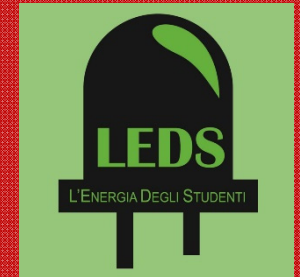


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



# Suggerimenti sull'ENERGIA ELETTRICA: accumularla e trasmetterla!

22 novembre 2016

**Prof. ing. Roberto Benato**

**DIPARTIMENTO INGEGNERIA INDUSTRIALE  
UNIVERSITÀ DI PADOVA**

# ACCUMULARLA

**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”**

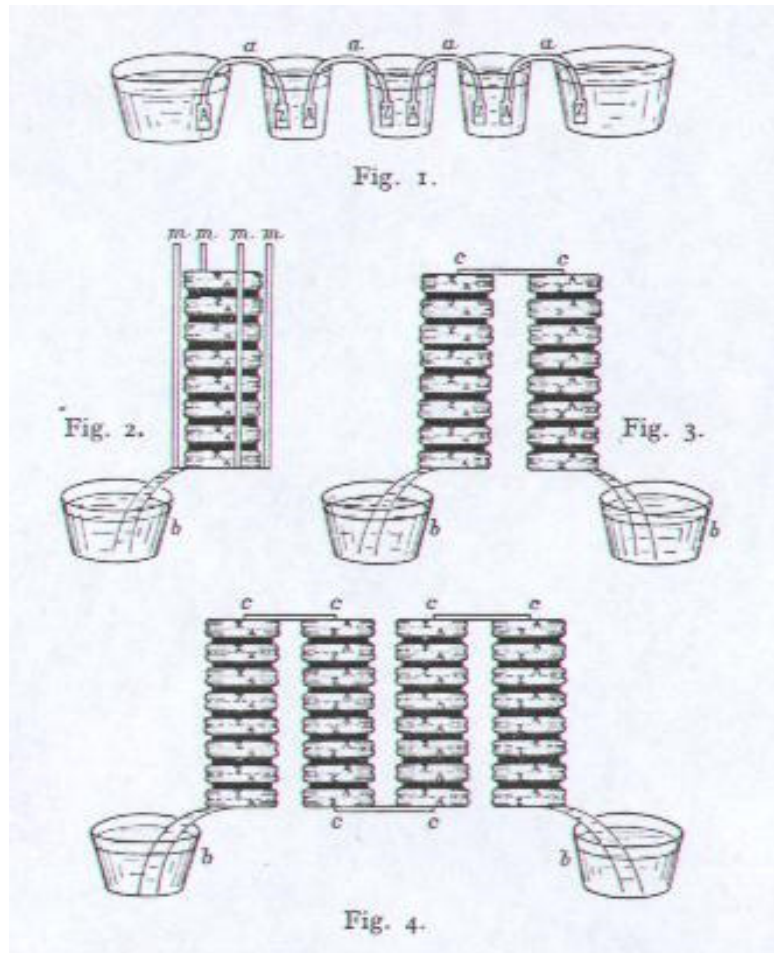
# *Organo elettrico naturale Natura magistra vitae ..et scientiae*

*Bio-ispirazione*



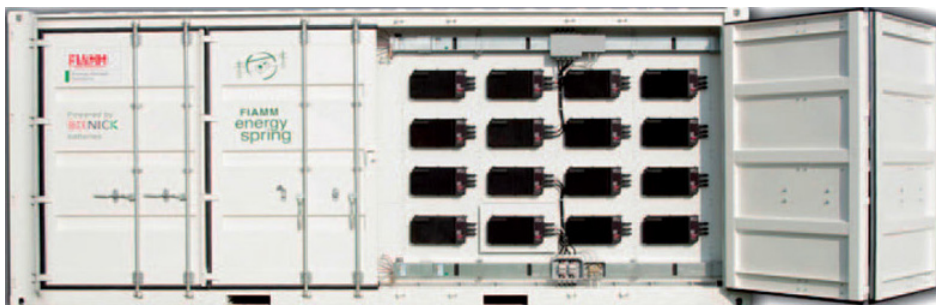


# *Organo elettrico artificiale*



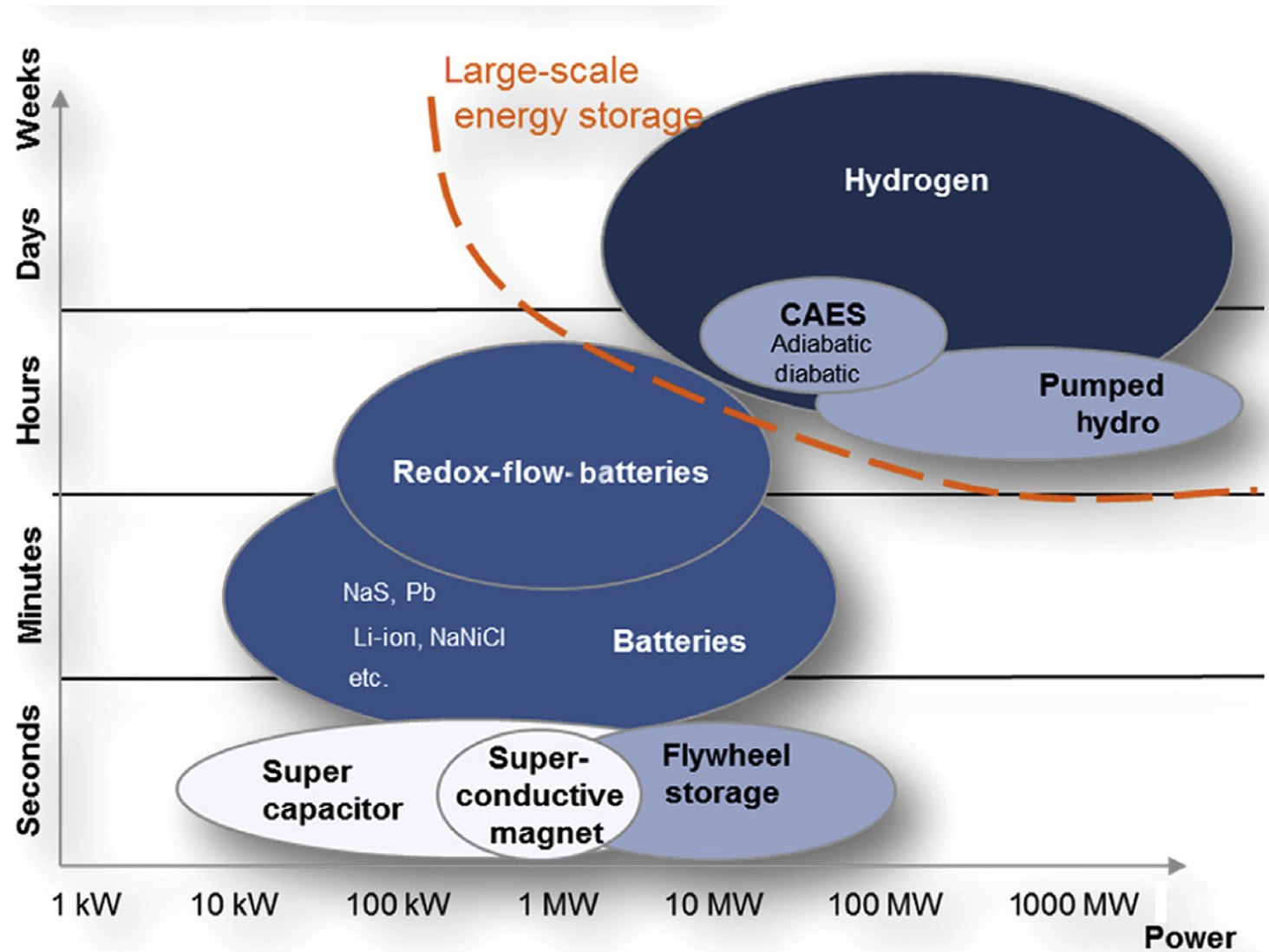
*CURIOSITÀ per ricordare lo  
spirito italico:  
dedizione di Volta per  
l'elettrotecnica era tale che  
Amperometro di precisione  $\equiv$  LINGUA  
PILA ...QUIDEM TOTA  
NOSTRA EST*

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



***Altro primato italiano?***

# *VARI TIPI di ACCUMULO*



© Siemens AG 2014 All rights reserved.



## TIPI DI CELLA

*Secondo la natura elettrochimica delle sostanze reagenti, si possono distinguere i seguenti tipi di accumulatori:*

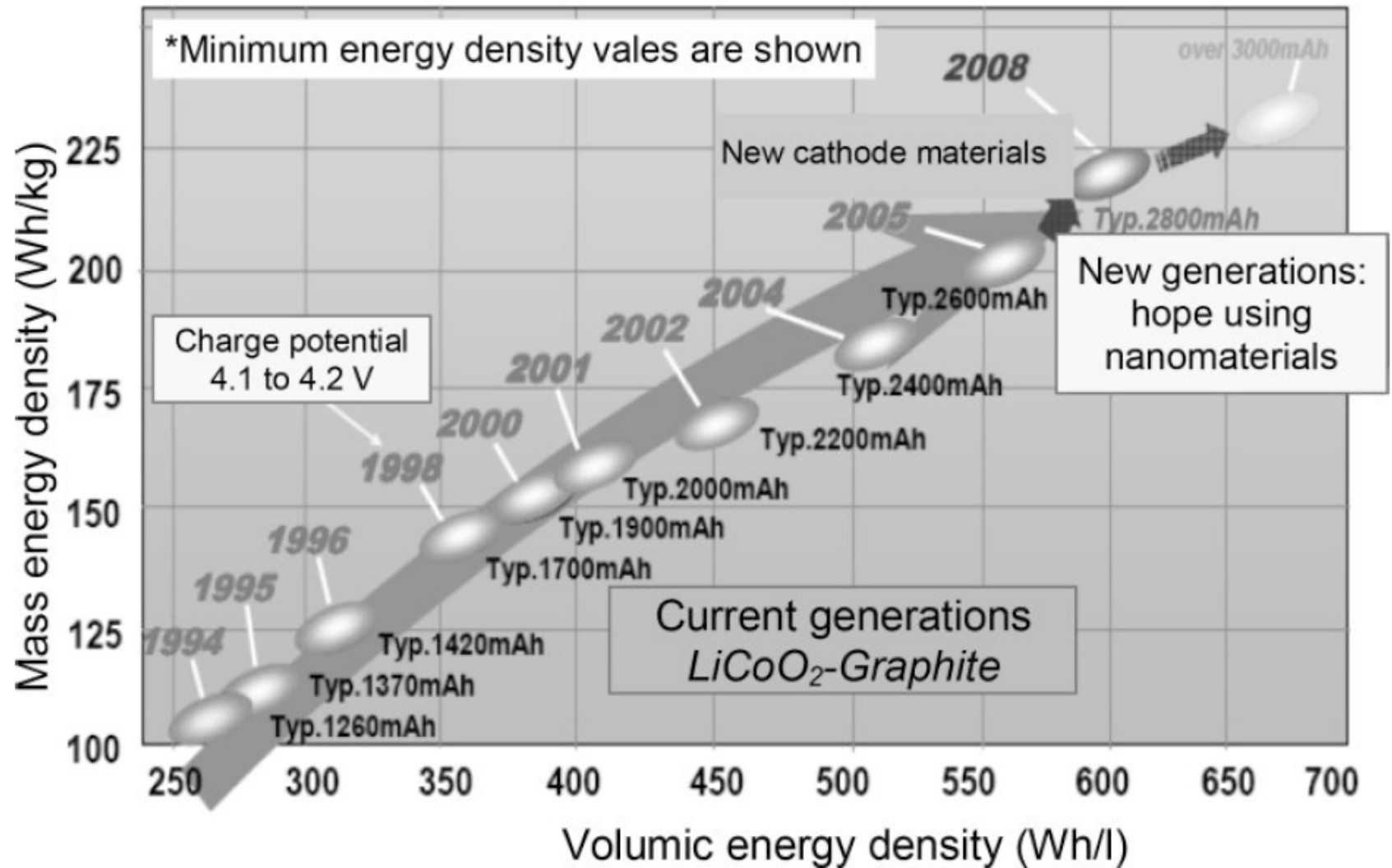
- al piombo (elettrodo negativo di Pb e positivo di  $\text{PbO}_2$ ),*
- al nichel-cadmio (elettrodo negativo di Cd e positivo di  $\text{NiO(OH)}$ ),*
- al nichel metalloidruido o idruido di nichel Ni-MH (Metal Hydride),*
- agli ioni di litio (elettrodo negativo di C (carbonio) e positivo di  $\text{LiCoO}_2$  o  $\text{LiNiO}_2$  o  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ );*
- Al nichel idrogeno ( $\text{NiH}_2$ ) (solo per applicazioni spaziali).*

*Di questi, solo il primo è ad elettrolita acido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ); gli altri, tutti ad elettrolita alcalino (in genere KOH). Esistono però anche delle celle con elettrolita ceramico come la beta allumina con formula chimica  $\beta\text{'-Al}_2\text{O}_3$ . Le celle che usano tale elettrolita sono le sodio-zolfo (Na-S) e le sodio-cloruro di nichel ( $\text{Na-NiCl}_2$ ) anche conosciute con il nome ZEBRA o batterie al sale.*



# BATTERIE agli IONI di LITIO

*EVOLUZIONE DALL'INGRESSO NEL MERCATO DELL'ENERGIA  
SPECIFICA VOLUMETRICA E PONDERALE delle batterie agli ioni di litio*



## BATTERIE agli IONI di LITIO

*Per valicare il limite dei 150 Wh/kg cosa si sta facendo in Italia?*

*Istituto Italiano di Tecnologia (iit) a Genova sta indagando sul GRAFENE. Ha prodotto degli inchiostri al grafene che possono essere «stampati» su supporti flessibili (ELETTRONICA DEFORMABILE).*

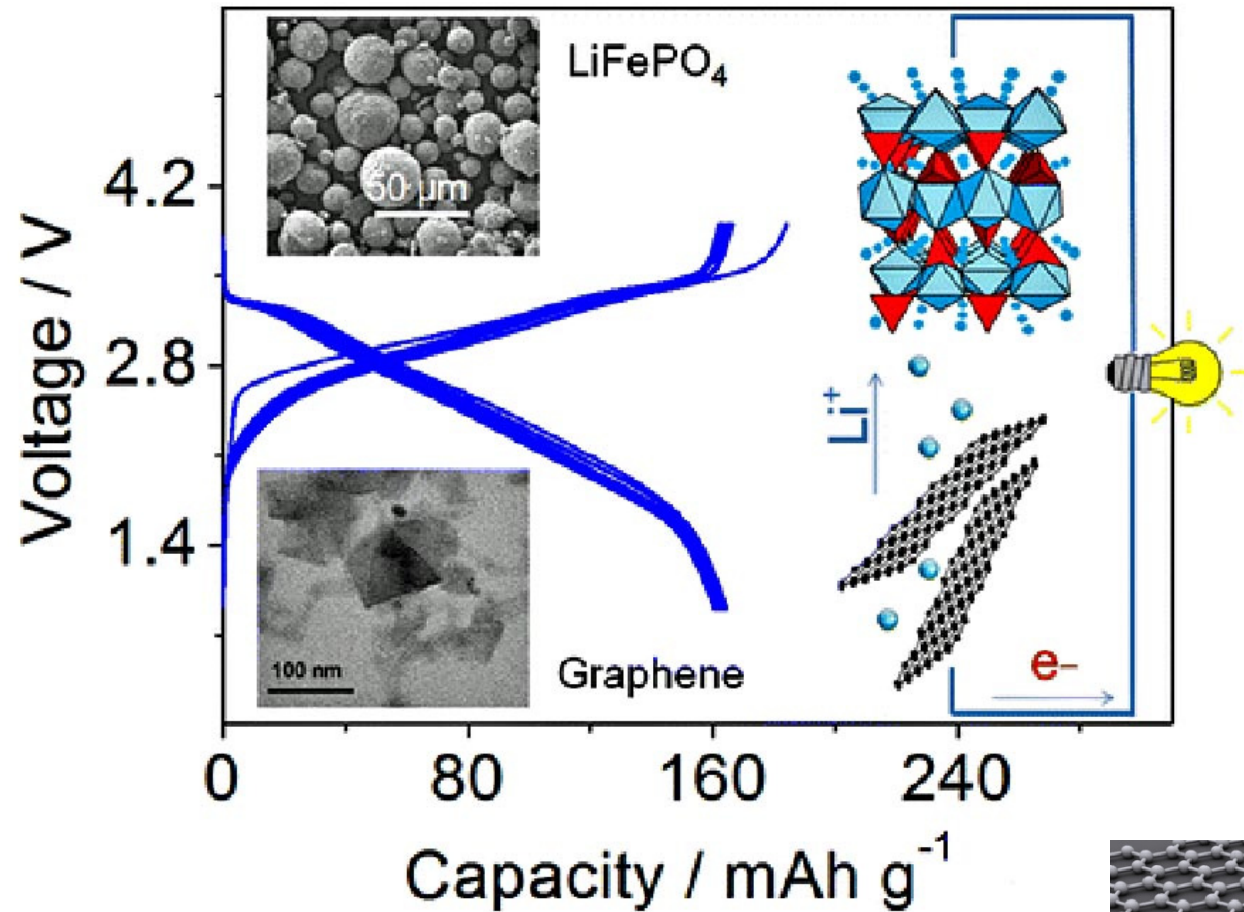
*Hanno prodotto la prima batteria agli ioni di litio con anodo trattato al grafene.*

# **BATTERIE agli IONI di LITIO e GRAFENE**

*«Abbiamo relazionato intorno a una batteria agli ioni-litio con anodo in inchiostro al grafene e catodo al litio ferro fosfato. Bilanciando attentamente la composizione cellulare e sopprimendo la capacità irreversibile iniziale dell'anodo nel giro di pochi cicli, abbiamo dimostrato una prestazione ottimale della batteria in termini di capacità specifica, che è, 165 mAh/g, di una densità di energia stimata di circa 190 Wh/kg ed un funzionamento stabile per oltre 80 cicli di carica-scarica. I componenti della batteria sono a basso costo e potenzialmente riducibile. Per quanto a nostra conoscenza, batterie a base di grafene, agli ioni di litio con prestazioni paragonabili a quelle offerte da questa tecnologia sono raramente riportati; di conseguenza, riteniamo che i risultati esposti in questo lavoro possono aprire nuove opportunità di sfruttamento del grafene nella tecnologia delle batterie agli ioni di litio.»*

**Tradotto da An Advanced Lithium-Ion Battery Based on a Graphene Anode and a Lithium Iron Phosphate Cathode *Nano Lett.*, 2014, 14 (8), pp 4901–4906 DOI: 10.1021/nl502429m**

**prof. ING. ROBERTO BENATO - UNIVERSITÀ di PADOVA**

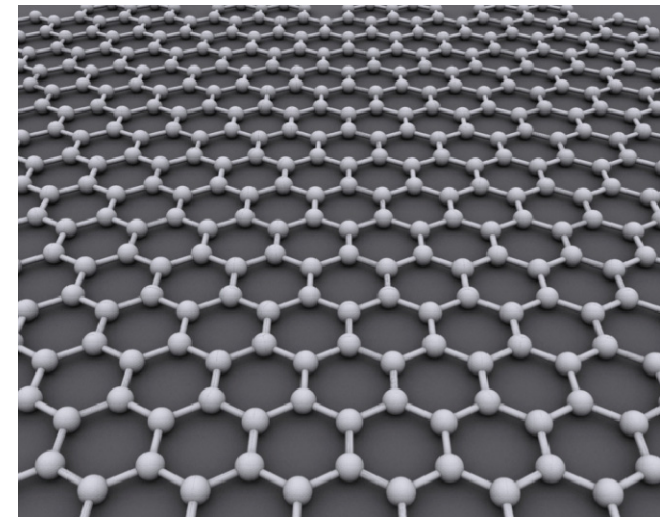


Spessore=0,4 nm

Resistività= 0,01 Ωmm<sup>2</sup>/m

(cfr. Cu con  $\rho_{Cu}=0,0172 \Omega mm^2/m$ )

prof. ING. ROBERTO BENATO - UNIVERSITÀ di PADOVA





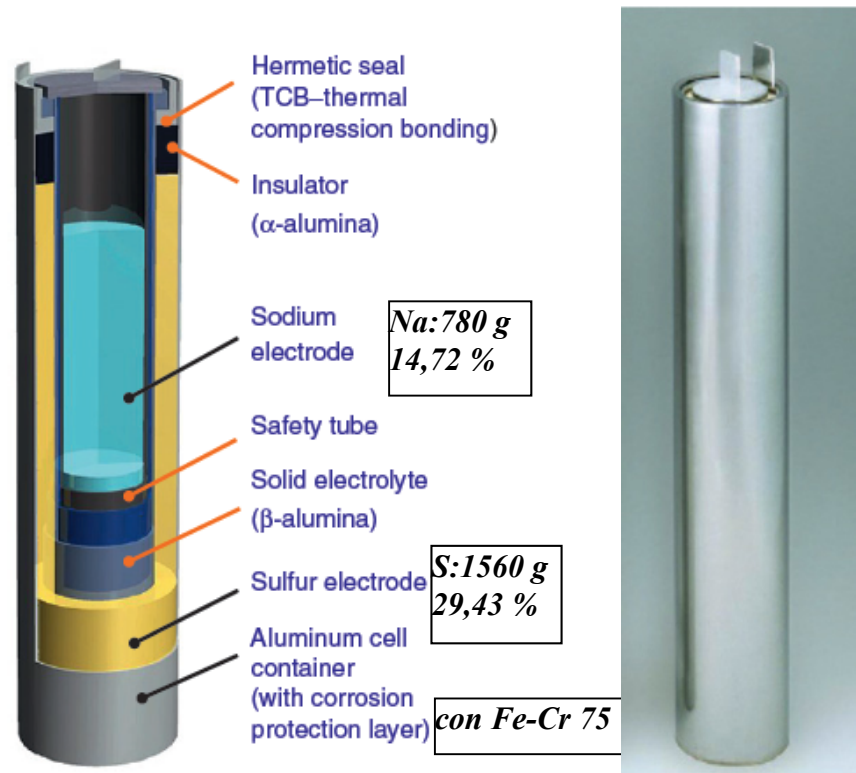
# *CELLE Na-BETA*



# PECULIARITÀ DELLE CELLE Na-BETA

- *La parte anodica è costituita da Sodio (Na)*
- *Viene utilizzato un elettrolita sotto forma ceramica, la beta-allumina ( $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) la cui conducibilità ionica (agli ioni sodio) aumenta con la temperatura. Come ordine di grandezza, a  $350^\circ\text{C}$  essa vale circa  $0,4 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ .*
- *Ottenere un'elevata conducibilità ionica implica la necessità di tenere la cella ad alta temperatura (tra  $280^\circ\text{C}$  e  $350^\circ\text{C}$ ).*

# *NaS: STRUTTURA DI UNA CELLA*



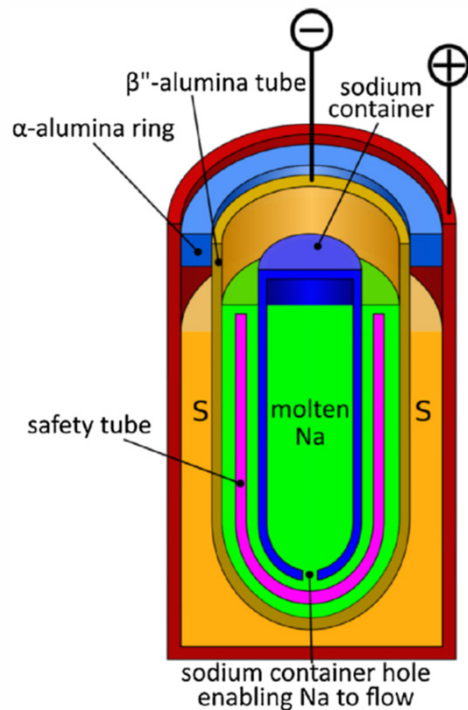
- ✓ *la cella è di forma cilindrica;*
- ✓ *l'elettrodo negativo (o anodo) è costituito da sodio allo stato Fuso;*
- ✓ *La  $\beta$ -allumina ceramica assume la forma a "bicchiere";*
- ✓ *l'elettrodo positivo (o catodo) è costituito da zolfo sotto forma di feltro di grafite.*

*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*

## Aspetti di sicurezza

### NaS: SICUREZZA INTERNA ALLA CELLA

**1° livello**



*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: CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLA CELLA*

OCV [V] a piena carica e media di scarica	2,08
Tensione di fine scarica dichiarata dal costruttore [V]	1,82
Capacità [Ah]	632 ad esempio 79 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 congelamento/scongelo (freeze-thaw)	Superiori a 20
Energia specifica volumetrica [kWh/m <sup>3</sup> ] o [Wh/l]	392
Energia specifica ponderale [Wh/kg]	248

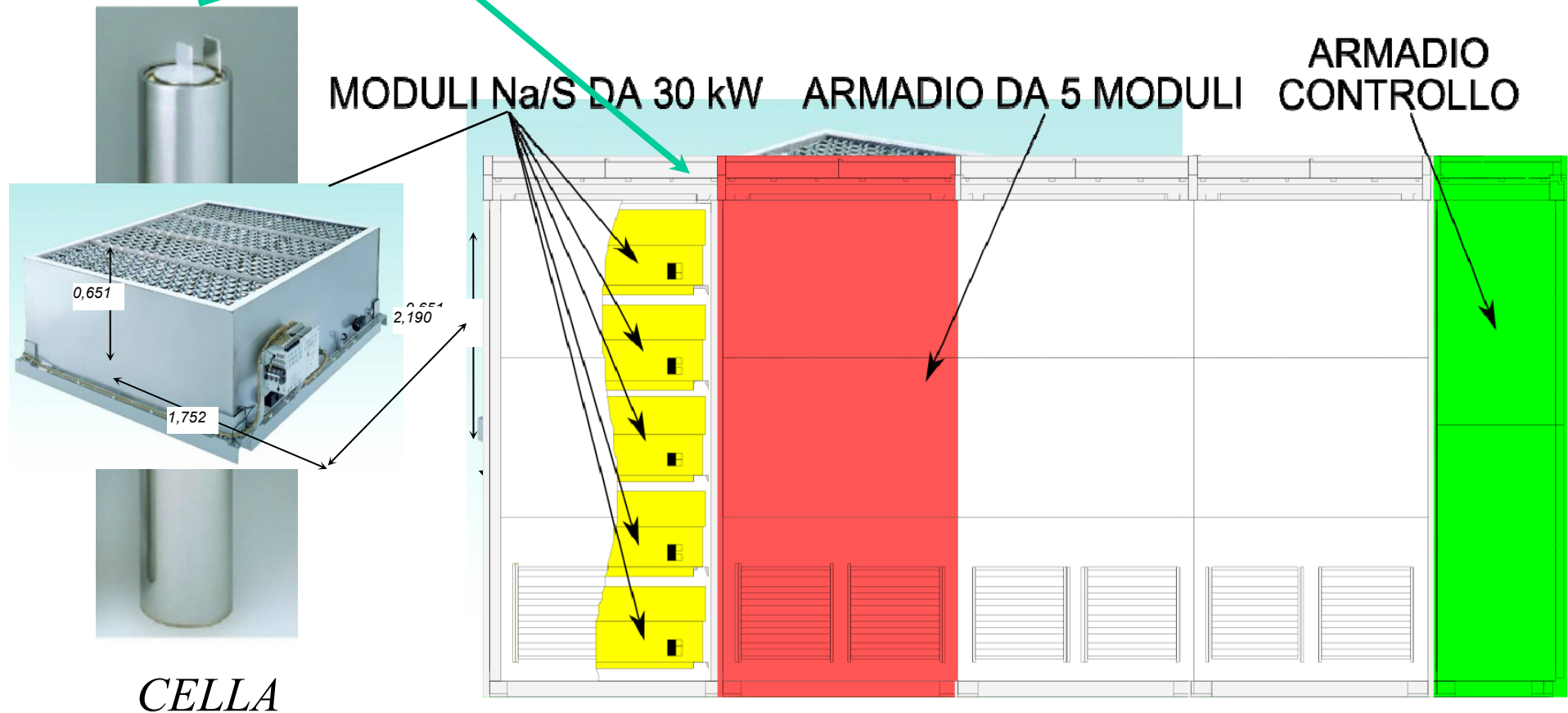
✓ *Energia specifica ponderale  
(248 Wh/kg) e volumetrica  
estremamente alte;*

✓ *Assenza di aut scarica (no  
carica di mantenimento);*

✓ *Assenza di effetto memoria  
(no reconditioning);*

# NaS

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



## Modulo NaS

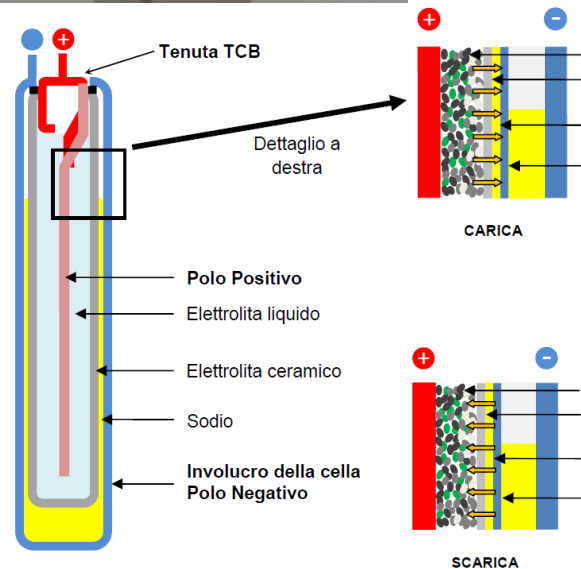
Potenza in scarica normale	31,6 kW
Tensione cc nominale e composizione delle celle	$\cong 32 \text{ V}$ $4s \times (14p \times 4s)$
Potenza di ricarica nominale	28,5 kW
Energia elettrica immagazzinata	227 kWh
Temperatura della batteria all'avvio	300°C
Dimensioni [m]	1,858 L $\times$ 1,592 P $\times$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

✓ *Energia  
specifica  
ponderale  
crolla a  
75 Wh/kg*

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



- ✓ *la cella è di forma parallelepipedica;*
- ✓ *l'elettrodo positivo (o anodo) 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  $\text{NaAlCl}_4$ )



# *NaNiCl<sub>2</sub>: 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 V <sub>pc</sub> 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 (140 Wh/kg) e volumetrica alte;*

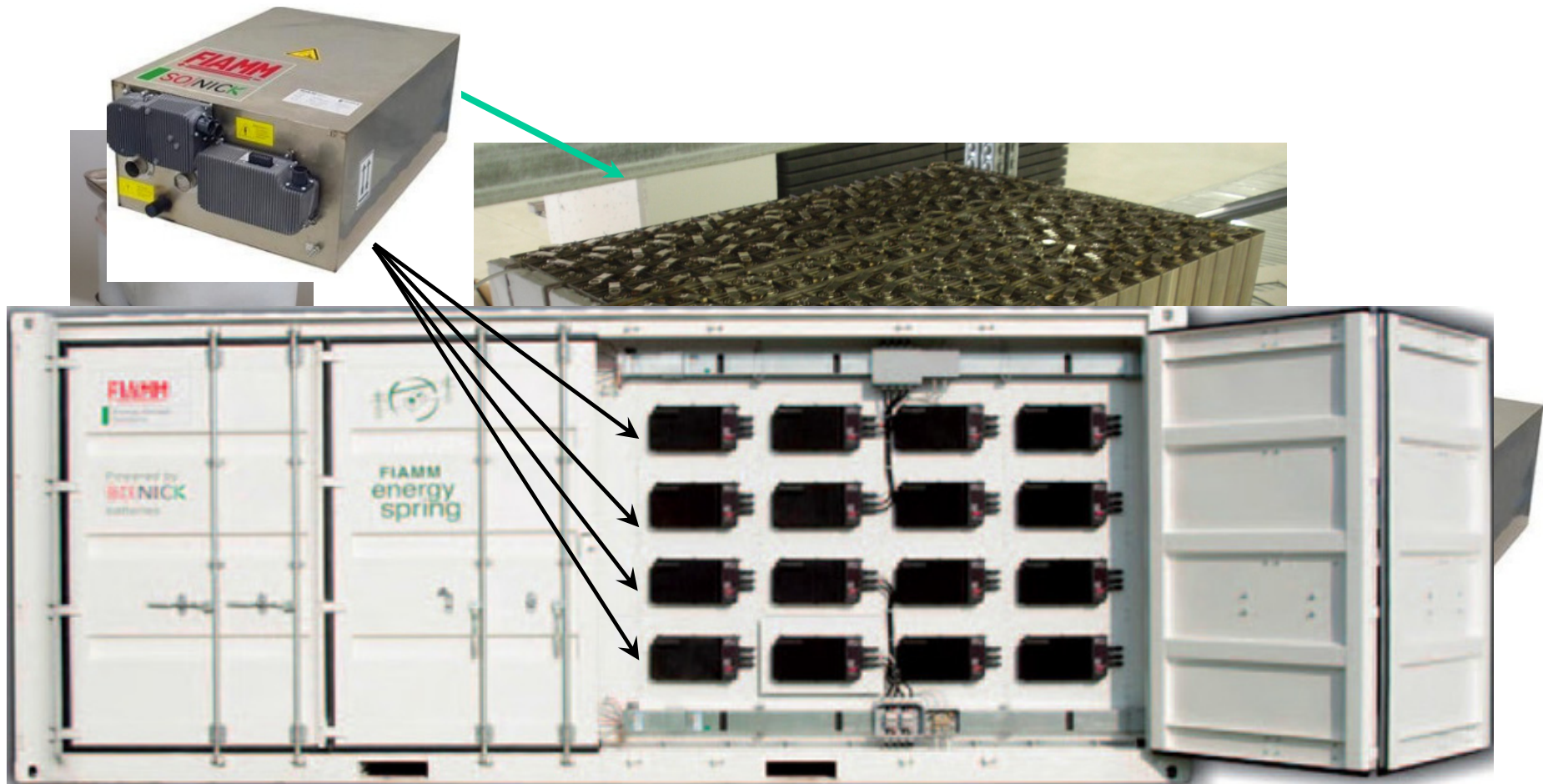
✓ *Assenza di autoscarica (no carica di mantenimento);*

✓ *Assenza di effetto memoria (no reconditioning);*

✓ *PRESENZA CATOLITA tetracloroalluminato di sodio*



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



## Modulo $\text{NaNiCl}_2$

Potenza in scarica normale	7,8 kW (tempo di scarica 3 h)
Tensione cc nominale et composizione delle celle	620 V <u>1 stringa di 240 celle in serie</u>
Potenza di ricarica nominale	6 kW
Energia elettrica immagazzinata	23,5 kWh
Temperatura della batteria all'avvio	240 °C
Dimensioni	862 (1016 con Battery Management System - BMS) L × 556 P × 389 A (mm)
Vita calendariale / cicli di vita in funzione del DoD	15 anni / 4500 cicli DOD 80%
Peso	≅ 256 kg
Numero cicli di congelamento- scongelamento	nessuna limitazione
Energia specifica ponderale [Wh/kg]	<b>~92</b>

## 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 [MWh]	1,5
Tensione Minima di sistema [V <sub>dc</sub> ]	450
Tensione Massima di sistema [V <sub>dc</sub> ]	700
Design del circuito	64 moduli batteria collegati in parallelo
Efficienza [%]	93
Ventilazione:	ventilazione forzata nella zona BMS
Peso complessivo con moduli e tutto il necessario montato [t]	25
Tara [t]	4,4
Capacità [m³]	34,08
Energia specifica volumetrica [kWh/m³]	44
Energia specifica ponderale [Wh/kg]	<b>60</b>

*Modulo  $\text{NaNiCl}_2$*   
*Collegamento serie di 224 celle! Perché?*  
*CUM GRANO SALIS !*

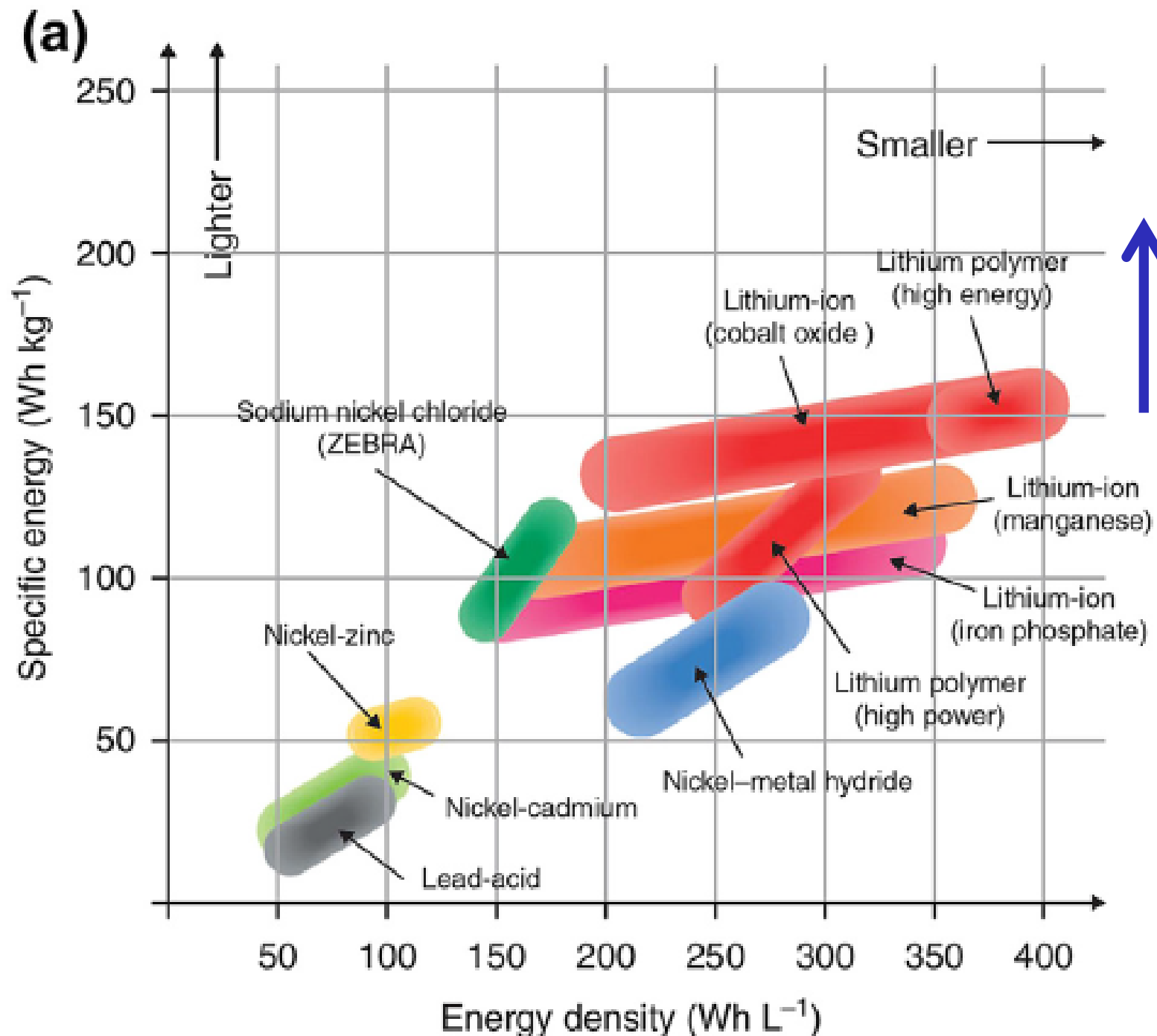
*Il motivo va ricercato all'interno della cella e nella presenza del catolita tetracloroalluminato di sodio che nel caso di rottura della  $\beta''$ -allumina forma sale e alluminio che cortocircuita la cella:*



*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*





## *CONFRONTO Conclusivo sulle batterie*

<i>Tipologia</i>	<i>Energia specifica (Wh/kg)</i>	<i>Densità di energia (Wh/l)</i>
<i>Pb</i>	<i>30</i>	<i>100</i>
<i>Ni-Cd</i>	<i>15÷50</i>	<i>50÷100</i>
<i>NiMH</i>	<i>50÷70</i>	<i>140÷180</i>
<i>Na-S</i>	<i>248 (riferito alla cella)</i>	<i>392</i>
<i>Na-NiCl<sub>2</sub></i>	<i>140</i>	<i>280</i>
<i>Li-ion</i>	<i>90÷150</i>	<i>150÷250</i>

*GRAFENE ?*

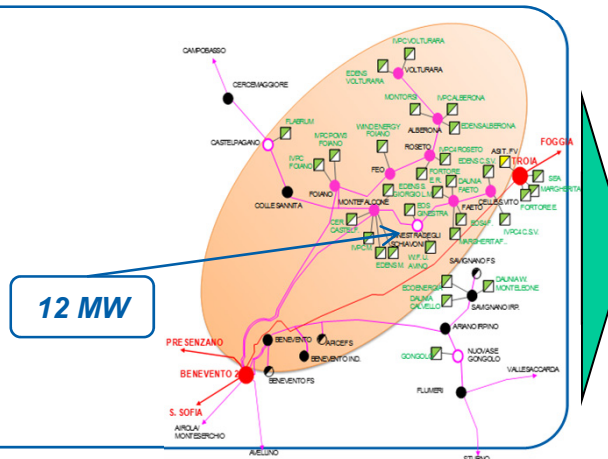
# *ITALIA: 34,8 MW ACCUMULO ELETTOCHIMICO DI TIPO Energy Intensive*

- *Energy intensive: capacità di effettuare fasi di carica e fasi di carica a potenza nominale per numero di ore consecutive > 7;*
- *Integrazione con sistemi di previsione generazione FRNP*

# 34,8 MW ACCUMULO Energy Intensive: TECNOLOGIA Na-S (NGK)

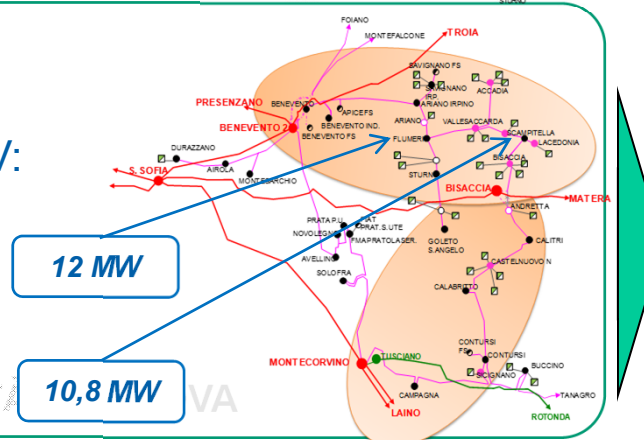
## Realizzazioni

Nel Sud Italia su direttrice 150 kV:  
***“Benevento 2 – Celle San Vito”***  
**12 MW**



Ginestra

Nel Sud Italia su direttrice 150 kV:  
***“Benevento 2 – Bisaccia 380”***  
**22,8 MW**



Flumeri

Scampitella

# *34,8 MW ACCUMULO Energy Intensive: TECNOLOGIA Na-S (NGK)*

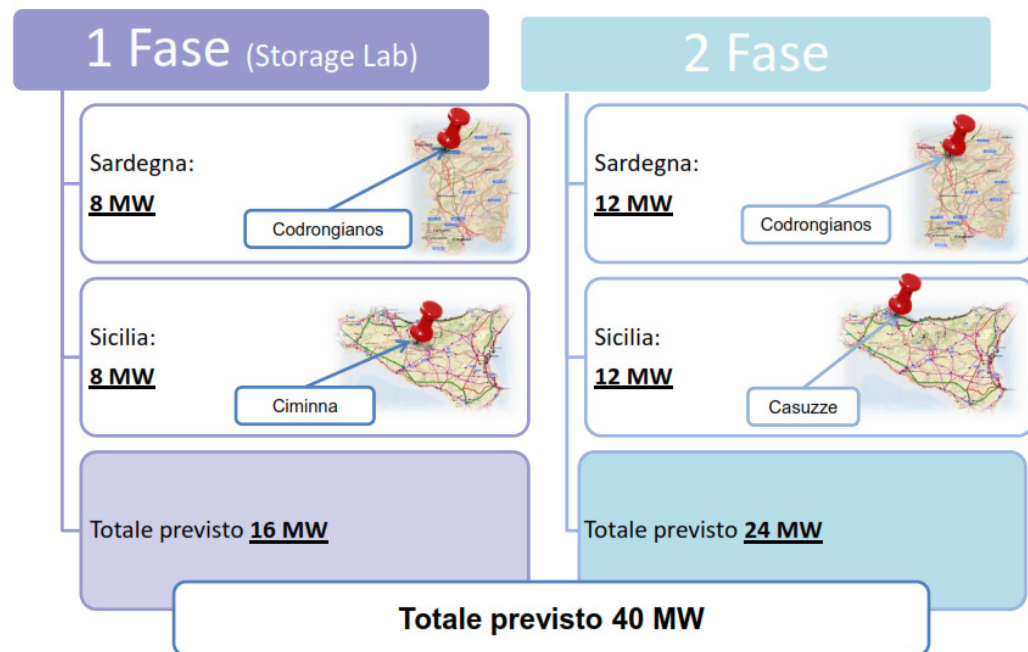


## *Installazioni di Ginestra*

prof. ING. ROBERTO BENATO - UNIVERSITÀ di PADOVA



# ITALIA: 40 MW ACCUMULO POWER INTENSIVE



Tipologia di accumulo	Descrizione
Litio-ioni	LiNiCoAlO <sub>2</sub> 
	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 
	LiFePO <sub>4</sub> 
	LiNiMnCoO <sub>2</sub> 
	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> 
ZEBRA	Na-NiCl <sub>2</sub>  

•Power o peak intensive: capacità di effettuare fasi di carica e fasi di scarica in tempi molto rapidi (si ricordi che la regolazione primaria della frequenza si estrinseca in 20 s)

# ***ITALIA: circa 8 MW ACCUMULO POWER INTENSIVE già installate a Codrongianos in Sardegna***

<b>Power [MW]</b>	<b>Energy [MWh]</b>	<b>Electrochemistry</b>
<b>1</b>	<b>1.231</b>	<b>Lithium Iron Phosphate</b>
<b>1.2</b>	<b>0.928</b>	<b>Lithium Nickel Cobalt Aluminium</b>
<b>1</b>	<b>0.916</b>	<b>Lithium Manganese Oxide</b>
<b>1.08</b>	<b>0.540</b>	<b>Lithium Nickel Cobalt Manganese</b>
<b>1</b>	<b>1.016</b>	<b>Lithium Titanate</b>
<b>1.2</b>	<b>4.15</b>	<b>Sodium–nickel chloride</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Sodium–nickel chloride</b>

# *ITALIA: 40 MW ACCUMULO POWER INTENSIVE: Codrongianos*

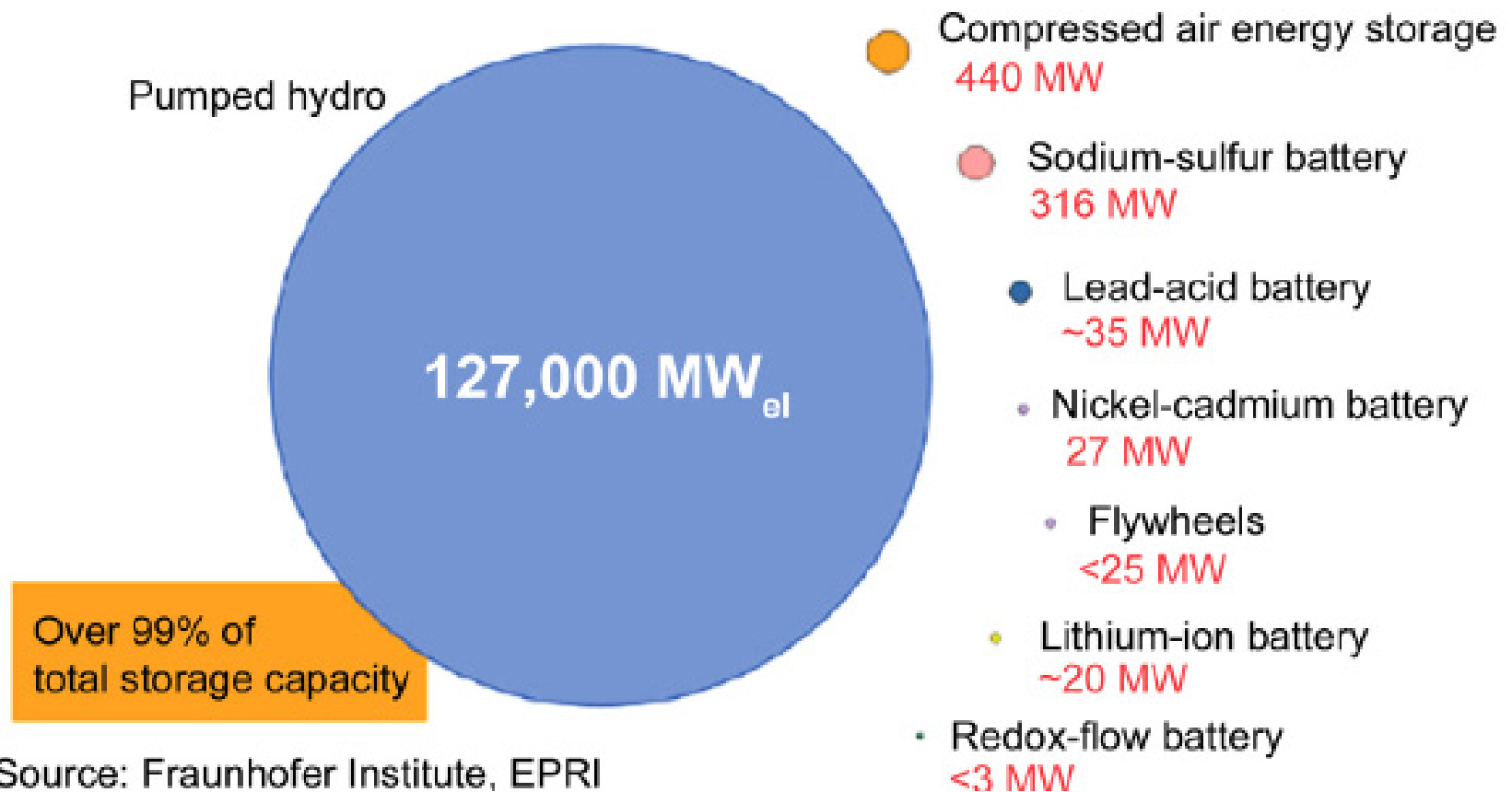


prof. ING. ROBERTO BENATO - UNIVERSITÀ di PADOVA

## *ITALIA: che servizi possono fare le batterie sulla rete elettrica?*

- *Svincolare la produzione dall'utilizzo (sogno antico) resolvendo le congestioni e riducendo la mancata produzione;*
- *Regolazione primaria della frequenza (energia regolante);*
- *Regolazione secondaria della frequenza (segnale di livello);*
- *INERZIA SINTETICA (si comporta come una massa rotante connessa alla rete c.a. a 50 Hz);*
- *Regolazione della tensione.*

# *Grande attenzione all'accumulo elettrochimico ma ....nel MONDO?*

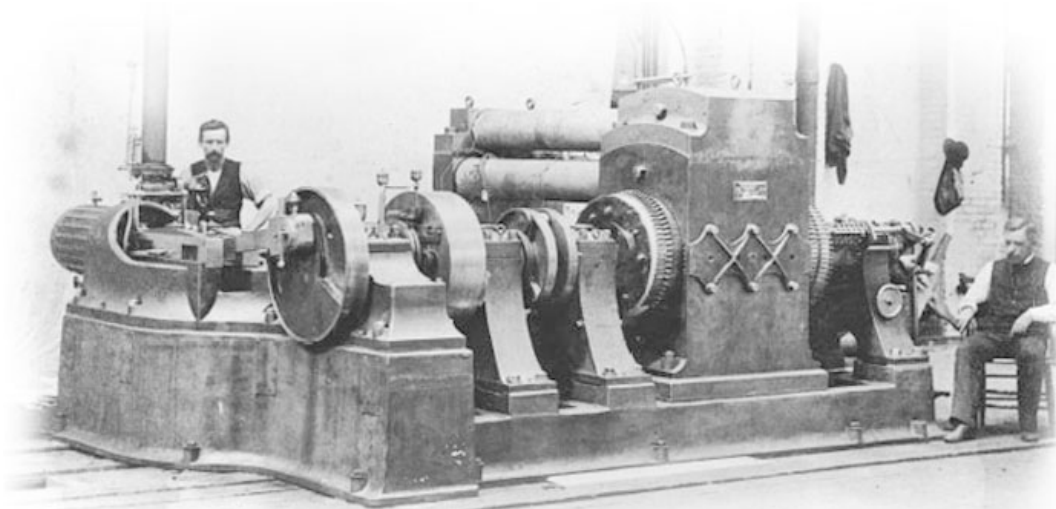


Source: Fraunhofer Institute, EPRI

**FIGURE 13.13** Worldwide installed storage capacity of electrical energy (EPRI 2010).



# TRASMETTERLA



**Dinamo Jumbo, 1882**

1882 Edison realizzava a New York il primo esempio di “impianto elettrico” per l’illuminazione di Pearl Street 400 lampade a filamento a 110V in c.c. collegate tramite **conduttori in cavo** a un generatore diesel-elettrico (JUMBO) da 125 HP pari a 93,2 kW.

# TRASMETTERLA OGGI



**Cavo armato  
tripolare a 50 Hz  
sottomarino che  
collega la  
Sardegna e la  
Corsica**

# ***L'IMPORTANZA DEI CAVI TRIPOLARI ARMATI SOTTOMARINI IN CORRENTE ALTERNATA***



***Tensione massima raggiunta:  
245 kV;***

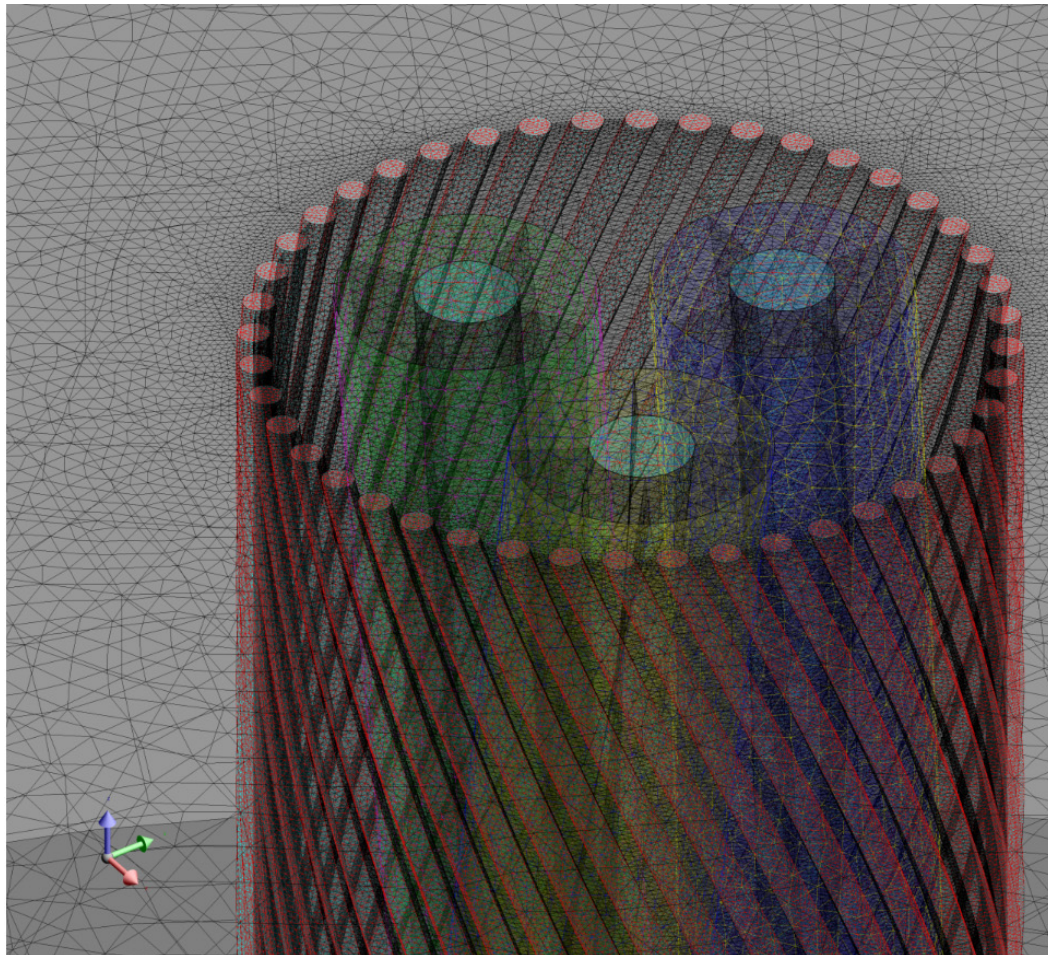
***Potenza massima trasmissibile:  
400 MVA;***

***Le fasi sono cordate con passo  
pari circa a 3 m;***

***I fili dell'armatura sono cordati  
con passo di cordatura pari a  
circa 2 m con direzione S-Z;***



**PRIMO MODELLO (PUBBLICATO IN LETTERATURA)**  
**AGLI ELEMENTI FINITI TRIDIMENSIONALE**  
**LUNGO 3 m**  
**HIC RHODUS HIC SALTA**



# **IL CALCOLO DELLE PERDITE SU FASI, SCHERMI IN PIOMBO E FILI DELL'ARMATURA IN ACCIAIO ZINCATO È MOLTO *IMPORTANTE* E *SFIDANTE* *PERCHÉ?***

- *serve per se ipso (efficienza energetica);*
- *serve per il dimensionamento del conduttore di fase per ottenere una certa portata di corrente;*
- *in un sistema in cui la posizione degli elementi conduttivi varia con continuità;*
- *forte disuniformità nelle distribuzioni di corrente (effetti pelle e prossimità).*



***Le perdite Joule sulle fasi, schermi e armatura vengono solitamente definite con i due parametri in p.u.  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  così definiti:***

$$\lambda_1 = \frac{P_{tot, schermi}}{P_{tot, fasi}}$$

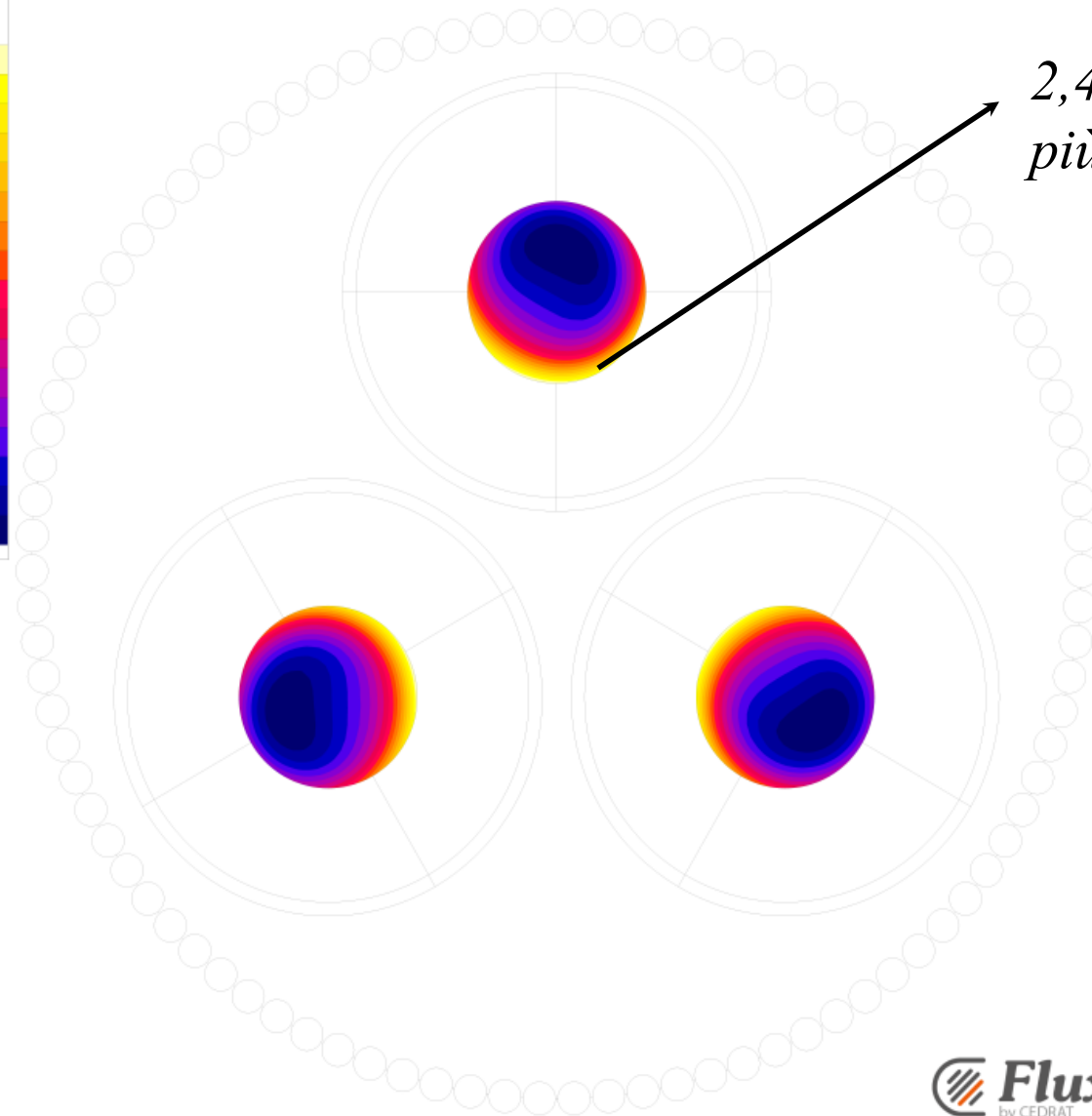
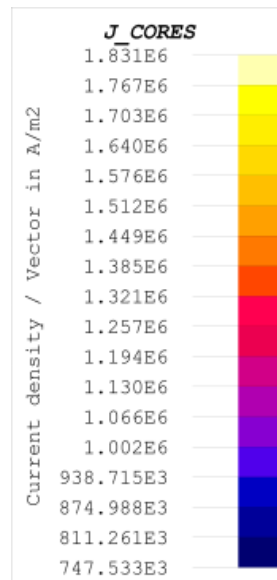
$$\lambda_2 = \frac{P_{armatura}}{P_{tot, fasi}}$$

# **PROCEDERE GRADUALMENTE: MODELLO BIDIMENSIONALE (assenza di cordature) E CONFRONTO TRA TUTTI I SOFTWARE DISPONIBILI**

	FEMM	FLUX2D	COMSOL2D	MAXWELL 2D	IEC 60287
Average phase current magnitude [A]	800	800	800	800	800
Induced screen a current magn. [A]	134.6750	135.1431	135.1524	135.1148	-
Induced screen b current magn. [A]	134.6746	135.1435	135.15202	135.1194	-
Induced screen c current magnitude [A]	134.6698	135.1437	135.1519	135.1214	-
Armour current magnitude [A]	0.0109	0.000268	0.000867	0.009076	-
Total losses [W/m]	68.8650	68.9520	68.9575	68.9649	96.3215
Average phase power losses [W/m]	14.4401	14.4370	14.4374	14.4428	14.6545
$\lambda_1$	<u>0.4077</u>	<u>0.4107</u>	<u>0.4108</u>	<u>0.4105</u>	<u>0.5950</u>
$\lambda_2$	<u>0.1818</u>	<u>0.1812</u>	<u>0.1813</u>	<u>0.1811</u>	<u>0.5960</u>

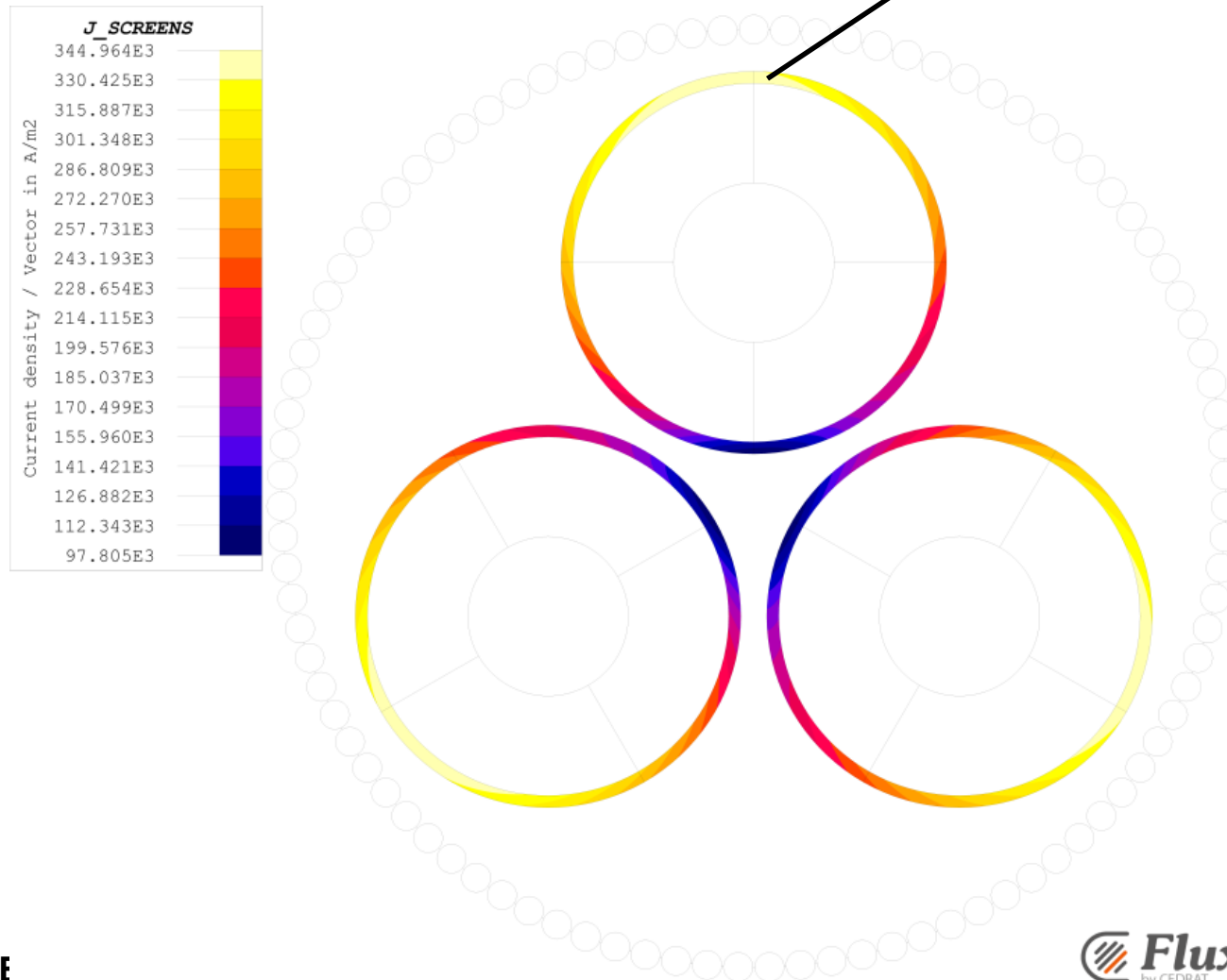
- **2D tutti i software sono allineati;**
- **La IEC 60287 -1-1 sovrastima le perdite sia negli schermi sia, pesantemente, nell'armatura (anche senza cordature !).**

# Densità di corrente in A/m<sup>2</sup> su fasi

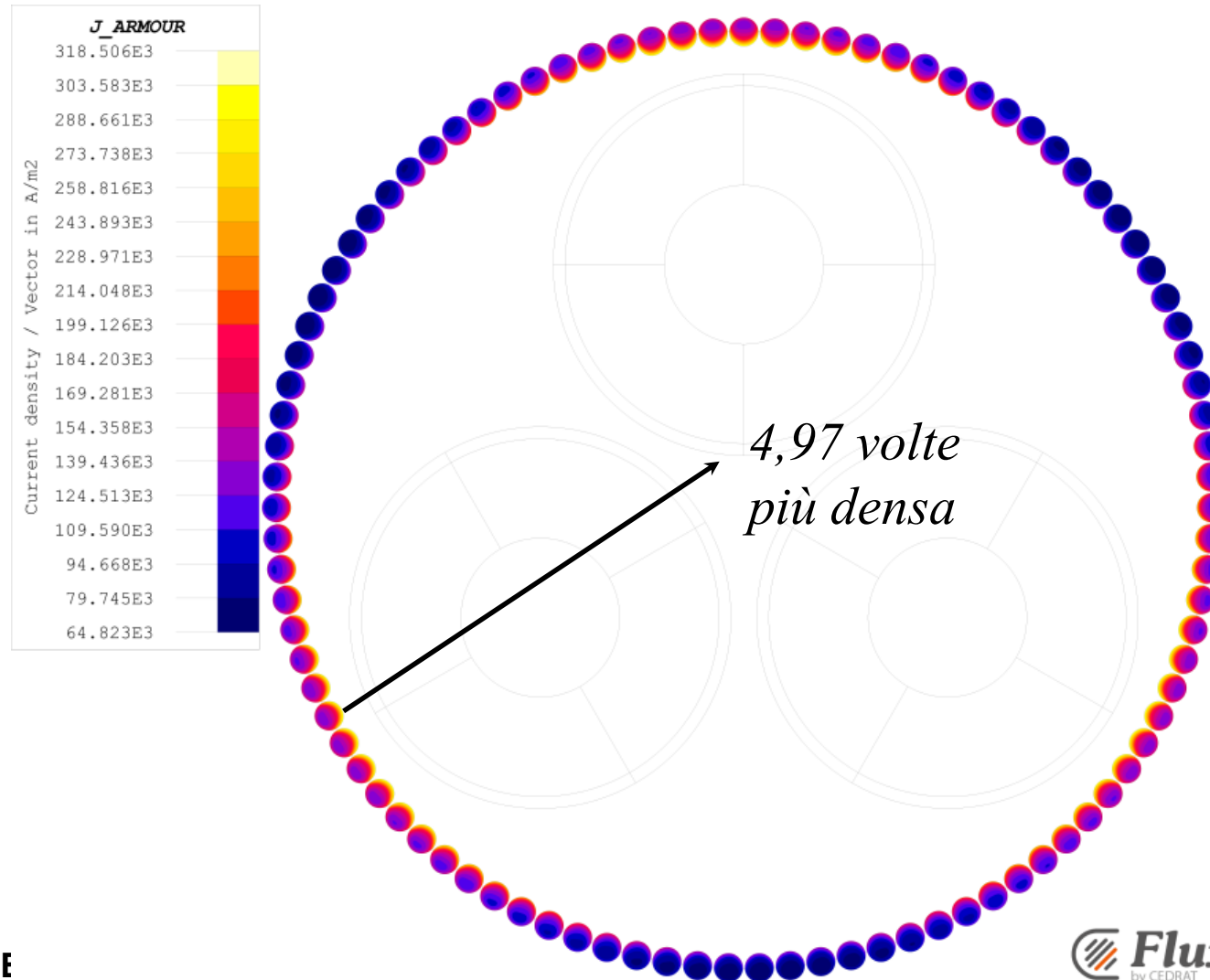


# Densità di corrente in $A/m^2$ su schermi

3,55 volte  
più densa



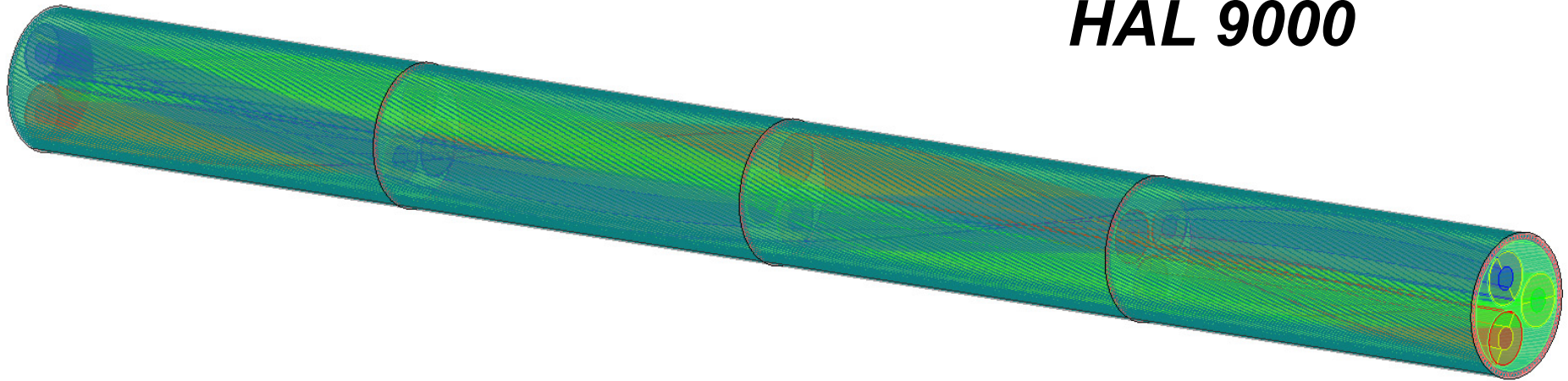
# ***Densità di corrente in A/m<sup>2</sup> su fili d'armatura***





***POI ... MODELLO TRIDIMENSIONALE (con  
cordature) lungo 3 m (passo di cordatura delle fasi)  
E CONFRONTO TRA TUTTI I SOFTWARE***

***HAL 9000***



- ***Solo FLUX 3D !***
- ***Su un SUPER PC:*** Dell Precision T7610 workstation, 128 GB RAM, 6 core Intel XEON E5
- ***TEMPI: 70 h [MESH (55 h); SOLVER MUMPS (15,25 h)]***

# ***IL MODELLO FEM HA:***

- ***18 milioni di elementi tetraedrici del primo ordine;***
- ***3 milioni di nodi;***
- ***11 milioni d'incognite;***

## **CONCLUSIONI su TRASMISSIONE**

- ***Non esiste nessun modello agli elementi finiti (e neppure con qualsiasi altro metodo) in letteratura più lungo di 1 m;***
- ***Le norme IEC 60287-1-1 danno una forte sovrastima delle perdite sull'armatura anche nel caso puramente teorico di assenza di cordatura;***
- ***Primo modello lungo 3 m agli elementi finiti ottenuto con software commerciale FLUX 3D: tempi di 70 h (MESH+SOLVER) su super PC;***
- ***NECESSARIO UN APPROCCIO DIVERSO (MCA ?) che consenta il calcolo delle perdite Joule nell'arco dei minuti (secondi?) NON su un «super» PC.***

# **CONCLUSIONI**

**IMPORTANZA E INELUDIBILITÀ** dell'en. elettrica sebbene per gli altri ... «vecia» ed esistente se inesistente (ossimoro ontologico) e scontata;

**ACCUMULO E TRASMISSIONE DI ACQUA, VENTO E SOLE.** Non siamo gli dei ma uomini per gli uomini (energia elettrica sapit hominem);

**ACCUMULO ELETTROCHIMICO:** ricerca di un dipartimento di ingegneria industriale deve seguire l'industria dei produttori e i gestori di rete che vogliono installare accumulo elettrochimico (modelli elettrici e d'invecchiamento, modelli del sistema di conversione per i diversi servizi previsti);

**TRASMISSIONE:** cavi tripolari armati sottomarini

# GRAZIE

## della «ardente pazienza»

