



**Interreg**  
CENTRAL EUROPE



European Union  
European Regional  
Development Fund

**EfficienCE**



# MANUALE TRANSNAZIONALE PER L'IMPIEGO DI TECNOLOGIE AD ALTA EFFICIENZE ENERGETICA NELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO PUBBLICO

(3) Accumulo di energia nelle infrastrutture di  
trasporto pubblico

## STAMPA

### **Numero del progetto:**

CE1537 EfficienCE Efficienza energetica per le infrastrutture di trasporto pubblico nell'Europa centrale.

### **Finanziato da:**

Interreg Central Europe (<http://interreg-central.eu/Content.Node/home.html>)

### **Titolo del documento ufficiale:**

D.T2.3.2 Manuali transnazionali per l'impiego di tecnologie ad alta efficienze energetica nelle infrastrutture di trasporto pubblico

### **Editore:**

Consorzio EfficienCE

### **Autori:**

Anja Seyfert, Gabriele Grea (Redmint Impresa Sociale)

### **Grafica e progettazione:**

Levent Saran (Rupprecht Consult GmbH)

### **Data:**

giugno 2022

## Informazioni sul progetto EfficienCE

EfficienCE è un progetto di cooperazione finanziato dal programma Interreg CENTRAL EUROPE che mirava a ridurre l'impronta di carbonio nella regione. La maggior parte delle città dell'Europa centrale dispone di ampi sistemi di trasporto pubblico, che possono costituire la base di servizi di mobilità a basse emissioni di carbonio. Poiché oltre il 63% dei pendolari della regione utilizza il trasporto pubblico, le misure per aumentare l'efficienza energetica e la quota di energie rinnovabili in tali infrastrutture possono avere un impatto particolarmente elevato sulla riduzione di CO<sub>2</sub>.

Questo obiettivo è stato raggiunto con il sostegno alle autorità locali, alle autorità di trasporto pubblico e agli operatori attraverso lo sviluppo di strategie di pianificazione e piani d'azione, l'attuazione di azioni pilota, lo sviluppo di strumenti e formazione per la programmazione e la gestione di infrastrutture a basse emissioni di carbonio e il trasferimento di conoscenze e buone pratiche sulle misure di efficienza energetica nelle regioni dell'Europa centrale.

Dodici partner, tra cui sette autorità/aziende di trasporto pubblico di sette Paesi, hanno collaborato per tre anni per sfruttare le potenzialità inesprese di questo settore e per contribuire agli obiettivi del "Libro Bianco" dell'UE per ridurre le emissioni dei trasporti del 60% entro il 2050 e dimezzare l'uso di veicoli "alimentati con carburanti convenzionali" nel trasporto urbano entro il 2030.

## Indice

Sintesi .....	5
1. Introduzione .....	6
1.1 Tecnologie rilevanti -----	6
1.2 Accumulo energetico ed EfficienCE: i progetti pilota e le buone pratiche internazionali -----	8
2. I casi d'uso di EfficienCE sull'accumulo energetico e l'integrazione dell'energia rinnovabile .....	16
2.1 Deposito ad alta efficienza energetica -----	16
2.2 Infrastruttura lineare -----	17
2.3 Nodo intelligente -----	18
3. Esperienze acquisite e conclusioni .....	19
4. Bibliografia .....	20

# Sintesi



Foto della città di Lipsia

L'Unione europea si sta concentrando sull'accelerazione della decarbonizzazione del settore dei trasporti tramite le fonti di energia rinnovabili. I veicoli elettrici (VE), i veicoli elettrici con celle a combustibile (FCEV) e l'accumulo energetico possono favorire notevolmente questo sforzo e, allo stesso tempo, promuovere anche l'efficienza dei costi e la stabilizzazione della rete per le infrastrutture di trasporto pubblico.

Il ruolo delle infrastrutture di trasporto pubblico locale (TPL) dipende fortemente dalla loro capacità di favorire l'uso efficiente dell'elettricità nelle reti e di consentire l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili (FER). In questo processo, le tecnologie di accumulo svolgono un ruolo molto importante, con applicazioni in depositi, stazioni, fermate e lungo le linee delle reti di trasporto.

Il manuale EfficienCE sull'accumulo energetico nelle infrastrutture di trasporto pubblico identifica le principali funzionalità e tecnologie abilitate per l'accumulo di energia che è possibile applicare alle infrastrutture di trasporto pubblico e analizza il loro utilizzo nelle azioni dei progetti pilota e nelle buone pratiche internazionali. I risultati sono riassunti in tre casi d'uso (deposito ad alta efficienza energetica, nodo intelligente, infrastruttura lineare) che descrivono la tipica dotazione da sviluppare per migliorare le prestazioni di efficienza energetica delle infrastrutture di TP e riguardano i principali esempi applicativi che consentono una maggiore efficienza energetica, un'integrazione più elevata delle fonti rinnovabili e un contributo più efficace alla rete da parte delle infrastrutture di trasporto pubblico.

Lo scopo dei casi d'uso è evidenziare i principali elementi chiave, i vantaggi attesi, le sfide e gli ostacoli da considerare durante la pianificazione dell'integrazione delle tecnologie di accumulo nelle infrastrutture di TPL, offrendo riferimenti diretti ai progetti pilota e alle buone pratiche analizzate nell'ambito del progetto per fornire ulteriori indicazioni e benchmark.

# 1. Introduzione

La presenza di veicoli e infrastrutture di tipo elettrico nel trasporto pubblico costituisce un'importante opportunità per il processo di decarbonizzazione dei trasporti e, allo stesso tempo, pone sfide tecniche rilevanti legate alla stabilità della rete, in particolare in presenza di un numero sempre più consistente di fonti energetiche rinnovabili (FER) da integrare e sfruttare.

A seconda delle rispettive condizioni ed esigenze del contesto, l'accumulo di energia può svolgere diverse funzioni nelle infrastrutture di trasporto pubblico.

**Ottimizzazione dei consumi** – Le tecnologie di accumulo possono contribuire a ridurre al minimo i costi della domanda facendo fronte alle esigenze tra le ore di picco e i periodi di bassa richiesta, a supportare l'integrazione delle energie rinnovabili per massimizzare l'autoconsumo (ad esempio dagli impianti fotovoltaici o per migliorare l'efficienza energetica recuperando e riutilizzando l'energia in frenata dei veicoli), a fornire stabilità alla rete per i cali di tensione di breve durata o per le variazioni di frequenza e tensione.

**Funzionamento dei sistemi** – I sistemi di accumulo energetico possono fornire servizi ausiliari alla risposta primaria della rete per stabilizzarne le variazioni di frequenza e tensione, una risposta secondaria per correggere gli squilibri tra carico e generazione e sostituzione degli impianti peaker per garantire una capacità di generazione sufficiente durante i periodi di picco della domanda.

**Prosumerismo/Integrazione delle energie rinnovabili** – Le tecnologie di accumulo energetico possono integrare e massimizzare meglio la quantità di energie rinnovabili utilizzate; in base al costo dell'accumulo e dei risparmi energia/costi proposti, potrebbe essere necessario includere altre opzioni, come la fornitura di infrastrutture di ricarica anche per soggetti esterni e l'assunzione di un ruolo attivo nelle reti energetiche locali per la mobilità (collegamenti con uso polivalente delle infrastrutture, ecc.). In qualità di prosumer con capacità di accumulo disponibili, è possibile anche l'arbitraggio energetico, guadagnando così dall'acquisto di energia a basso prezzo che può essere venduta in periodi di rialzo.

## 1.1 Tecnologie rilevanti

Le tecnologie di accumulo più rilevanti per l'utilizzo nel trasporto pubblico sono state selezionate per essere analizzate e prese in considerazione nei casi d'uso descritti nel manuale. Le tecnologie variano in base alla capacità di potenza, alla densità energetica e al tempo di scarica (Fig. 1) e presentano quindi diversi livelli di idoneità, funzioni e settori di applicazione nel trasporto pubblico.

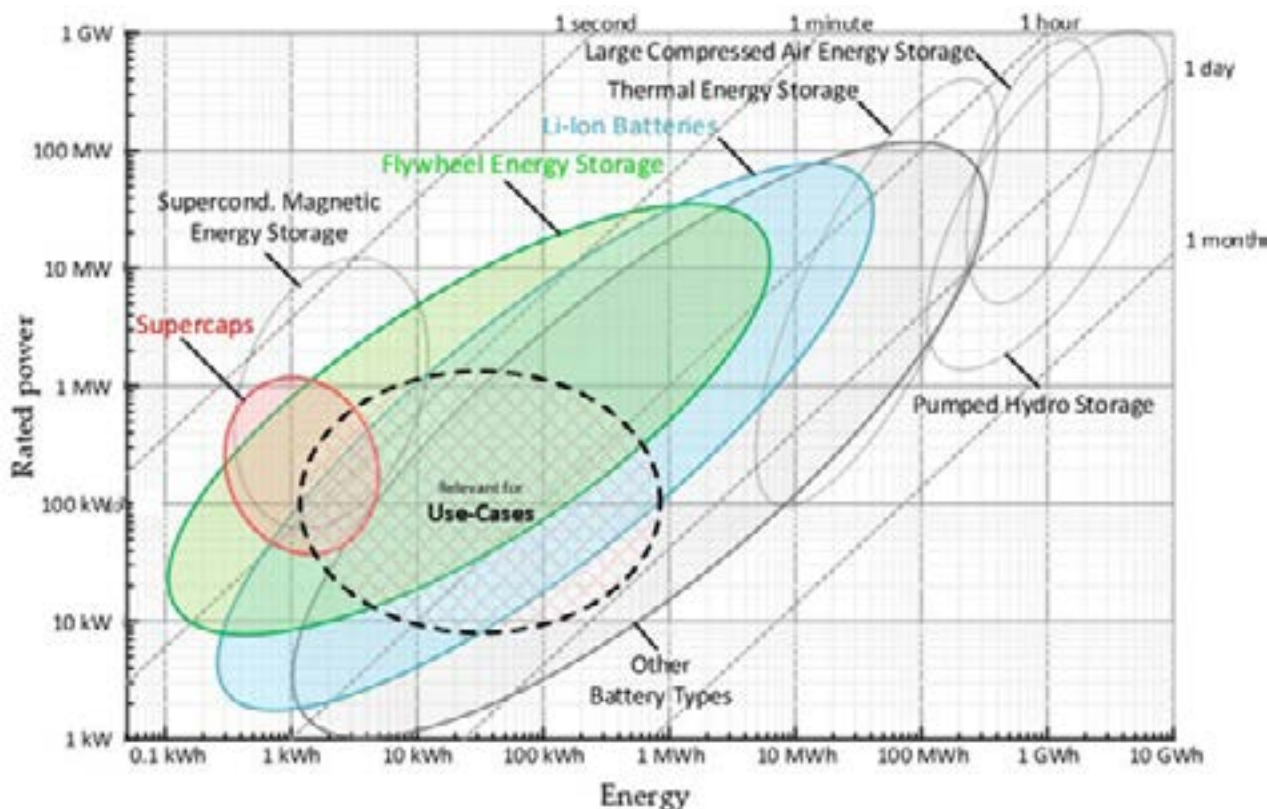


Figura 1: potenza nominale, capacità energetica e tempo di scarica di diversi sistemi di accumulo energetico per applicazioni di trasporto pubblico fisse e mobili. (Haidl et al. 2019)

Le batterie possono essere utilizzate sia a bordo dei veicoli per la propulsione o per altri servizi all'interno degli stessi (come servizi ausiliari, per recuperare l'energia di frenata, ecc.) o come accumulo stazionario. Per le batterie stazionarie, i requisiti di leggerezza e sicurezza sono inferiori e consentono di accedere a una gamma più ampia di tecnologie.

Tra le batterie, le tecnologie agli ioni di litio permettono un'elevata densità di energia, un costo inferiore per capacità energetica e una bassa autoscarica, ma anche una minore densità di potenza e costi elevati per capacità di potenza: di conseguenza vengono utilizzate soprattutto in applicazioni sensibili al peso che richiedono una capacità maggiore, ad esempio nel settore automobilistico e nell'elettronica di consumo.

I sistemi di accumulo con batterie di seconda vita possono ridurre i picchi di consumo energetici e i relativi costi della rete per la ricarica rapida, consentire la ricarica in aree con limitazioni di rete e supportare ulteriori servizi, come l'integrazione delle energie rinnovabili. L'uso di batterie di seconda vita sembra promettente per supportare al meglio la rete, integrare le energie rinnovabili e aggiungere elementi di circolarità.

I supercondensatori possono essere prodotti in diverse dimensioni per varie applicazioni. Grazie al brevissimo tempo di ricarica, i supercondensatori consentono di soddisfare picchi di richiesta di energia elevati e frequenti; le principali applicazioni sono legate al riutilizzo dell'energia di frenata nelle ferrovie e in diversi veicoli, all'integrazione delle energie rinnovabili e alla sostituzione delle batterie nei veicoli elettrici.

I sistemi di accumulo a volano (FESS, Flywheel Energy Storage Systems) sono dispositivi meccanici in grado di immagazzinare energia cinetica per un breve periodo. I volani di piccole dimensioni possono essere utilizzati come dispositivi di accumulo nei gruppi di continuità (UPS) e nei veicoli. Le loro caratteristiche principali sono: lunga durata senza perdite di capacità (numero molto elevato di cicli di carica e scarica), elevata qualità della potenza, nessuna dipendenza dalla temperatura, verifica precisa dello stato di carica/salute, nessun problema di scarica profonda, impatto ambientale minimo.

La tabella seguente riassume i principali vantaggi e ostacoli previsti per le tecnologie esaminate, per valutarne l'opportunità di applicazione in base ai casi d'uso del manuale.



Tecnologia	Vantaggi attesi	Possibili ostacoli tecnici	Possibili ostacoli normativi
Batterie agli ioni di litio	alta densità energetica, bassa autoscarica	degradazione, sensibilità alla temperatura, standard di sicurezza	relative al riutilizzo della seconda vita
Batterie di seconda vita	estensione della durata delle batterie	assenza di standardizzazione, anche per la capacità residua e la ricarica	assenza di un quadro normativo, leggi fiscali, imposte sull'energia
Supercondensatore	nessuna perdita di capacità, lunga durata, tempi di ricarica molto bassi, alta tensione	alti costi di investimento, bassa densità energetica, sistemi grandi e pesanti per un'elevata capacità di potenza	n.a.
Sistemi di accumulo a volano	nessuna perdita di capacità, lunga durata, tempi di ricarica ridotti, alta tensione, retrofitting	alti costi di investimento, bassa densità energetica	possibili norme di sicurezza

Figura 2: Vantaggi e ostacoli delle tecnologie di accumulo (EfficienCE, 2021)

## 1.2 Accumulo energetico ed EfficienCE: i progetti pilota e le buone pratiche internazionali

In questa sezione vengono presentati i progetti pilota e le buone pratiche di EfficienCE, suddivisi tra diverse categorie tecnologiche (batterie, volani, supercondensatori) e tra stazionari e a bordo. La tabella seguente indica la categoria di funzionalità (ottimizzazione dei consumi rispetto al funzionamento del sistema) e la principale fonte energetica coinvolta.

	Batteria	Batteria a volano	Supercondensatore	Stazionario	A bordo	Funzionamento del sistema	Ottimizzazione dei consumi	Integrazione delle energie rinnovabili	Recupero in frenata
Londra (UK) Bus2Grid	V2G				x	x		x	
Londra (UK) Deposito di Walworth	x			x		x	x		
Solingen (DE) Sistema filoviaro intelligente	x			x	x		x	x	x
Hannover (DE) Sottostazione del raddrizzatore	SECOND LIFE			x			x		x
Amburgo (DE) passa all'elettrico	x				x		x	x	
Madrid (ES) Progetto eLobster	x			x		x			x
Los Angeles (US) WESS per la metropolitana		x		x			x		x
Graz (AT) Progetto di ricerca FlyGrid									
Huai'an, Jiangsu (CN) Supercondensatori per il trasporto pubblico			x		x		x		x
Varsavia (PL) Tram con supercondensatori			x		x	x	x		x
La Spezia (IT) Smartbus			x		x		x		x
Nizza (FR) Linea tranviaria a doppia modalità di alimentazione			x		x		x		x
Gdynia (PL)*	SECOND LIFE						x	x	x
Pilsen (CZ)*	x			x		x			
Vienna (AT)*				x			x	x	

Figura 3: Classificazione dei progetti pilota e delle buone pratiche (EfficienCE, 2022)



### 1.2.1. Progetti pilota di EfficienCE

Questi esempi, pur concentrandosi su diversi scopi specifici (recupero dell'energia di frenata, uso polivalente delle infrastrutture di ricarica, accumulo di emergenza nelle reti filoviarie), sono tutti caratterizzati dall'uso di tecnologie di accumulo nei depositi, lungo le linee e nelle stazioni.

#### **Maribor (SI) – Uso polivalente dell'infrastruttura pubblica per la ricarica degli autobus elettrici**

L'obiettivo dell'azione pilota di Maribor era l'implementazione di stazioni di ricarica rapide per autobus elettrici in strutture di ricarica polivalenti situate presso una stazione tranviaria esistente e la stazione ferroviaria. Le infrastrutture per la ricarica polivalente sono collocate ai capilinea delle linee degli autobus.

La soluzione individuata per la tratta esaminata in base ad analisi di pianificazione territoriale, fattibilità tecnica e convenienza economica prevede l'installazione di due caricatori rapidi (150 kW e 300 kW) e l'acquisto di due autobus elettrici da 12 metri con batterie litio-titanato da 73 kWh.

La modernizzazione si concentra sulla stazione tranviaria e prevede l'integrazione di un caricatore rapido per l'utilizzo polivalente dell'infrastruttura di trasporto pubblico locale (TPL) esistente. L'energia della sottostazione tranviaria utilizzata per il funzionamento della funivia può essere condivisa anche per la ricarica di un autobus e di un'auto, entrambi di tipo elettrico. La sottostazione ha una capacità di 630 kVA; considerato il carico attuale e la capacità di una stazione di ricarica, per la costruzione di due stazioni di ricarica sarebbero sufficienti 230 kVA.



Figura 4: caricatore rapido per autobus elettrici presso la stazione tranviaria (Comune di Maribor)

#### **Pilsen (CZ) – Stazione di accumulo di riserva nella rete di filobus per l'efficienza energetica**

L'impiego di un gran numero di filobus con ricarica in movimento comporta un maggiore consumo di elettricità nelle tratte in cui i veicoli si muovono e si caricano (finora 8 veicoli articolati e 22 veicoli a batteria da 12 metri), il che può causare una riduzione della tensione con i carichi più elevati e quindi provocare guasti alla rete a breve termine o istantanei nelle unità di trazione dei filobus.

Per evitare gli elevati costi di investimento e i preparativi a lungo termine necessari per la costruzione di una nuova sottostazione o per il rinforzo dei cavi, l'operatore di trasporto pubblico ha individuato come possibile soluzione tecnica l'installazione di una stazione di accumulo di riserva lungo la linea.

Questa stazione scelta funziona con batterie ad alta potenza e con un controllo computerizzato intelligente; un'unità di trazione separata galvanicamente (CC 600 V/CC 600 V) garantisce un trasferimento sicuro e affidabile dell'energia da e verso la trazione.

I potenziamenti futuri potrebbero prevedere l'uso di batterie ad alta capacità (e di seconda vita) e/o l'integrazione di una piccola centrale fotovoltaica per la fornitura di energia in loco.



Figura 5: [Stazione di accumulo di emergenza a batterie a Pilsen](#) (PMDP)

## Gdynia(PL) – Energia di frenata recuperata e FER per l'alimentazione del deposito di filobus e applicazione di un sistema di alimentazione di trazione per la ricarica di auto elettriche

L'azione pilota di Gdynia si è concentrata sull'ottimizzazione delle risorse energetiche nel deposito dei filobus tramite una combinazione di applicazioni tecnologiche.

Il tetto del deposito è dotato di una centrale FV da 0,5 MW picco che genera annualmente circa 450 MWh da immettere direttamente nella rete filoviaria (5% dell'utilizzo totale). Inoltre, l'energia di frenata degli autobus viene recuperata grazie a un inverter che consente di immettere l'energia che altrimenti andrebbe sprecata direttamente nel sistema energetico dell'edificio.

Il dispositivo controlla anche il livello di consumo energetico nella rete di trazione, rileva l'energia inutilizzata e controlla accuratamente il consumo di energia del deposito, potenziando ulteriormente il suo esistente sistema di monitoraggio energetico (EMS, energy monitoring system).

L' inverter è dotato di un innovativo sistema di stoccaggio energetico in grado di accumulare l'energia di recupero inutilizzata in caso di assenza di carico sull'uscita CA. A tal fine, viene utilizzato un modulo batteria di una batteria di trazione per filobus (applicazione di seconda vita).

Una stazione di ricarica mobile per auto elettriche realizzata nell'ambito del progetto CAR (Creating Automotive Renewal – INTERREG South Baltic) dalla città di Gdynia, che consente la ricarica con diversi intervalli di potenza e corrente elettrica, può essere collegata alla rete di trazione dei filobus in qualsiasi punto della città, rendendo possibili sinergie tra i due progetti.

Rispetto alle soluzioni tradizionali, i vantaggi del sistema combinato sono:

- il collegamento della stazione non richiede costi di installazione aggiuntivi e riduce i tempi di investimento;
- nessun lungo processo formale legato alla costruzione;
- la rete di trazione, con il suo ampio raggio d'azione e la sua grande accessibilità, consente di impiegare la stazione di ricarica anche in presenza di problemi di connessione alla linea elettrica CA, ad esempio a causa della necessità di lavori edili.

Nell'ambito del progetto pilota di Gdynia è stato collegato un caricatore mobile per veicoli elettrici per controllare il modo in cui la ricarica delle auto elettriche influisce sulla stabilità della rete, sui suoi parametri o sul regolare funzionamento della linea dei filobus.

## Vienna (AT) – Impianto FV integrato nella stazione della metropolitana per l'alimentazione degli edifici ausiliari con le FER

Wiener Linien GmbH & Co KG ha testato un nuovo tipo di impianto a fogli fotovoltaici sulla stazione della metropolitana di Ottakring: è cinque volte più leggero rispetto agli impianti fotovoltaici convenzionali ed è stato possibile installarlo sulle stazioni esistenti senza il peso aggiuntivo dei sistemi FV convenzionali.

Un'altra caratteristica particolare era il funzionamento in parallelo di un sistema ferroviario a corrente continua (CC) e la produzione di energia fotovoltaica, per la quale i moduli fotovoltaici scelti dovevano soddisfare requisiti tecnici speciali (e ulteriori). Una delle sfide principali



Figura 6: stazione di ricarica mobile per auto elettriche alimentata dalla rete filoviaria (PKT)



Figura 7: evento di apertura con le autorità locali, Novembre 2019 (Wiener Linien)





Foto della città di Lipsia

è stata collocare le apparecchiature tecniche (come il convertitore di frequenza in un luogo adatto all'interno della stazione) e pianificare con precisione il passaggio dei cavi per ridurre la distanza tra il locale tecnico e il locale del distributore della rete a bassa tensione. I moduli fotovoltaici sono incollati al tetto e i cavi vengono fissati nelle canaline. Dopo aver collegato il distributore della rete a bassa tensione al locale tecnico, i componenti di misura sono stati infine installati in corrispondenza dell'interruttore.

Dettagli tecnici – L'impianto fotovoltaico ha una dimensione di 360 mq, una potenza nominale di 60,3 kWp e una produzione annua di circa 60.000 kWh, che copre una quota energetica pari al 6% del consumo energetico annuo dell'intera stazione della metropolitana (dotata inoltre di un parcheggio per i relativi treni). La quota massima mensile di energia raggiunta è stata il 13% del consumo, mentre in una giornata estiva soleggiata l'impianto FV copre fino al 50% del fabbisogno energetico della stazione. Le misurazioni vengono effettuate a intervalli di 15 minuti. Come strumento di misura, viene utilizzato Siemens PAC 3200 e i dati ottenuti sono trasferiti automaticamente al nostro sistema di controllo energetico.

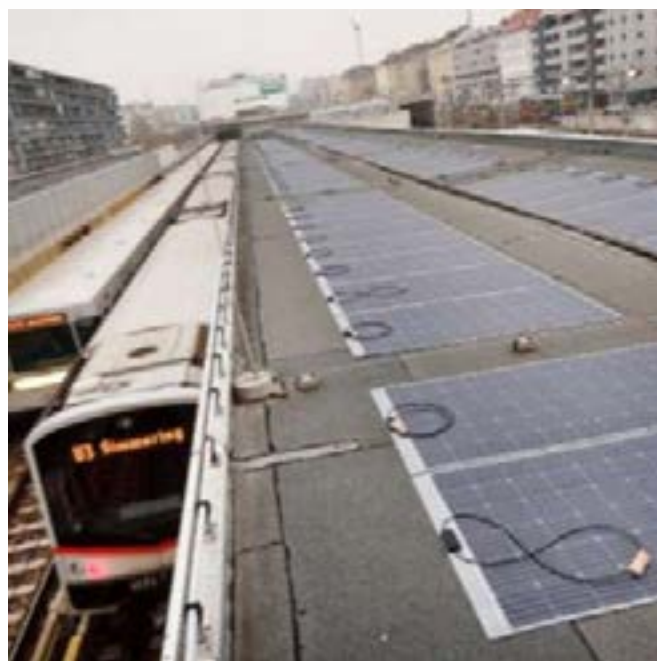


Figura 8: fogli fotovoltaici sul tetto della stazione della metropolitana (Wiener Linien)

### 1.2.2. Buone pratiche per le applicazioni di accumulo energetico nelle infrastrutture di TPL

In questa sezione proponiamo una rassegna delle buone pratiche per le applicazioni di accumulo energetico nelle infrastrutture di trasporto pubblico, integrando in alcuni casi gli approcci già esaminati con funzioni quali il collegamento veicolo-rete, i sistemi di recupero energetico lungo i binari, l'integrazione di energie rinnovabili.

## Londra – Bus2Grid

Bus2Grid è un progetto ambizioso che collega 28 autobus a due piani alla rete per eseguire test V2G (Vehicle-to-grid, da veicolo a rete). Gli autobus sono dotati di batterie al litio ferro fosfato da 382 kWh, si ricaricano durante la notte nei momenti di bassa domanda e sono in grado di restituire 1,1 MW alla rete londinese quando la domanda è elevata, per fornire servizi di bilanciamento.

Il deposito è dotato di ricarica CA con 2 caricatori a bordo da 40 kW e di un impianto di scarico mobile. Un fatto di particolare importanza: la maggior parte dei progetti V2G utilizza la ricarica in CC (CHAdemo), pertanto è necessario certificare solo il ChargePoint e l'inverter associato (che è immobile), anziché il veicolo. Naturalmente, l'infrastruttura ha un costo inferiore.

## Abellio London, Deposito di Walworth

Abellio ha pianificato l'impiego di 34 autobus elettrici per le rotte TfL in partenza dal deposito di Walworth. Per tali percorsi sono stati necessari finanziamenti per le batterie, servizi per le infrastrutture di ricarica e una soluzione per la capacità di importazione ridotta della rete e per i limiti di spazio. Zenobē ha finanziato 34 batterie per autobus elettrici con un servizio gestito e ha installato una batteria stazionaria per sostenere la rete durante la ricarica degli autobus elettrici nei momenti di picco. La batteria fornisce servizi a National Grid nell'arco della giornata, genera entrate aggiuntive per Abellio e ne riduce le commissioni. L'infrastruttura di ricarica comprende diversi caricatori a CC in grado di ricaricare i veicoli a >80kW; l'utilizzo dell'energia viene monitorato dal software proprietario di Zenobē. Da un punto di vista economico, si tratta di un approccio unico che dimostra che lo stoccaggio delle batterie collegato all'infrastruttura di trasporto potrebbe diventare un interessante caso aziendale in caso di coinvolgimento di terze parti, come Zenobē.



Figura 9: [deposito degli autobus Abellio London](#) (Zenobē)

## Solingen – Progetto BOB

BOB fa parte del sistema di filobus intelligenti e dell'ulteriore sviluppo della rete catenaria esistente in un'infrastruttura intelligente integrata nella rete elettrica della città. La rete di linee aeree è accoppiata alla rete di media tensione ed è possibile reimmettere l'energia di frenata. Gli impianti fotovoltaici lungo la linea aerea possono immettere energia direttamente nella rete, senza perdite. Le batterie installate nelle sottostazioni possono immagazzinare l'elettricità ed erogarla quando necessario. Verranno integrati punti di ricarica per le auto elettriche.



Figura 10: <https://www.bob-solingen.de/>

## Hannover – Sottostazione con raddrizzatori con batterie di seconda vita

Ad Hannover, venti sistemi di batterie per autobus di seconda vita forniscono una capacità di circa 500 kWh collegandosi alla nuova sottostazione con raddrizzatori, per alimentare gli autobus e i tram elettrici gestiti da ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG. Le unità di accumulo energetiche servono come riserva per consentire l'uso efficiente dell'energia recuperata durante il funzionamento dei tram, per la stabilizzazione della rete (in particolare per la compensazione dei picchi di carico), nonché come supporto in caso di interruzioni di corrente e per la fornitura di energia elettrica alle infrastrutture di ricarica pubbliche.



Figura 11: [Autobus sostenibile](#)



### Amburgo passa all'elettrico

Nel deposito di Alsterdorf, ad Amburgo, due dei sei posti auto coperti sono stati dotati di infrastrutture intelligenti per la ricarica degli autobus elettrici, con 96 punti di ricarica e 240 parcheggi.

Il concetto di ricarica è modulare e quindi scalabile; l'alimentazione è collegata alla rete elettrica di Amburgo tramite una sottostazione. I trasformatori standard modulari (1600 kVA) alimentano fino a 16 autobus.

Gli autobus saranno ricaricati durante la notte, con una capacità di ricarica massima di 150 kW per autobus e tempi medi di ricarica di 4-5 ore, utilizzando anche l'eccesso di energia eolica generata e migliorando l'integrazione delle fonti rinnovabili nella rete.



Figura 12: Fonte: © INIT | Ulrike Kabel

### Madrid – eLobster (H2020)

L'obiettivo del progetto eLobster è il miglioramento delle sinergie tra le infrastrutture della metropolitana leggera e le reti di distribuzione dell'energia elettrica per ridurre le perdite di elettricità e aumentare la stabilità della rete, soprattutto nei casi in cui è possibile un'elevata integrazione delle energie rinnovabili.

La soluzione si basa su un sistema integrato di gestione delle ferrovie e delle reti che, partendo dall'analisi in tempo reale delle perdite di energia, riuscirà a ottimizzare l'interscambio di elettricità tra le reti massimizzando l'autoconsumo locale di FER.



Foto della città di Lipsia

Il sito dimostrativo di E-LOBSTER è la metropolitana di Madrid, la cui ferrovia sotterranea è collegata a una rete locale di distribuzione elettrica con un elevato utilizzo delle FER.

### Los Angeles, Stati Uniti – Way Side Energy Storage System (WESS)

Il progetto Way Side Energy Storage System (WESS) ha integrato il sistema a volano VYCON REGEN nella sottostazione elettrica a trazione (TPSS, Traction Power Substation) della Red and Purple Line presso la stazione di Westlake/McArthur Park.

Il sistema raccoglie l'energia di frenata delle metropolitane in curva o quando entrano nella stazione passeggeri nei pressi del WESS della TPSS, la immagazzina e la fornisce al treno successivo che ne ha bisogno, riducendo la domanda di potenza di picco e realizzando una riduzione dell'energia di trazione del 10-18%. Il sistema funziona quotidianamente a pieno regime da agosto 2014. Il risparmio annuo stimato è di circa 541 MWh, pari alla fornitura di energia per 100 abitazioni californiane di medie dimensioni.



Figura 13: Copyright © 2022 | Metropolitana – Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority; [The Source](#), di Dave Sotero, 3 ottobre 2014

### Progetto di ricerca "FlyGrid", Austria

È stato sviluppato un FESS per una stazione di ricarica per veicoli elettrici completamente automatizzata per consentire a una rete di distribuzione a bassa tensione di raggiungere un'elevata potenza di carica e contemporaneamente stabilizzare la rete. Il sistema è adatto per l'integrazione di fonti rinnovabili locali, contribuendo ad aumentare la quota di energia pulita nel mix elettrico. Altre caratteristiche del concetto FlyGrid sono la maggiore durata di vita del dispositivo di accumulo energetico, la capacità di reimmettere una potenza elevata nella rete e la facile trasportabilità sotto forma di "scatola di ricarica rapida" mobile (per macchinari edili elettrici o simili). Un modulo di questo prototipo verrà utilizzato come caso di riferimento e fornirà 5 kWh a 100 kW di potenza di picco. (Haidl et al. 2019).

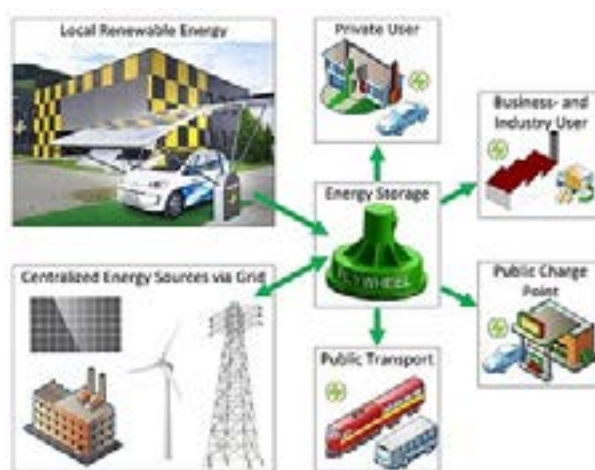


Figura 14: [TU Graz](#)



## Huai'an, Jiangsu: la tecnologia dei supercondensatori guida il cambiamento del trasporto pubblico

L'applicazione dei supercondensatori nel trasporto pubblico avviene soprattutto a bordo dei veicoli. Con un percorso di 20 km e 23 fermate, Huai'an ha introdotto il tram elettrico più lungo che utilizza i supercondensatori.

La tecnologia dei supercondensatori consente di risparmiare 4900 tonnellate di emissioni di CO<sub>2</sub> all'anno con tempi di ricarica molto brevi (circa 30 secondi) e una lunga durata, sostituendo il 30% dei veicoli privati e trasportando 7 milioni di passeggeri in un'area densamente trafficata.

### Varsavia



Figura 15: [sustainable-bus.com/](https://sustainable-bus.com/)

Un approccio simile è stato adottato a Varsavia, dove i sistemi di ultracondensatori prodotti in Estonia da Skeleton Technologies recuperano l'energia di frenata e la riutilizzano per l'accelerazione, riducendo in modo significativo il consumo totale di energia e i picchi di potenza, stabilizzando l'infrastruttura della rete di Varsavia e quindi aumentando notevolmente l'efficienza energetica. Con 1 milione di cicli di ricarica, i supercondensatori rappresentano una soluzione tecnicamente migliore rispetto alle batterie agli ioni di litio per applicazioni specifiche.

### La Spezia (IT) SmartBUS



Figura 16: [autobus.sostenibile](https://autobus.sostenibile.it/)

A La Spezia gli autobus dotati di ultracondensatori (32 kWh) sono stati testati su una linea lunga 17 km con una stazione di ricarica CA/CC da 150 kW presso il terminal degli autobus. Il tempo di ricarica dello SmartBUS è di 5-7 minuti. L'innovazione risiede soprattutto nella riduzione del peso e delle dimensioni dell'autobus e nella possibilità di recuperare l'energia di frenata fino al 40%.

La joint venture tra E-CO, Chariot, Prometeon e Politecnico di Milano ha dimostrato che gli ultracondensatori di varie capacità nei modelli SmartBUS (8, 12 e 18 metri) utilizzati al posto delle batterie possono far percorrere oltre 40 km con una sola carica.

## 2. I casi d'uso di EfficienCE sull'accumulo energetico e l'integrazione dell'energia rinnovabile

In questa sezione vengono identificati tre casi d'uso rilevanti in base l'analisi delle funzionalità e delle tecnologie e alla revisione delle buone pratiche delle sezioni precedenti. I casi comprendono concetti di a) deposito ad alta efficienza energetica, b) nodo intelligente e c) infrastruttura lineare in cui l'impiego di tecnologie di accumulo energetico consente di integrare le fonti di energia rinnovabili e di supportare il funzionamento del sistema. I tre casi d'uso riassumono la tipica dotazione da sviluppare per migliorare le prestazioni di efficienza energetica delle infrastrutture di TP.

	Deposito ad alta efficienza energetica	Nodo intelligente	Infrastruttura lineare
Londra (UK) Bus2Grid	x		
Londra (UK) Deposito di Walworth	x		
Solingen (DE) Sistema filoviario intelligente			x
Hannover (DE) Sottostazione del raddrizzatore			x
Amburgo (DE) passa all'elettrico	x		
Madrid (ES) Progetto eLobster		x	
Los Angeles (US) WECS per la metropolitana		x	
Graz (AT) Progetto di ricerca FlyGrid		x	
Huai'an, Jiangsu (CN) Supercondensatori per il trasporto			x
Varsavia (PL) Tram con supercondensatori			x
La Spezia (IT) Smartbus			x
Maribor (SI)* Uso polivalente delle infrastrutture pubbliche		x	
Gdynia (PL)* Energia di frenata recuperata e FER	x	x	x
Pilsen (CZ)* Stazione di accumulo di riserva nella rete di filobus			x
Vienna (AT)* Impianto fotovoltaico integrato in una stazione della metropolitana	x	x	

\*Progetti pilota di EfficienCE

Figura 17: Progetti pilota, buone pratiche internazionali e casi d'uso (EfficienCE, 2022)

Lo schema del quadro di riferimento è rappresentato dal contesto della città di Bergamo, dove l'implementazione del PUMS (Piano urbano della mobilità sostenibile) prevede la ristrutturazione di un importante nodo di mobilità per la rete dei trasporti, la costruzione di nuove linee di metropolitana leggera e di eBRT (Electric bus rapid transit, autobus elettrici a transito rapido) e lo sviluppo di una rete di ricarica polivalente per veicoli elettrici.

A Bergamo, nell'ambito del progetto EfficienCE, si sta sviluppando un piano d'azione per una migliore integrazione delle energie rinnovabili e dei sistemi di accumulo nelle infrastrutture di trasporto pubblico: si tratta di una cornice adatta che rappresenta un contesto modello per l'allocazione di strutture di accumulo per scopi diversi e per diversi tipi di infrastrutture.

### 2.1 Deposito ad alta efficienza energetica

Il caso d'uso verte sul miglioramento delle prestazioni energetiche di un deposito di TPL (ristrutturato o di nuova progettazione) attraverso un migliore utilizzo delle fonti rinnovabili ove disponibili (compresa la frenata) e un consumo più efficiente, nonché sul contributo all'autonomia energetica e alla rete (ad esempio tecnologie BUS-to-Grid).

La pianificazione di un deposito a basso consumo energetico può coinvolgere un'ampia gamma di portatori di interessi, come le autorità locali, gli operatori del trasporto pubblico e altri fornitori (ad esempio, l'e-car sharing), i gestori dei sistemi di trasporto e di distribuzione del settore energetico, nonché i cittadini.

A seconda del contesto del caso d'uso, la progettazione e l'implementazione di soluzioni a basso consumo energetico per i depositi basate sull'accumulo si fondano principalmente su batterie (nuove e di seconda vita); gli investimenti includono anche sistemi FV e altre soluzioni di generazione da fonti rinnovabili, strutture di ricarica (anche V2G), sistemi di monitoraggio, ecc.

I principali impatti previsti sono legati a una maggiore efficienza energetica attraverso l'autoproduzione e la riduzione delle perdite, a una migliore integrazione delle fonti rinnovabili e ai relativi benefici ambientali ed economici.

#### *Sfide/ostacoli*

L'implementazione di soluzioni di accumulo per depositi a basso consumo energetico può far fronte a diversi tipi di sfide e in alcuni casi a ostacoli legati soprattutto al contesto normativo (relativi al V2G e al dispacciamento energetico) e alla valutazione dei costi e dei vantaggi degli investimenti necessari. Inoltre, l'accettazione sociale rappresenta un elemento importante da tenere in considerazione quando si pianificano nuove infrastrutture in quartieri densamente popolati; occorre inoltre considerare i potenziali benefici delle sfide legate all'accumulo e al V2G.

#### *Bibliografia:*

Londra (UK) Bus2Grid
Londra (UK) Deposito di Walworth
Amburgo (DE) passa all'elettrico
Gdynia (PL)* Energia di frenata recuperata e FER
Pilsen (CZ)* Stazione di accumulo di riserva nella rete di filobus
Vienna (AT)* Impianto fotovoltaico integrato in una stazione della metropolitana

## 2.2 Infrastruttura lineare

Questo caso d'uso analizza le possibili applicazioni delle tecnologie di accumulo rispetto all'infrastruttura lineare, principalmente allo scopo di supportare e bilanciare la rete, prendendo in considerazione approcci stazionari e in movimento.

Saranno prese in considerazione applicazioni come le batterie stazionarie e in movimento, così come i volani e i supercondensatori, al fine di studiare la gamma dei possibili vantaggi per la rete derivanti dall'uso delle tecnologie di accumulo, nonché i loro vantaggi e limiti.

Il coinvolgimento dei portatori di interessi si concentrerà soprattutto sull'aspetto tecnico della mobilità (operatori del trasporto pubblico e altri fornitori) e dell'energia (gestori dei sistemi di trasporto e di distribuzione).

I principali impatti attesi riguardano il supporto alla rete al fine di migliorare l'efficienza operativa e, di conseguenza, le prestazioni ambientali ed economiche dell'infrastruttura attraverso soluzioni economicamente valide. Il settore di applicazione varia a seconda del tipo di infrastruttura esistente o da sviluppare: per questo motivo i riferimenti bibliografici includono esempi di filobus, autobus e tram.

#### *Sfide/ostacoli*

L'implementazione di soluzioni di accumulo per le infrastrutture lineari può dover fronteggiare, in particolare, sfide economiche legate agli investimenti necessari, ma allo stesso tempo può rappresentare opportunità per dilazionare gli investimenti rilevanti sulla rete e per trovare soluzioni più flessibili per la sua stabilizzazione. In alcuni casi potrebbero essere presenti ostacoli normativi specifici per le diverse applicazioni tecnologiche (ad esempio, leggi di sicurezza sui volani).

### Bibliografia:

Solingen (DE) Sistema filoviario intelligente
Hannover (DE) Sottostazione del raddrizzatore
Huai'an, Jiangsu (CN) Supercondensatori per il trasporto pubblico
Varsavia (PL) Tram con supercondensatori
La Spezia (IT) Smartbus
Gdynia (PL)* Energia di frenata recuperata e FER
Pilsen (CZ)* Stazione di accumulo di riserva nella rete di filobus

## 2.3 Nodo intelligente

L'ultimo caso d'uso si concentra sulla progettazione di un nodo intelligente, come una stazione, una fermata o un centro multimodale in cui l'accumulo può essere adottato per consentire l'uso efficiente delle fonti rinnovabili e l'uso polivalente dell'infrastruttura di ricarica. Si possono considerare diversi approcci: dal puro miglioramento dell'efficienza energetica e delle prestazioni dell'infrastruttura, al contributo attivo dei veicoli e alla generazione alla stabilità della rete.

Il coinvolgimento dei portatori di interessi si concentrerà soprattutto sull'aspetto tecnico della mobilità (operatori del trasporto pubblico e altri fornitori) e dell'energia (gestori dei sistemi di trasporto e di distribuzione).

La scelta delle soluzioni per i nodi intelligenti basate sull'accumulo prenderà in considerazione una serie di opzioni tecnologiche, tra cui batterie, volani e supercondensatori, valutandone il potenziale a seconda delle caratteristiche dei nodi e dei sistemi.

I principali impatti previsti riguardano l'integrazione delle fonti rinnovabili, il supporto alla rete e l'efficienza energetica, al fine di migliorare l'efficienza operativa e, di conseguenza, le prestazioni ambientali ed economiche dell'infrastruttura. Se si considerano la coesistenza e le interazioni tra le diverse infrastrutture (lineari e con nodi), l'identificazione di una scala ottimale per l'integrazione delle tecnologie di accumulo e delle energie rinnovabili a livello di nodo è fondamentale per garantire l'efficacia e la sostenibilità economica delle applicazioni.

### Sfide/ostacoli

Nello specifico, l'implementazione di soluzioni di accumulo per nodi intelligenti può dover fronteggiare sfide e ostacoli tecnici a causa della complessità e delle interazioni tra i diversi sistemi. In particolare, l'implementazione di sistemi di ricarica polivalenti e gli scambi di energia tra diversi servizi possono richiedere un'analisi approfondita dei modelli normativi e commerciali.

### Bibliografia:

Madrid (ES) Progetto eLobster
Los Angeles (US) WESS per la metropolitana
Graz (AT) Progetto di ricerca FlyGrid
Maribor (SI)* Uso polivalente delle infrastrutture pubbliche
Gdynia (PL)* Energia di frenata recuperata e FER
Vienna (AT)* Impianto fotovoltaico integrato in una stazione della metropolitana

### 3. Esperienze acquisite e conclusioni

La combinazione di depositi ad alta efficienza energetica, nodi intelligenti e infrastrutture lineari per il trasporto pubblico evidenzia il potenziale dello sviluppo di soluzioni innovative per ottimizzare il rapporto tra mobilità e rete energetica.

Per quanto riguarda il deposito ad alta efficienza energetica, una delle esperienze acquisite dall'analisi risiede nel fatto che le dimensioni dell'infrastruttura FER sono fondamentali per determinare l'opportunità delle applicazioni dello accumulo. Ad esempio, potrebbe valere la pena di considerare il ruolo della rete di TPL come collettore di diverse FER a livello di quartiere, per rendere il riutilizzo dei flussi energetici efficiente ed economicamente conveniente.

L'applicazione dello accumulo sulle infrastrutture lineari potrebbe essere ritenuta marginale in termini di integrazione delle FER, ma fornisce risposte valide e flessibili in materia di funzionalità ausiliarie, come il controllo della tensione. Inoltre, in alcuni casi l'uso di impianti di accumulo può rappresentare un'opportunità per dilazionare gli investimenti rilevanti sulla rete.

La principale esperienza acquisita con il caso d'uso dei nodi intelligenti è complementare a quelle precedenti: il processo di pianificazione deve tenere conto della complessità e delle interazioni tra i diversi sistemi; in particolare, l'implementazione di sistemi di ricarica polivalenti e gli scambi di energia tra i diversi servizi possono richiedere analisi approfondite dei modelli normativi e commerciali.

## 4. Bibliografia

- Ahmad Arabkoohsar, Meisam Sadi, 2021: Flywheel energy storage, in Mechanical Energy Storage Technologies, (<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gyrobus>)
- BloombergNEF, 2020: Battery Price Survey <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- Jimena Castro-Gutiérrez, Alain Celzard and Vanessa Fierro, 2020: Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes, *Front. Mater.*, 22 July 2020 <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00217>
- Circular Energy Storage, research and consulting, 2021: Prices for used batteries are higher than for new batteries – this is why <https://circularenergystorage.com/articles/2021/1/15/prices-for-used-batteries-are-higher-than-for-new-batteries-this-is-why>
- Circular Energy Storage, research and consulting, 2021: The lithium-ion battery life cycle report <https://static1.squarespace.com/static/587657ddbe659497fb46664c/t/5fdaa991dc2ddb6396c30fa6/1608165783527/The+lithium-ion+battery+life+cycle+report+sample.pdf>
- EASE European Association for Storage of Energy, 2020: Energy Storage and Transport: What's the Connection? <https://ease-storage.eu/news/energy-storage-and-transport-whats-the-connection/>
- Sarah George, 2021: 'UK's first' grid-scale battery storage system comes online in Oxford <https://www.euractiv.com/section/electricity/news/uks-first-grid-scale-battery-storage-system-comes-online-in-oxford/>
- Philipp Glücker, Klaus Kivekäs, Jari Vepsäläinen, Panagiotis Mouratidis, Maximilian Schneider, Stephan Rinderknecht, Kari Tammi: Prolongation of Battery Lifetime for Electric Buses through Flywheel Integration; *Energies* 2021, 14, 899. <http://doi.org/10.3390/en14040899>
- M.A. Guerrero, E. Romero, F. Barrero, M. I. Milanés, E. González Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems <http://peandes.unex.es/archives%5CP126.pdf>
- Peter Haidl, Armin Buchroithner, Bernhard Schweighofer, Michael Bader, Hannes Wegleiter, 2019: Lifetime Analysis of Energy Storage Systems for Sustainable Transportation, sustainability file:///C:/Users/user/AppData/Local/Temp/sustainability-11-06731-v2.pdf
- IEA 2021: Prospects for electric vehicle deployment, Global EV Outlook 2021 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/prospects-for-electric-vehicle-deployment>
- Fabian Meishner, Dirk Uwe Sauer, 2019: Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids. Elsevier, *eTransportation* 1 (2019) <https://d-nb.info/1226855962/34>
- Craig Morris, 2015: how batteries can stabilize the grid; Energy Transition – The global Energiewende, <https://energytransition.org/2015/06/batteries-stabilize-the-grid/#menuopen>
- Kaushik Patowary, 2019: Gyrobus: The Flywheel-Powered Public Transportation <https://www.amusingplanet.com/2019/02/gyrobus-flywheel-powered-public.html>
- Abraham Alem Kebede, Thierry Coosemans, Maarten Messagie, Towfik Jemal, Henok Ayele Behabtu, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar, 2021: Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application, *Journal of Energy Storage* Volume 40, August 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21004783#!>
- Robert Rapier, 2020: Why Vanadium Flow Batteries may be the future of utility – scale energy storage, *Forbes*, <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2020/10/24/why-vanadium-flow-batteries-may-be-the-future-of-utility-scale-energy-storage/?sh=6faaca6f2305>
- Schmidt et al., 2019: Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, *Joule* 3, 81-100 January 16, 2019, 2018 Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>



Octavio Solis, Frank Castro, Leonid Bukhin, Kinh Pham, David Turner, Gary Thompson, 2015: SAVING MONEY EVERY DAY: LA METRO SUBWAY WAYSIDE ENERGY STORAGE SUBSTATION, Proceedings of JRC 2015 Joint Rail Conference <https://vyconenergy.com//wp-content/uploads/2018/06/Saving-Money-Every-Day-LA-Metro-Subway-Wayside-Energy-Storage-Substation-March-2015.pdf>

Xiaojun Li, Alan Palazzolo, 2021: A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities (arXiv:2103.05224v3 [eess.SY] 13 Jun 2021) <https://arxiv.org/pdf/2103.05224.pdf>

Riferimenti bibliografici ai progetti

eLobster – H2020 <https://www.e-lobster.eu/project-brief/>

BOB – Solingen (DE) <https://www.bob-solingen.de/>

BUS2GRID – Londra (UK) <https://www.sseenergysolutions.co.uk/distributed-energy-infrastructure/our-solutions/bus2grid>

# MAGGIORI INFORMAZIONI SU EfficienCE



Visita il nostro sito web:  
<https://www.interreg-central.eu/efficiency>

## Contatti



+49 341 123 59 10



Responsabili di progetto:

Sebastian Graetz  
[sebastian.graetz2@leipzig.de](mailto:sebastian.graetz2@leipzig.de)

Marlene Damerau  
[m.damerau@rupprecht-consult.eu](mailto:m.damerau@rupprecht-consult.eu)



<https://www.linkedin.com/company/interreg-efficiency/>



[www.facebook.com/Interreg.EfficienCE/](https://www.facebook.com/Interreg.EfficienCE/)



[@Int\\_EfficienCE](https://twitter.com/Int_EfficienCE)



City of Leipzig



Faculty of Civil Engineering,  
Transportation Engineering  
and Architecture



COMUNE DI BERGAMO

