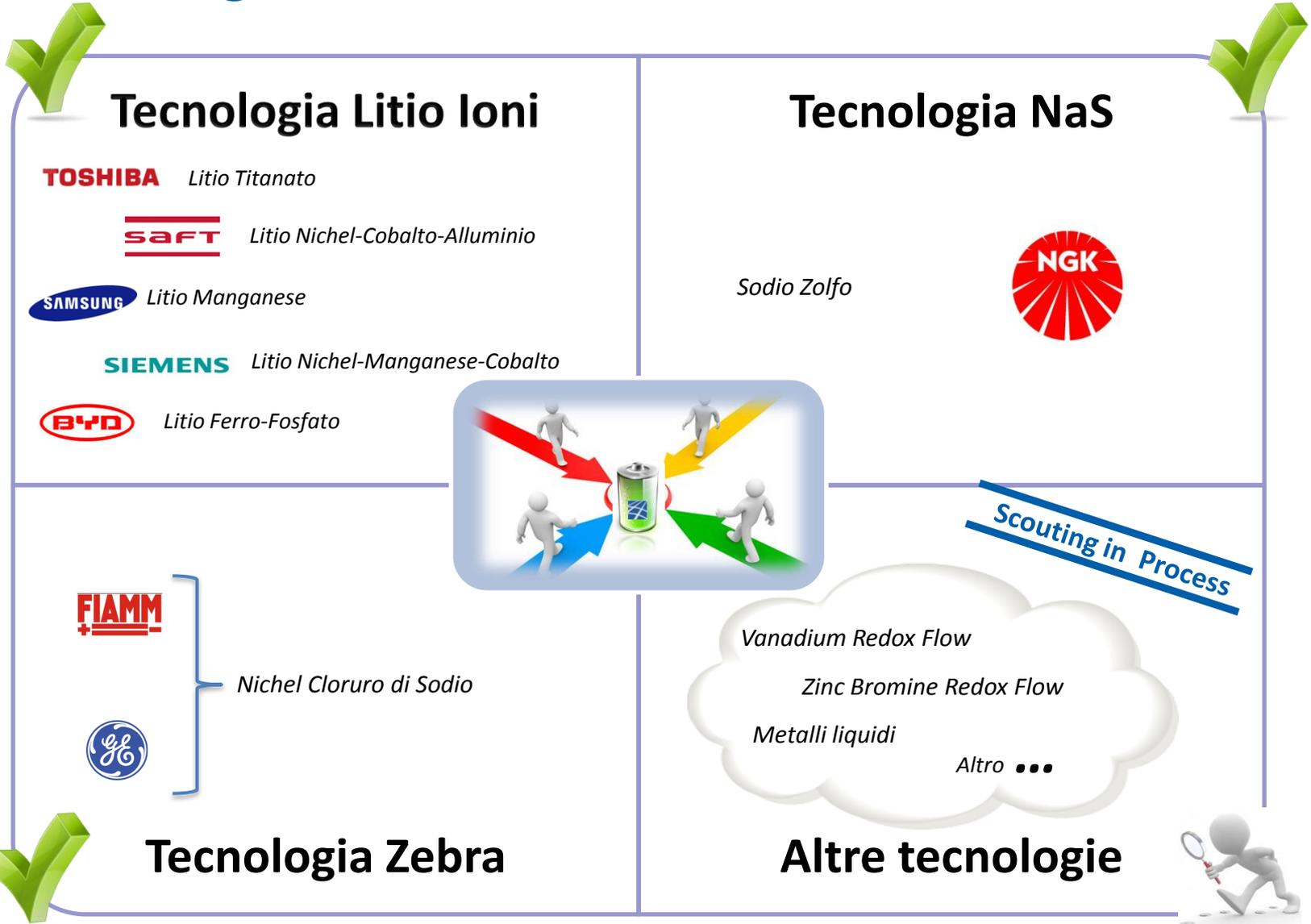
Laboratori scelti per l'esecuzione dei test sui moduli:



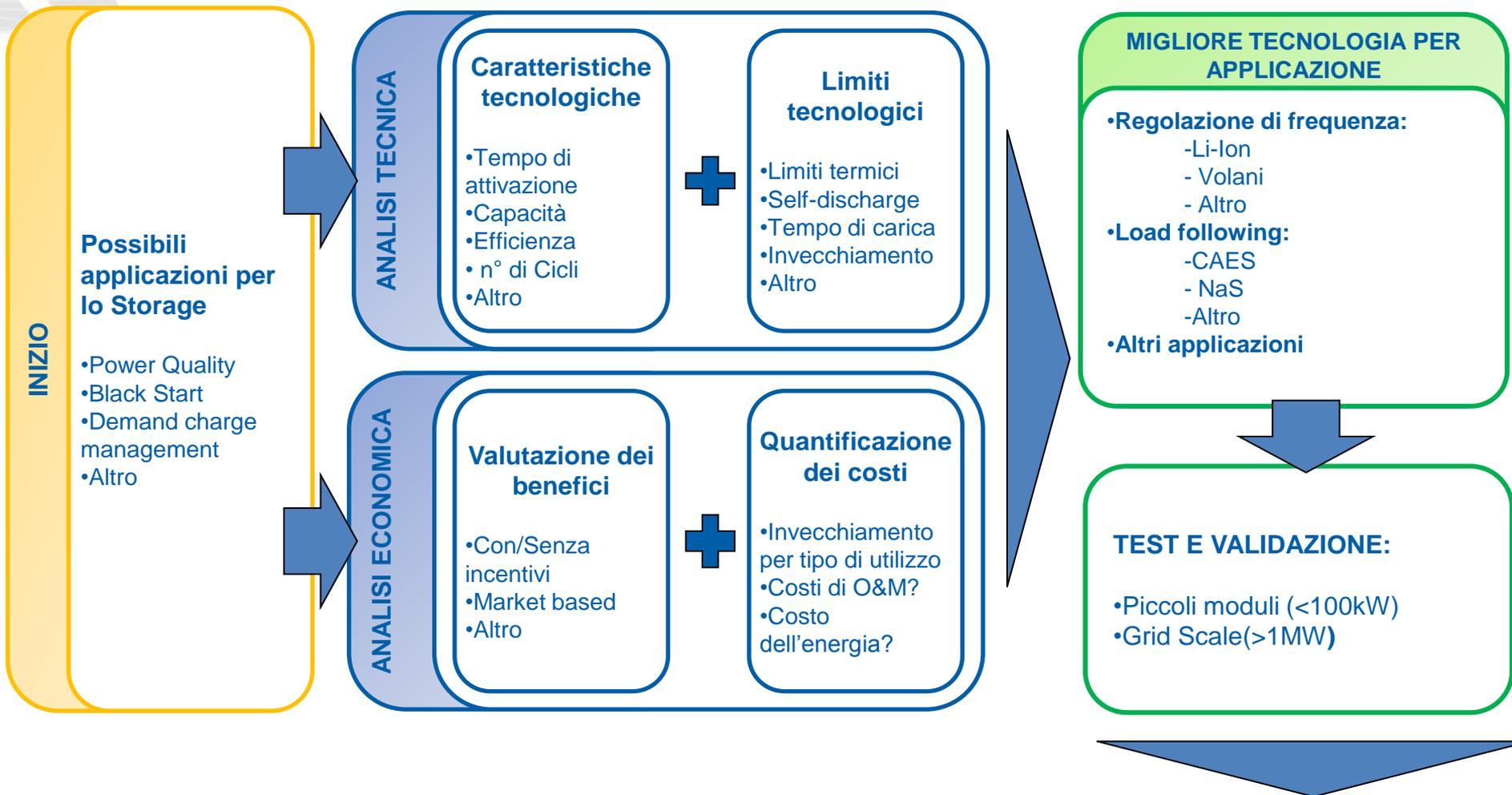
# Agenda

- Contesto regolatorio e Piano di difesa
- Progetto Storage Lab
- Contributi dei Sistemi di Accumulo non Convenzionale (SANC)  
Power Intesive
- Validazione tecnologie - Stress Test
- Virtual Storage Plant
- ANNEX

# Approccio di Terna ad un sistema di accumulo multi- tecnologico



# Virtual Storage Plant - Concept



## DEFINIZIONE E SVILUPPO DI UN VIRTUAL STORAGE PLANT

Una piattaforma capace di integrare le caratteristiche e le limitazioni di tutte le tecnologie minimizzando i costi derivanti da un loro utilizzo non ottimale e massimizzando le loro performance

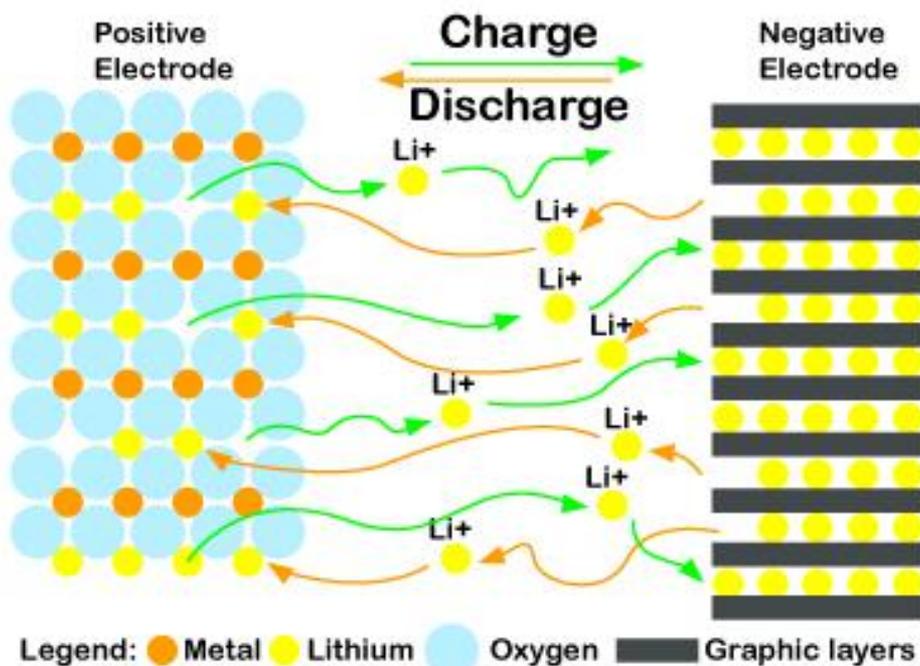
---

# ANNEX

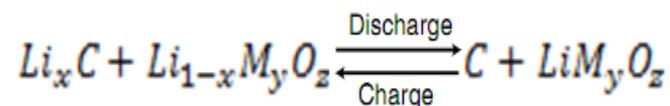
# Le tecnologie: Ioni di Litio (1 di 2)

## Caratteristiche della chimica

Sistema di accumulo elettrochimico basato sull'utilizzo di ioni di Litio. Tale tecnologia presenta tensioni di cella in funzionamento variabili tra 3 - 4 V. La cella elementare è costituita da due elettrodi con interposto un elettrolita. L'elettrodo negativo o anodo è composto di carbonio con intercalati al suo interno ioni di Litio. L'elettrodo positivo o catodo è composto da un ossido di metallo (o più metalli) con intercalati ioni di litio.



## Reazione generale



## Vantaggi:

- alta densità di energia
- alta efficienza
- alto voltaggio
- peso limitato
- autoscarica molto bassa
- no effetto memoria

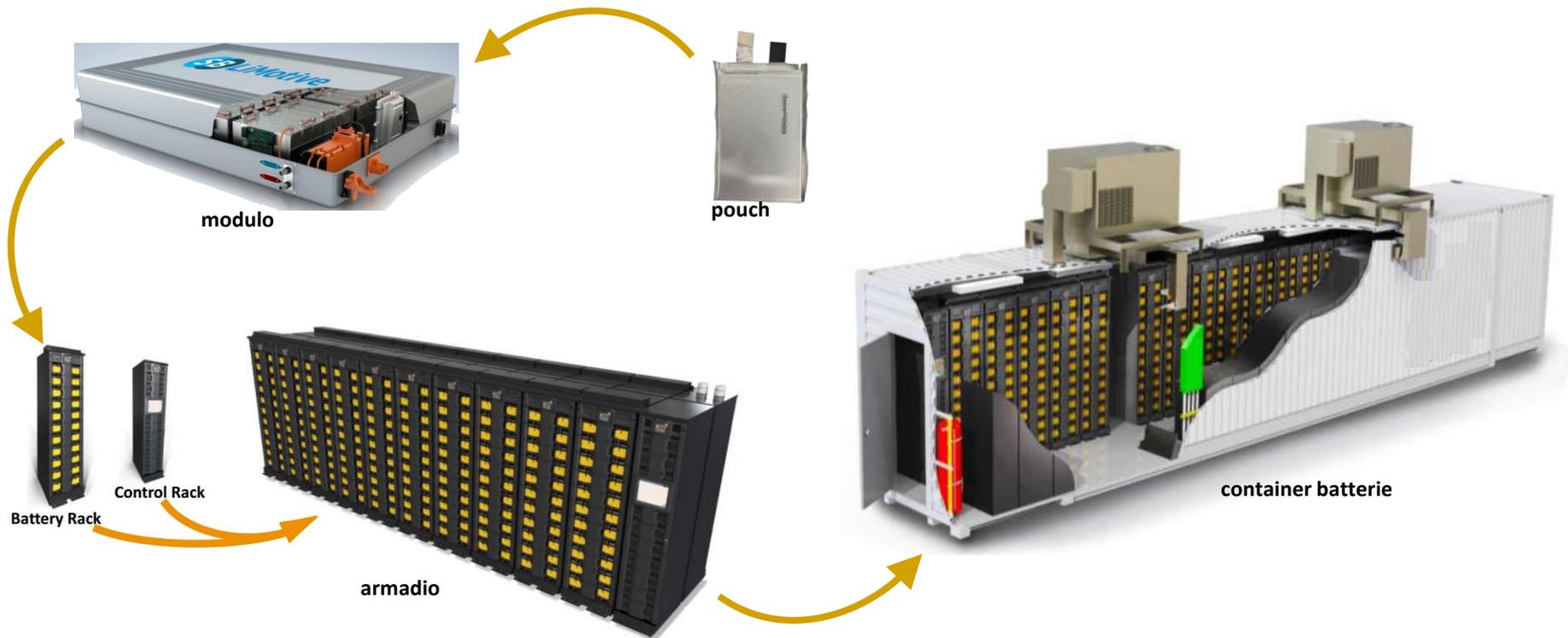
# Le tecnologie: Ioni di Litio (2 di 2)

## Architettura impianto

Il sistema di accumulo, per soluzioni da 1MW, risulta essere completamente containerizzato. Generalmente esso è composto da uno o più container (tipicamente da 20ft o da 40ft) contenenti i moduli batteria ed un container (tipicamente da 40ft) contenente il PCS ed il necessario per il collegamento alla rete elettrica.

Tutti i container hanno bisogno di apposite platee per l'installazione outdoor.

L'architettura del container batteria è di tipo modulare, con l'elemento principale costituito dalla cella elettrochimica (generalmente del tipo "pouch") collegata a formare "moduli" a loro volta raccolti in rack e quindi in armadi.



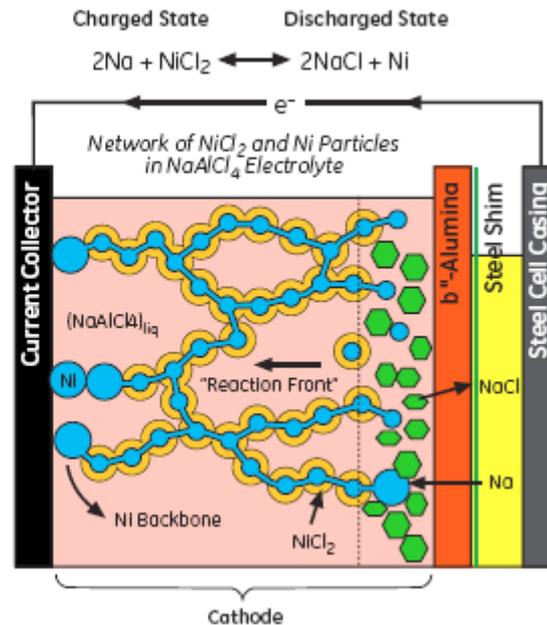
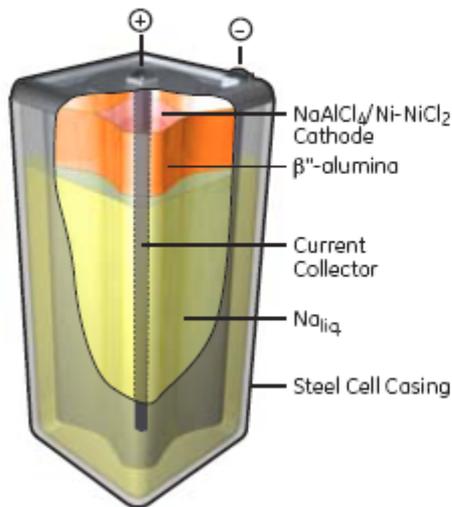
# La tecnologia: Zebra (1 di 2)

## Caratteristiche della chimica

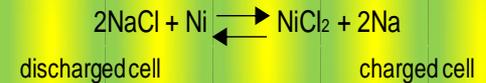
Sistema di accumulo elettrochimico funzionante ad alte temperature. Tale tecnologia presenta tensioni di cella in funzionamento dell'ordine dei 2,5 V e temperature di esercizio di circa 300°C. La cella elementare è costituita da due elettrodi isolati fisicamente ed elettricamente tra loro da un separatore ceramico che svolge anche la funzione di elettrolita.

L'elettrodo negativo o anodo è costituito da sodio allo stato fuso.

L'elettrodo positivo o catodo è costituito da cloruro di nichel impregnato da  $\text{NaAlCl}_4$  allo stato liquido.



## Reazione generale



## Vantaggi

- Buona energia specifica;
- Maggiore sicurezza rispetto alle batterie al Litio e chimica di funzionamento più stabile;
- Elementi costituenti gli elettrodi abbondanti in natura e facilmente riciclabili;
- Elevata durata di vita;

## Architettura impianto

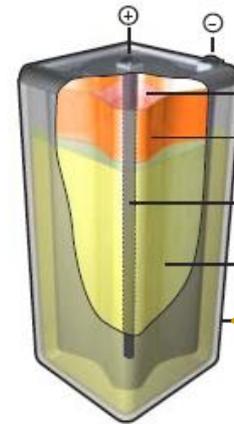
Anche in questo caso il sistema presenta una architettura modulare con l'elemento principale costituito dalla cella elettrochimica (generalmente del tipo "prismatico") collegata a formare "moduli" a loro volta raccolti in armadi.

Oltre al container batterie è presente un container (tipicamente da 40ft) contenente il PCS ed il necessario per il collegamento alla rete elettrica.

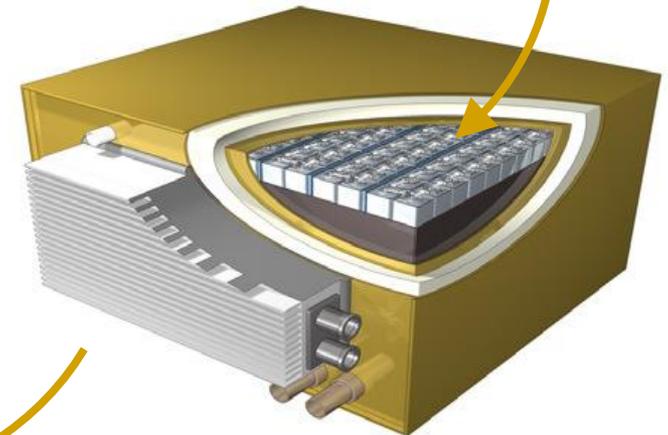
Tutti i container hanno bisogno di apposite platee per l'installazione outdoor.



container batterie

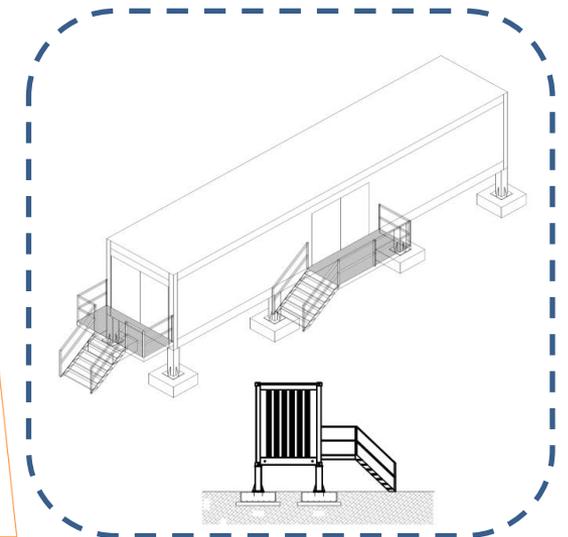
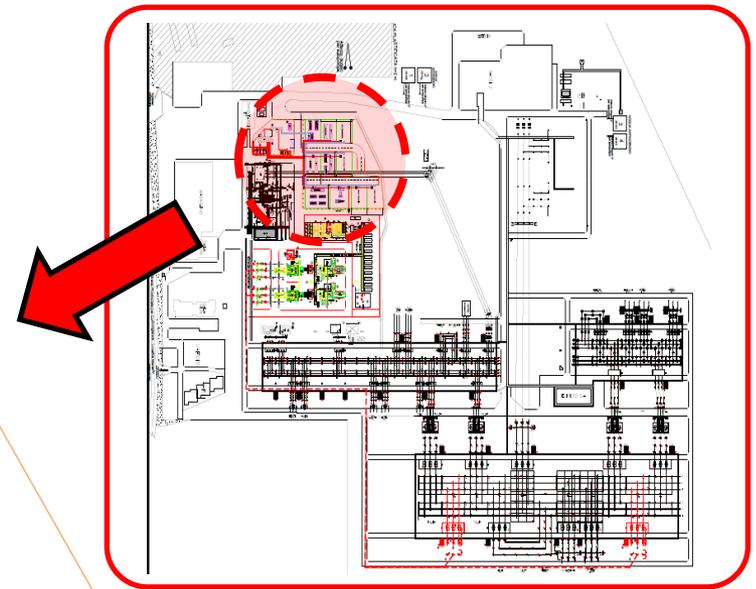
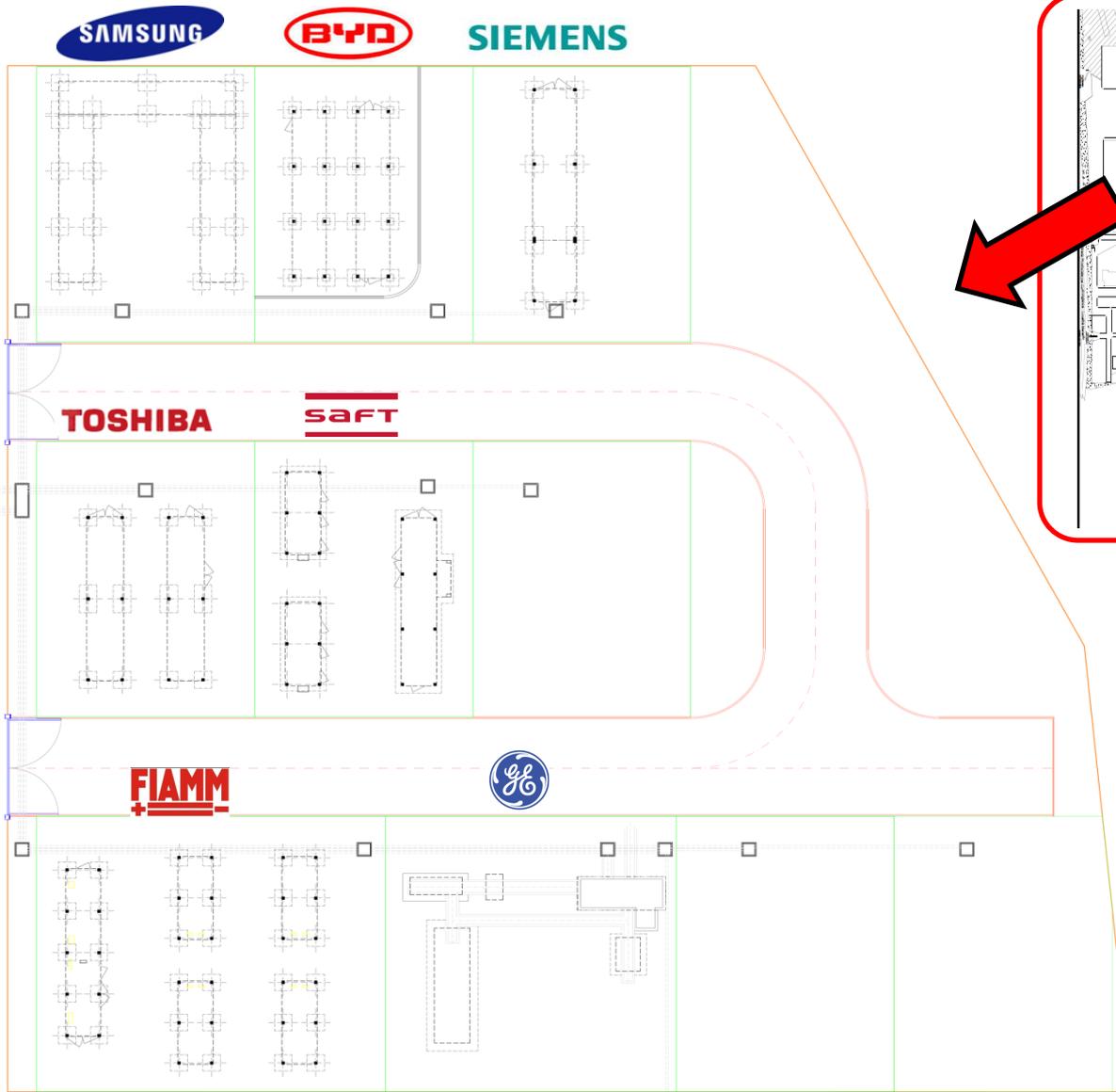


batteria



modulo

# Layout Codrongianos



# Principali progetti Storage Elettrochimico – Focus Europeo



- Principali players: Terna Storage; Enel Distribuzione
- Previsioni grossi impianti installati nel medio termine:  
40 MW Piano di Difesa Terna (varie tecnologie); 35 MW Piano di Sviluppo Terna (NaS);  
Circa 5 MW progetti pilota Enel Distribuzione (Litio)  
Enel Distribuzione: pianificati altri 60-80 MW in caso di esito positivo progetti pilota



- Principali players: Wemag power Utility
- Previsioni grossi impianti installati nel medio termine:  
5 MW tecnologia Litio (Samsung+Yunicos)
- Status: in costruzione
- **Incentivi previsti per installazione di sistemi di accumulo asserviti ad impianti FV < 30 kW**



- Principali players: Endesa
- Previsioni grossi impianti installati nel medio termine:  
2,5 MW (tecnologia Litio, volani, supercondensatori)
- Status: 1 MW già installato a Gran Canaria (tecnologia Litio Saft)



- Principali players: UK Power Network
- Previsioni grossi impianti installati nel medio termine:  
6 MW tecnologia Litio (Samsung+Yunicos)
- Status: annunciato



- Principali players: Nice Grid, RDF, EDF
- Previsioni grossi impianti installati nel medio termine:  
1 MW tecnologia Litio (Saft)
- Status: costruzione