

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria dell’Energia Elettrica

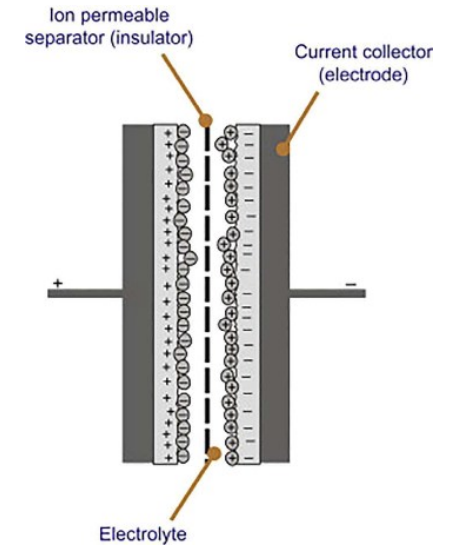
# ***L'utilizzo dei supercondensatori nelle applicazioni stazionarie***

**Tutor universitario:** *Prof. A. Trovò*

**Laureando:** *Davide De Coppi*

I supercondensatori sono composti da due elettrodi separati da una membrana permeabile agli ioni e da un elettrolita liquido che collega ionicamente i due elettrodi e dei collettori di corrente.

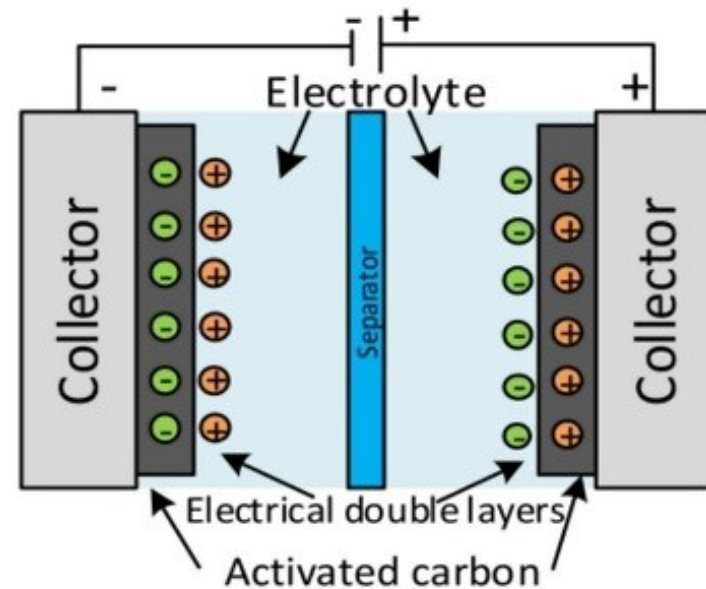
VANTAGGI	SVANTAGGI
Alta densità di potenza	Bassa densità di energia
Velocità di carica e scarica elevate	Costo elevato per unità di energia
Elevata vita ciclica	Alto tasso di aut scarica
Ampio intervallo di temperatura operativa	Bassa tensione di cella
Alta efficienza	
Alta affidabilità	
Alta tolleranza alla scarica profonda	
Basso costo per ciclo	



Principio di funzionamento puramente elettrostatico → Nessun trasferimento di carica tra elettrodo ed elettrolita.

L'accumulo di energia avviene attraverso la formazione di un "doppio strato elettrico".

Questo strato si forma all'interfaccia tra la superficie dell'elettrodo e l'elettrolita quando viene applicata una tensione.



## Carbone attivo

- Materiale più utilizzato
- Costo molto basso
- Eco-friendly
- Area superficiale specifica molto grande
- Opera a tensioni basse

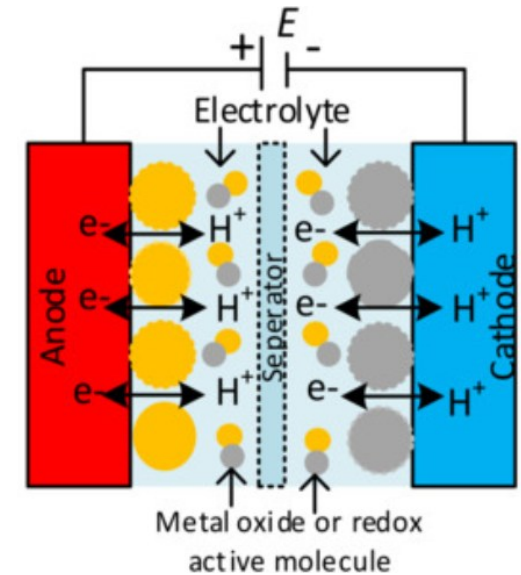
**Grafene**

**Aerogel**

**Nanotubi di Carbonio**

## PSEUDOCONDENSATORI (PC)

- A metà strada tra un EDLC e una batteria.
- Sfruttano reazioni redox faradaiche rapide e reversibili, simili a quelle delle batterie
- Capacità specifica e una densità di energia > EDLC (10-100 volte)
- Densità di potenza e stabilità ciclica < EDLC.



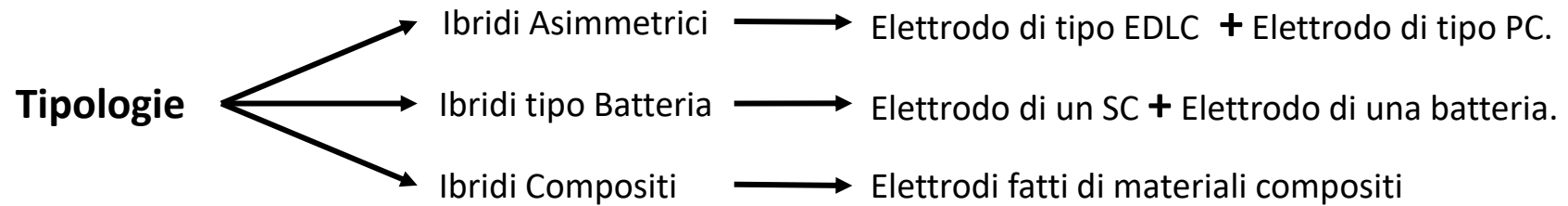
## Ossidi metallici

- Elevata capacità specifica e alla varietà di stati di ossidazione
- Bassa conducibilità elettrica
- Subiscono cambiamenti volumetrici durante le reazioni
- Tra gli ossidi metallici più usati sono presenti: Ossido di rutenio ( $RuO_2$ ), Ossido di manganese ( $MnO_2$ ), Ossido di nichel ( $NiO$ ), Ossido di cobalto ( $Co_3O_4$ )

## Polimeri Conduttivi

- Buona conducibilità elettrica
- Bassa ESR
- Alta capacità specifica
- Costi di produzione simili ai materiali carboniosi
- Fragilità meccanica
- Bassa stabilità del materiale
- Durata ciclica inferiore rispetto agli EDLC

Combinano materiali o meccanismi diversi per ottenere prestazioni superiori, sfruttando i punti di forza di un materiale per compensare le debolezze di un altro.



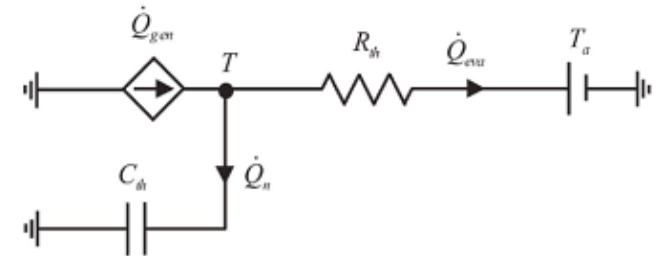
VANTAGGI	SVANTAGGI
Prestazioni Migliorate	Velocità diverse di carica-scarica degli elettrodi
Maggiore densità energetica	Elettrodi non sfruttati pienamente
Maggior tensione operativa	Tecnologia non matura
Maggior intervallo di temperatura operativa	
Alta sicurezza	

## 1. MODELLI ELETTROCHIMICI

- **Principio:** Descrivono fedelmente i processi di reazione reali che avvengono all'interno della cella del SC, come l'effetto del doppio strato elettrico, la mobilità degli ioni e la diffusione.
- **Metodo:** Si basano su equazioni differenziali parziali.
- **Vantaggio:** Precisi dal punto di vista fisico. Offrono un'elevata accuratezza.
- **Svantaggio:** Sono modelli complessi. Hanno una bassa efficienza di calcolo. Non vengono impiegati per la gestione dell'energia in tempo reale.

## 2. MODELLI TERMICI

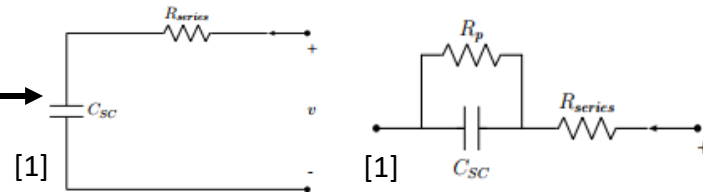
- **Principio:** Progettati per determinare la temperatura di funzionamento del dispositivo. La temperatura influenza le proprietà elettriche.
- **Metodo:** Due processi:
  1. **Generazione di calore:** Principalmente dovuta alle perdite ohmiche causate dalla resistenza interna (ESR).
  2. **Trasmissione di calore:** Come il SC scambia calore con l'ambiente (conduzione, convezione).



## 3. MODELLI A CIRCUITO EQUIVALENTE

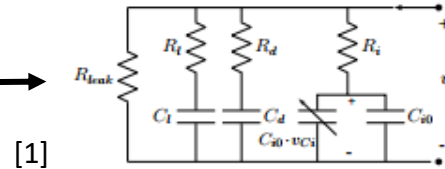
- **Principio:** Utilizzano semplici parametri di circuiti elettrici (Resistenze, Condensatori) per rappresentare esclusivamente il comportamento elettrico del SC. Ignorano la fisica elettrochimica dettagliata.
- **Metodo:** Si basano su equazioni differenziali ordinarie.
- **Vantaggio:** Ideali per la gestione energetica in tempo reale e per simulare l'interazione del SC con il resto dell'impianto.
- **Svantaggio:** Sono derivati da dati sperimentali, quindi sono accurati solo nelle condizioni specifiche in cui sono stati testati.

## CIRCUITO SEMPLIFICATO

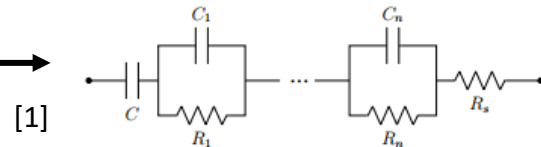


Il modello base.  $R_p$  modella l'auto-scarica.

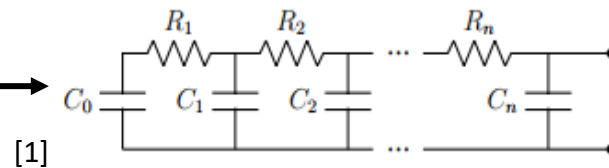
## MODELLI DINAMICI



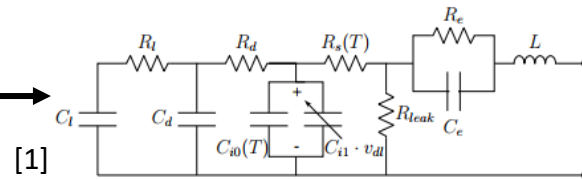
Utilizza diversi rami RC in parallelo, ognuno con una costante di tempo diversa. Rappresenta le **dinamiche a diverse scale temporali**.



Adatto a catturare la dinamica ad **alta frequenza**.



Sviluppato per modellare la natura distribuita dell'elettrodo poroso, simulando la **penetrazione progressiva delle cariche**.



Rappresentano il comportamento del supercondensatore fino a 1 kHz, descrivono anche l'autoscarica, la redistribuzione della carica e gli effetti termici.

[1] F. Naseri, S. Karimi, E. Farjah e E. Scholtz, «Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, p. 111-913, mar. 2022.

Le **batterie** sono dispositivi che accumulano energia in forma elettrochimica sfruttando reazioni redox

**Anodo**



Elettrodo negativo,  
Durante la scarica si ossida  
e fornisce elettroni al  
carico esterno

**Catodo**



Elettrodo positivo,  
Durante la scarica riceve  
elettroni e si riduce  
durante la reazione

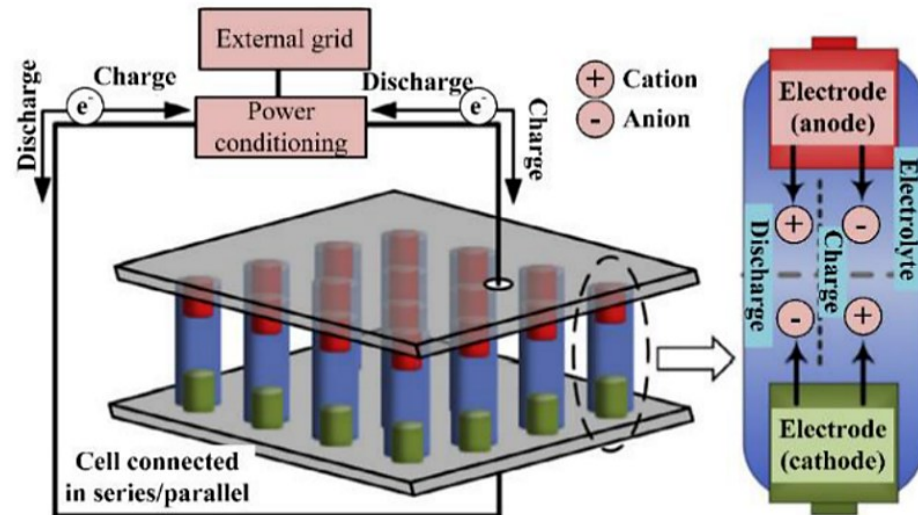
**Elettrolita**



Mezzo che permette il  
trasferimento di ioni (non di  
elettroni) tra anodo e catodo

Durante la scarica, una reazione **redox** trasferisce elettroni dall'anodo al catodo attraverso il circuito esterno, generando una **corrente**.

Nelle **batterie secondarie** (ricaricabili), questo processo è **reversibile**.



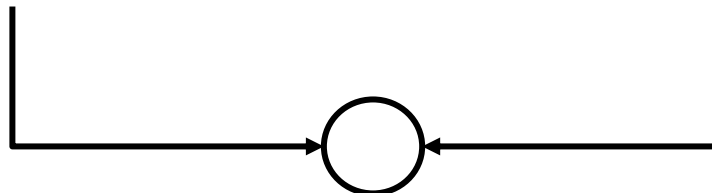
Batterie e supercondensatori sono complementari

**Batterie**

**Supercondensatori**

**Alta energia specifica (Wh/kg)**  
Bassa potenza specifica  
Cicli di carica scarica lunghi

**Alta potenza specifica (W/kg)**  
Bassa energia specifica  
Cicli di carica scarica rapidi

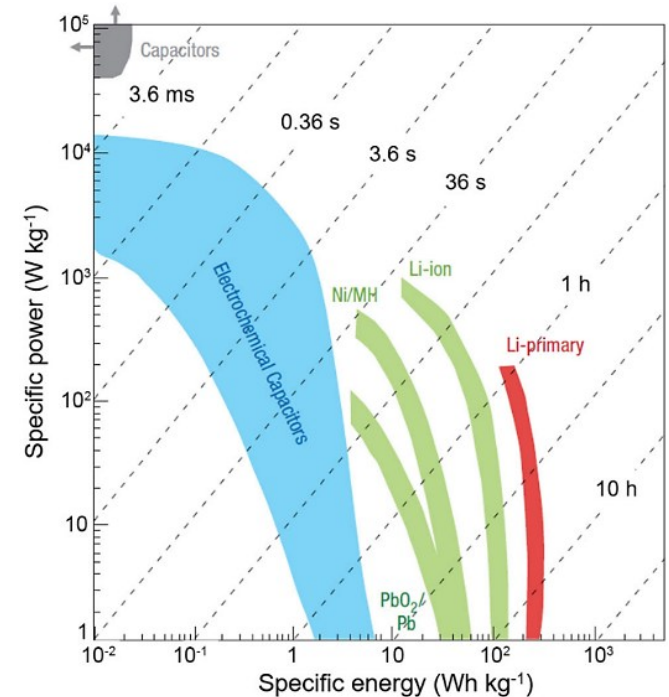


**Sistemi di accumulo ibridi**

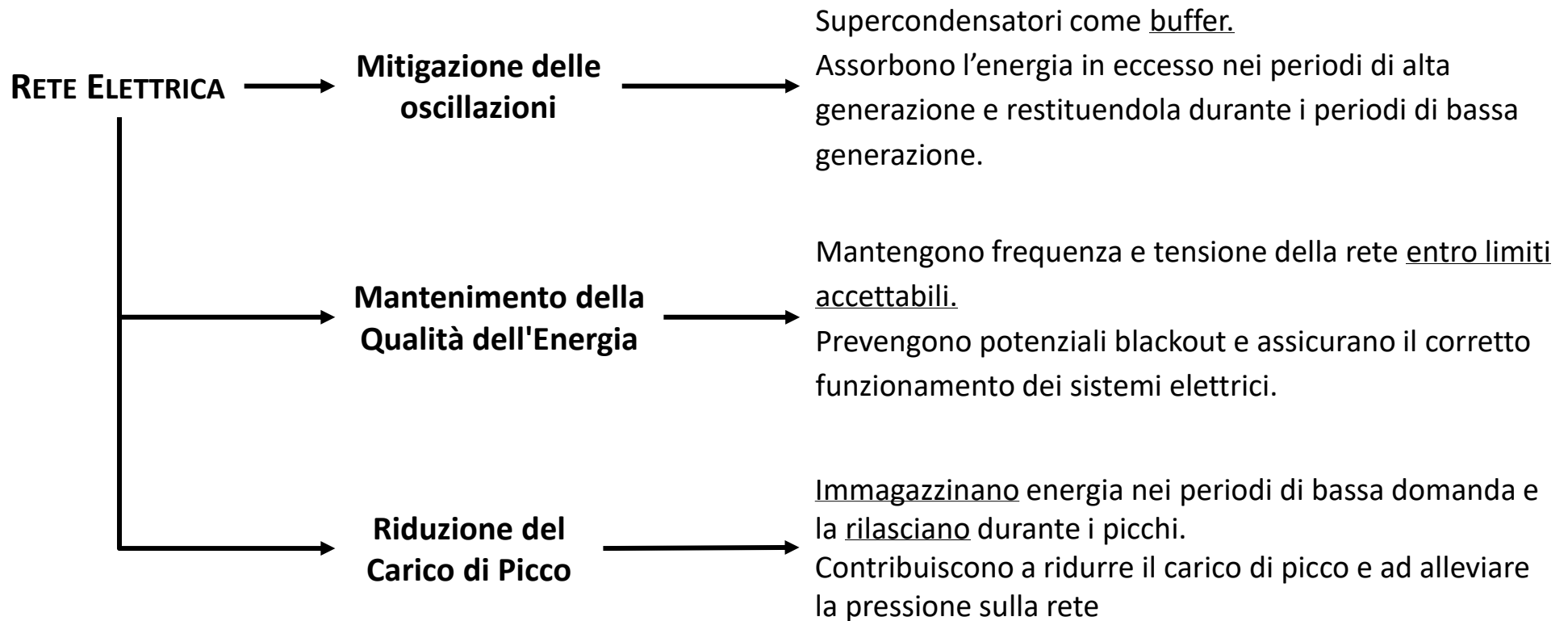
**Supercondensatore:** gestisce i picchi di potenza rapidi (risposta rapida)

**Batteria:** gestisce i picchi di potenza a bassa frequenza (risposta lenta).

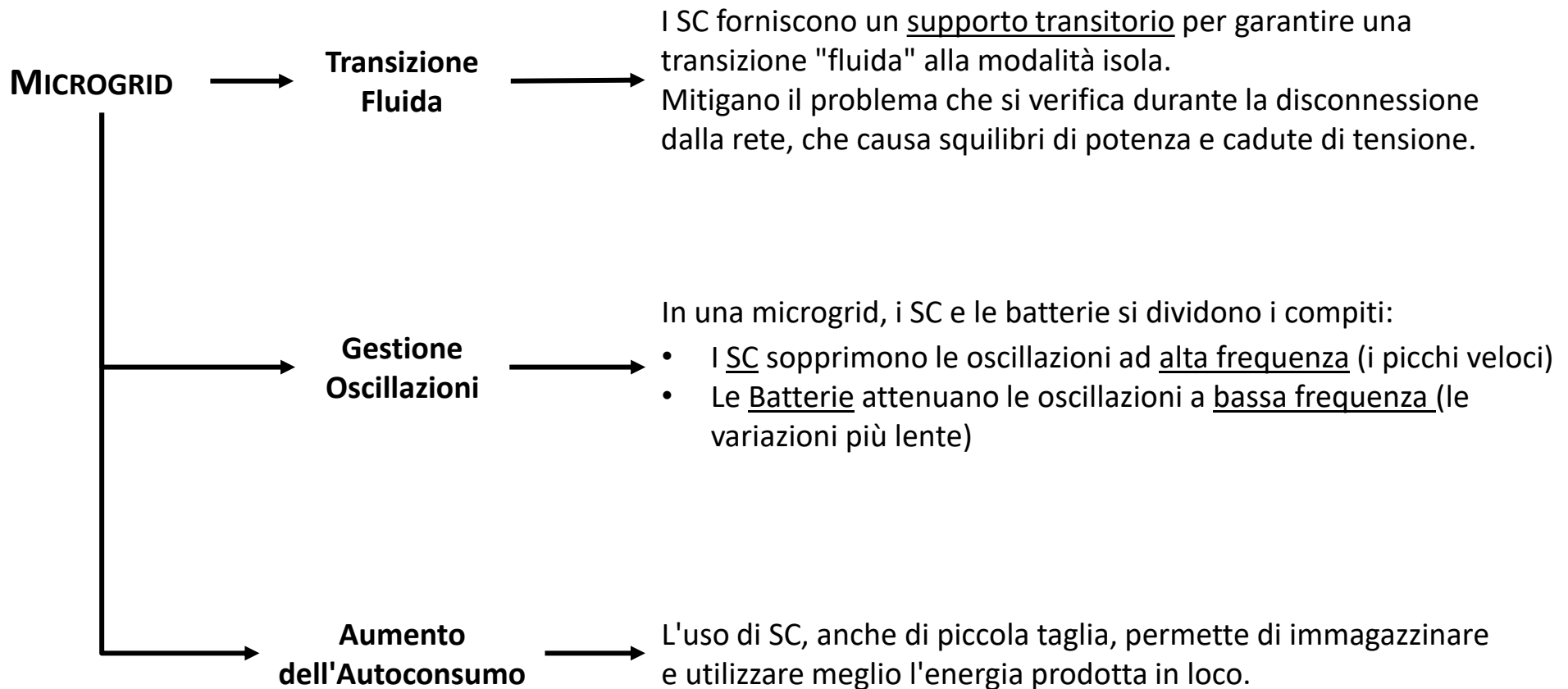
**Vantaggi:** aumentare significativamente la vita utile delle batterie e migliorando l'efficienza del sistema.



**Obiettivo:** usare i SC per garantire che la rete rimanga stabile, mantenendo frequenza e tensione entro limiti accettabili.

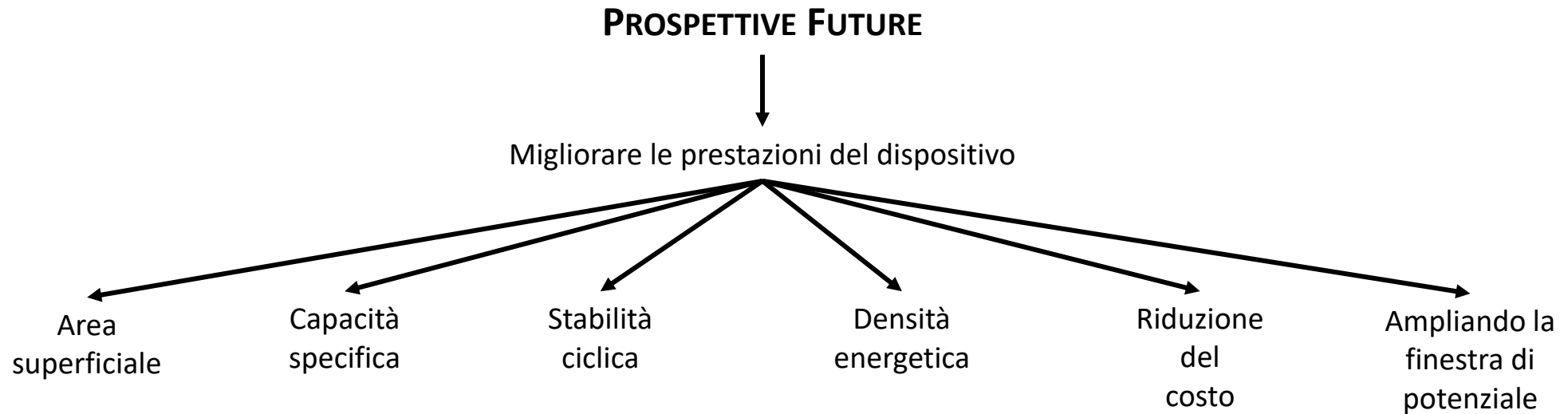


**Microgrid:** reti locali che possono funzionare sia connesse alla rete principale sia in modalità autonoma o isola.



Il problema comune a tutte le fonti rinnovabili è la loro **natura intermittente**. I supercondensatori, quasi sempre in un sistema ibrido con batterie, sono usati per mitigare queste problematiche

SOLARE	EOLICO	MOTO ONDOSI
La potenza generata fluttua rapidamente, causando stress e usura precoce delle batterie usate per l'accumulo	La potenza generata è fortemente variabile a causa della velocità del vento	È la fonte con la variabilità più estrema: fluttuazioni elevatissime e molto rapide, periodi nell'ordine di 1-10 s.
<p>Un filtro devia i picchi di corrente rapidi verso i supercondensatori, lasciando alle batterie la gestione dei cicli lenti</p> <p><u>Stabilizzano la tensione</u> del bus DC e prolungano significativamente la vita utile delle batterie</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>I. <u>Smorzano le fluttuazioni di potenza</u>. I SC compensano le variazioni a breve termine, mentre le batterie gestiscono quelle a lungo termine</li> <li>II. <u>Pitch Control</u> nei sistemi di frenatura delle turbine eoliche. Sostituiscono i sistemi idraulici o a batteria (risposta meno rapida), offrendo maggiore durata e bassa manutenzione</li> </ol>	<p>Unica tecnologia in grado di gestire cicli di carica/scarica così rapidi.</p> <p>In un HESS, i SC assorbono i picchi istantanei, proteggendo le batterie.</p> <p>Il sistema HESS risulta <u>più conveniente in termini di costo</u> rispetto a una soluzione con sole batterie (dovrebbero essere sovradimensionate)</p>



***GRAZIE  
PER  
L'ATTENZIONE***