

Life Cycle Cost di un sistema filoviario bimodale a batterie di trazione rapportato al confronto economico con l'autobus tradizionale

Dott. Ingg. Renzo EMILI, Domenico D'AGOSTINO

SOMMARIO – Dal marzo 2005, è in esercizio a Roma la linea filoviaria 90 con caratteristiche fortemente innovative quali: mancanza della linea di contatto nella tratta di penetrazione nel centro della città (km 1,7), alimentazione del motore di trazione con una batteria al nichel ed idruri metallici ricaricata durante la marcia in modalità tradizionale. Non tenendo conto dei costi indiretti per inquinamento, ecc; il tema della valutazione economica dei costi diretti di installazione ed esercizio, rispetto alla più tradizionale modalità autobus, può scaturire unicamente dal confronto tra i rispettivi *life cycle cost*.

1. Life cycle testing delle batterie Ni- M(OH)

Ogni batteria Ni – M(OH) ha vita più o meno lunga a seconda della profondità del processo di scarica e ricarica a cui viene ciclicamente impegnata.

Nel report tecnico sulle batterie per veicoli elettrici pubblicato dall'Electric Power Research Institute U.S.A. (ed.2004) si ha notizia dei test di banco effettuati su batterie Ni – M(OH) cicлически caricate e scaricate con flussi di energia mantenuti al di sotto della capacità nominale, allo scopo di verificare l'influenza delle strategie di carica e scarica sulla durata delle batterie stesse.

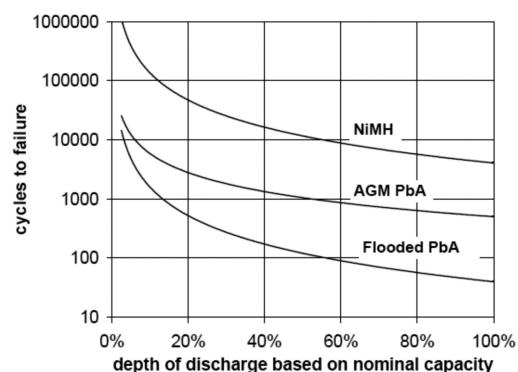
Ad esempio alcuni packs di batterie sono stati impegnati sulla base di cicli con scarica al 20% della loro capacità nominale e poi ricaricati fino all'80% della stessa capacità, mentre altri packs sono stati impegnati sulla base di cicli pari al 40% della capacità e poi ricaricati fino al 60%.

I risultati dei test furono molto interessanti, dimostrando le elevatissime performances delle batterie Ni – M(OH) in fatto di cicli eseguibili fino alla rottura delle batterie stesse: i risultati raggiunti sembrano eclissare la corrente opinione maturata a proposito dei veicoli elettrici leggeri, per i quali la normalità di vita sarebbe intorno ai 1.750 cicli.

Dai test risulta che la totalità dell'energia fornita dalla batteria per tutto il tempo della sua vita (spesso misurata in kW/h totali) si incrementa non linearmente con il decrescere della profondità del ciclo di carica e scarica richiesto dalle condizioni di esercizio: le strategie che comportano più basse scariche rispetto alla capacità nominale della batteria comportano per essa meno stress e migliorano il suo ciclo di vita. Il grafico di fig. 1, elaborato

sulla base dei tests di cui si è fatto cenno, mostra questa relazione per le batterie Ni – M(OH) (per confronto sono pure indicate le caratteristiche di due tipologie di batterie piombo – acido).

Mentre il DOD (depth of discharge) diminuisce, gli incrementi non lineari del ciclo di vita portano a significativi incrementi dell'energia totale erogata dalla batteria nel corso della sua vita. In definitiva l'effetto pratico è quello di estendere notevolmente la vita della batteria quando le condizioni di esercizio consentano il controllo del SOC (State of Charge).



(Fonte: Electric Power Research Institute, California-USA. Rapporto maggio 2004)

Fig. 1 – Numero dei cicli di vita della batteria in funzione della loro profondità di scarica.

SCIENZA E TECNICA

Da tali considerazioni si evince che per il migliore dimensionamento delle batterie di cui dotare i veicoli impiegati su una linea data, ai fini della loro massima durata e minimo life cycle cost di sistema, è innanzitutto necessario conoscere il consumo specifico di energia richiesto dai veicoli stessi, correlato al profilo piano-altimetrico della linea ed alle caratteristiche di marcia in termini di stop and go.

Per l'elaborazione delle considerazioni che seguono si è presa come base l'esperienza fatta con i filobus bimodali impiegati sulla linea filoviaria 90: ne ricaveremo i primi elementi di calcolo del LCC di un siffatto sistema; sul calcolo sarà impostato il confronto tra sistemi equivalenti sotto il profilo trasportistico.

2. Descrizione della linea filoviaria 90

Lunghezza della linea: 22,2 km
 Tratta in rete aerea: 19,0 km
 Tratta in batteria: 3,2 km
 Deposito: un deposito
 Sostazioni elettriche: n.6
 Tensione di alimentazione: 750 V
 Schematicamente la linea può essere rappresentata come in fig. 2.

3. Il veicolo

Il filobus utilizzato è un veicolo snodato della lunghezza di 18 m.

Il veicolo è bimodale. Le fonti di energia utilizzate sono la linea aerea (750 Vcc) e le batterie di trazione di bordo (480 Vcc). Per contenere l'estensione del processo di carica e scarica delle batterie di trazione durante la marcia in modalità batteria il software di gestione esclude gli impianti di climatizzazione, mantenendo in funzione la sola ventilazione.

Le caratteristiche del veicolo sono:

Lunghezza	18.000 mm
Larghezza	2.550 mm
Peso a vuoto	20.100 kg
Peso a pieno carico	30.000 kg
Passeggeri (seduti)	139 (46)
Pendenza massima superabile	12% (9% in batteria)

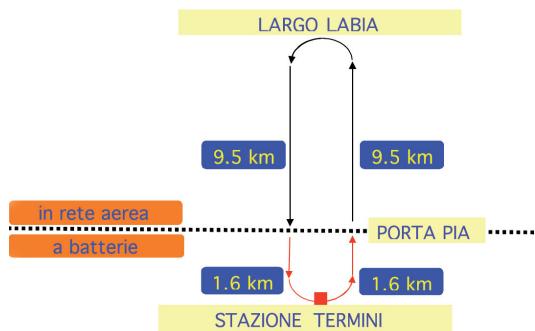


Fig. 2 - Schematizzazione linea 90.

Altimetria linea 90 Express
Stazione Termini - Largo Labia

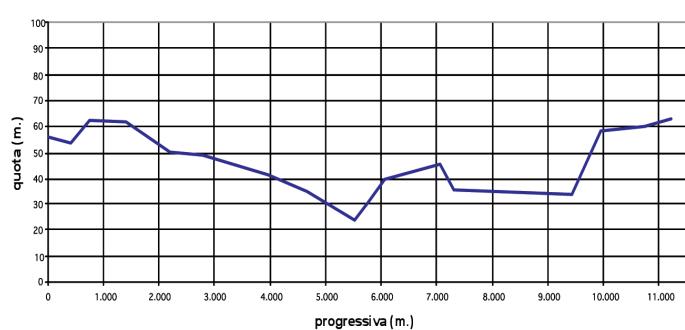


Fig. 3 - Profilo altimetrico linea 90.

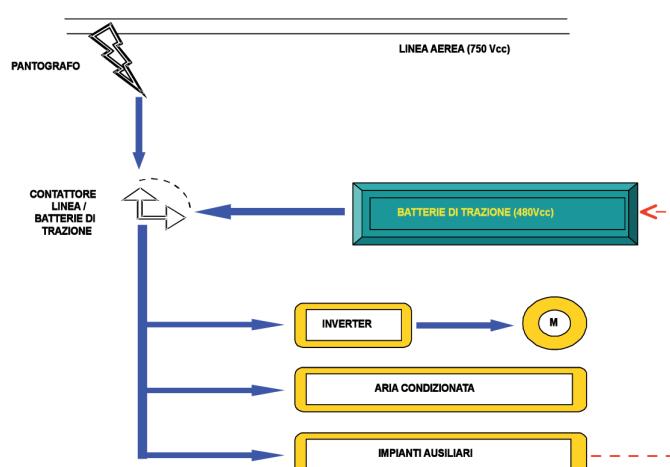


Fig. 4 - Schema a blocchi del filobus.

SCIENZA E TECNICA



Fig. 4 bis - Il filobus nella tratta in marcia su batterie.

4. Caratteristiche principali delle batterie di trazione e strategie di controllo del SOC

Tipo	Nichel Metallo Idruro (Ni-MH)
Peso	840 kg
Tensione nominale	480 Vcc
Capacità nominale	80 Ah
Energia nominale	38,4 kWh
Ri	0,18 Ω

Come già detto per tale tipologia di batterie i *life cycle laboratory bench testes*, con SOC contenuto tra 80% ed il 20% della capacità nominale, hanno dimostrato un notevole aumento del numero dei cicli di carica e scarica effettuabili rispetto a quelli possibili con un SOC esteso tra il 100% ed il 0% della capacità.

Di conseguenza occorre cercare di assicurare il più possibile tale condizione ed anzi migliorarla. Per tale motivo il software di gestione delle batterie di trazione dei filoveicoli della linea 90 gestisce il SOC secondo la relazione:

$$SOC_d = (2 * SOC_B) - 60\%$$

dove SOC_d è lo stato di carica visto dal conducente sul cruscotto di bordo e SOC_B è lo stato di carica reale della batteria (fig. 5). In questo modo il conducente è allertato per carica apparente pari allo 0% quando la batteria in realtà è stata scaricata al limite del 30%. Mentre quando le batterie sono realmente allo stato di carica dell'80%, il conducente "vede" il 100%.

Considerando i valori nominali, l'energia teorica immagazzinata nelle bat-

terie di trazione, secondo questo software di gestione, ammonterebbe a:

$$E_{Bteorica} = V_B (V) \cdot I_B (Ah) \cdot SOC_B (\%) [kWh]$$

Sulla base dei valori nominali sopra esposti, risulterà:

$$E_{Bteorica} (100\%) = 480 \cdot 80 [kWh] = 38,4 [kWh]$$

Limitando il SOC della batteria all'80% l'energia teoricamente utilizzabile risulterà:

$$E_{Bdisponibile} (80\%) = 480 \cdot 80 \cdot 0,8 [kWh] = 30,72 [kWh]$$

Volendo favorire le ragioni di preservazione della durata della batteria, contenendo lo stato di carica all'80% della capacità nominale e lo stato di scarica non oltre il 30%, ne consegue che l'energia effettivamente disponibile è:

$$E_{Bdisponibile} = 480 \cdot 80 \cdot 0,5 [kWh] = 19,20 [kWh]$$

5. Descrizione del processo di carica e scarica della batteria di trazione e suo bilancio energetico

In fig. 6 è rappresentato in tratto in colore azzurro l'andamento del processo di carica e scarica della batteria durante l'intero percorso di giro della linea di 22,2 km, come ottenuto dallo scarico dati della memoria di bordo di un filobus, con un passo di campionamento di 2 m, e veicolo marciante mediamente con i 2/3 del carico (massa complessiva di circa 27.600 kg), in orario cosiddetto di "punta" (tra le ore 7,00 e le 9,00). Nello stesso grafico di fig. 7 è inoltre rappresentata la registrazione della tensione all'ingresso dell'inverter di trazione in modo da mettere in relazione gli eventi collegati alla variazione della tensione ai morsetti d'ingresso dello stesso inverter con il per-

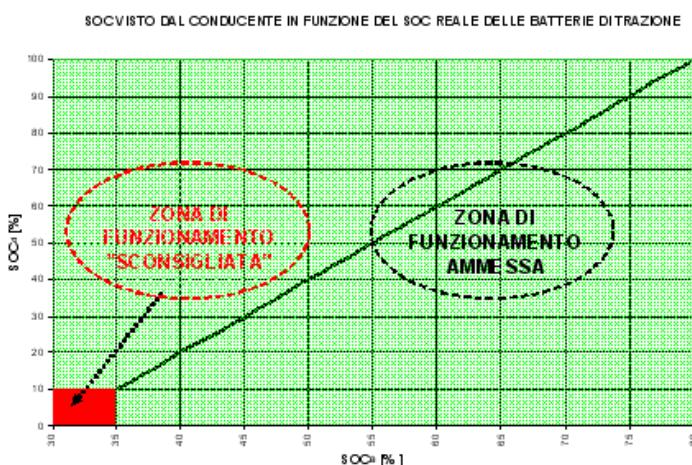


Fig. 5 - Rapporto tra SOC_B e SOC_d sulla base della relazione 5.1.

SCIENZA E TECNICA

corso di giro, rappresentato sulle ascisse in distanze chilometriche, rispetto al punto di riferimento "km zero" assunto in corrispondenza del capolinea in Piazza dei Cinquecento.

Per ogni lunghezza di giro, il percorso effettuato con marcia in modalità batteria è 3,4 km, quello effettuato in modalità rete è 18,8 km.

Come detto nel grafico all'ascissa 0 km è situato il capolinea in Piazza dei Cinquecento, da tale punto il veicolo marcerà in direzione esterna verso l'altro capolinea di Largo Labia muovendosi in modalità batteria fino all'ascissa 1,7 km, dove è situato l'organo di riaggancio delle aste di captazione alla linea di contatto. In tale punto la tensione all'inverter di trazione è commutata dal valore di 480V in uscita dalla batteria al valore di 750 V della linea di contatto. Da tale punto il filobus si muove in modo tradizionale utilizzando l'energia captata dalla linea di contatto.

Da detto punto inizia anche il processo di ricarica della batteria di trazione che, nel caso esaminato, termina in corrispondenza dell'ascissa 7 km. In corrispondenza dell'ascissa 11,1 km è situato il capolinea di Largo Labia.

In corrispondenza dell'ascissa 20,5 km termina la marcia sotto linea di contatto ed inizia di nuovo la marcia in modalità batteria verso il capolinea di Piazza dei Cinquecento. La tensione all'ingresso dell'inverter di trazione passa dal valore di 750 V della linea di contatto al valore di 480 V erogato dalla batteria.

In corrispondenza delle ascisse 2 km e 20,2 km si osserva l'effetto del transito delle aste di captazione sulla zona "neutra" situata all'altezza di Via Nomentana di intersezione del sistema filoviario con quello tramviario (oscillazione a zero della tensione all'ingresso dell'inverter di trazione).

Come si può notare quando il filobus si sgancia dalla rete in corrispondenza del punto di sezionamento "Porta Pia", in direzione Stazione Termini corrispondente alla progressiva di giro km 20,5, il SOC_d vale 100% (cui corrisponde un SOC_B dell'80%). Come già detto da questo punto per la marcia del veicolo sono utilizzate le sole batterie di trazione. L'energia utilizzata in questa fase dal veicolo è rilevata dalla strumentazione di bordo mediante la misura della corrente erogata dalla batteria: $I_{Bk} = I_{Tk} + I_{AUXk}$, essendo I_{Tk} la corrente erogata dall'inverter nell'intervallo di campionamento e I_{AUXk} la corrente erogata ai servizi auxiliari nello stesso intervallo.

Supponendo in prima approssimazione costante la tensione della batteria nel corso del processo di scarica fi-

no alla progressiva di giro km 1,7, lo stato di scarica della batteria, dovuto alla sola energia uscente dalla stessa batteria (7.2) è rappresentato nel grafico di fig. 6 dal valore del SOC_d , che scende a circa il 72%.

Come è rilevabile dalla registrazione rappresentata in fig. 6, per le necessità del motore di trazione, durante la marcia in batteria risulta scaricato il 28% del SOC_d , ossia, vedi grafico di fig. 5, il 14% del SOC_B .

Come anche si osserva nel grafico di fig. 6 all'atto dell'aggancio delle aste di captazione in corrispondenza del sezionamento Porta Pia il processo di ricarica delle batterie riprende invece da un valore di SOC_d pari al 60%. Ciò è dovuto alla energia ϵ_{Bj} , richiesta dai processi dissipativi all'interno della batteria durante la scarica.

Di conseguenza l'effettivo stato di carica della batteria dopo aver percorso i 3,4 km risulterà dalla relazione:

$$SOC_{B, 20,2 \text{ km}} - SOC_{B, 1,7 \text{ km}} = 80\% - 60\% = 20\%$$

e, pertanto, il complessivo ed effettivo fabbisogno energetico risulterà di: $E_{B, 3,4 \text{ km}} = 38,4 * 0,20 = 7,68 \text{ kWh}$.

Il fabbisogno specifico per la marcia del veicolo in modalità batteria nel caso specifico esaminato è risultato dunque di 2,26 kWh/km.

L'estensione della raccolta dei dati e le osservazioni dei consumi medi di energia per un anno solare e per l'intero parco circolante, estese sia alla marcia su batteria che a quella con marcia sotto bifilare, ha evidenziato un consumo medio di energia che per i calcoli relativi al computo del LCC del sistema filoviario in questione può essere assunto mediamente pari a 2,2 kWh/km.

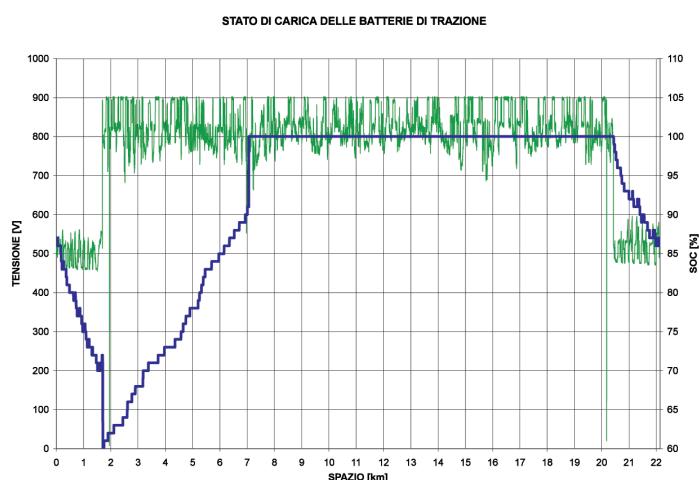


Fig. 6 - Andamento del SOC in funzione dello spazio.

SCIENZA E TECNICA

6. Calcolo del LCC della linea 90 esercita in modalità filobus in funzione della durata delle batterie di trazione

L'installazione di un sistema di trasporto comporta costi diretti che si generano durante tutto il suo arco di vita, dalla progettazione alla costruzione, possesso ed esercizio, fino alla sua alienazione.

Il modello di calcolo per pervenire all'effettivo costo di un sistema nell'arco temporale della sua vita terrà conto dei costi iniziali di progettazione e costruzione, di quelli inerenti le necessità di manutenzione, l'eventuale mancato esercizio per indisponibilità derivanti da difettosità, la revisione generale, il rimessaggio dei veicoli, i servizi logistici non di linea, l'energia di trazione, la necessaria presenza del personale di guida e controllo; vanno inoltre considerati i costi derivanti dal semplice possesso quali tasse ed assicurazioni, ed infine i costi che si genereranno al momento della dismissione del sistema.

Naturalmente si dovranno attualizzare rispetto ad un anno di riferimento i costi che si verificano anno per anno contribuendo singolarmente al costo totale: solo successivamente alla attualizzazione all'anno di riferimento (e cioè ricondotti al loro effettivo valore rispetto a tale anno), i costi potranno essere sommati. Per effettuare tale processo contabile occorre effettuare una previsione sul tasso di inflazione medio che si verificherà nell'arco del tempo di vita del sistema esaminato, e una ulteriore previsione sul tasso di sconto medio di riferimento che si presume sarà praticato dal sistema di credito nello stesso periodo; occorre inoltre ipotizzare l'andamento dei prezzi di mercato di quei prodotti che per la loro particolarità di mercato hanno un loro andamento specifico e slegato dal tasso di inflazione, come ad esempio il prezzo dell'energia di trazione.

n° Filobus 18 m	
Tasso Ufficiale di Riferimento	20
Tasso di inflazione	4%
Tasso di interesse sui mutui	3%
Costo della batteria: € / batteria (anno 0)	5%
Capacità della batteria di trazione: kWh	80.000,00
Cycle Life batterie di trazione: n° cicli	38
Anni di vita batteria	5000
Costo del filobus: €/veicolo (anno 0)	2
Anni di vita filobus	850.000,00
Consumo medio filobus kWh/km (a 2/3 carico max)	20
Costo elettricità: €/kWh (dicembre 2007)	2,2
Costo degli impianti elettrici di trazione: €/km (anno 0)	0,144
Costo rimesaggio: € / veicolo (anno 0)	1.800.000,00
Costo manutenzione ordinaria veicoli:€/km (anno 0,mano d'opera più spese accessorie)	170.000,00
Costo manutenzione ordinaria e sorveglianza impianti T.E.: €/anno (anno 0)	0,24
Costo revisione generale veicoli ad anno 10: €/veicolo	300.000
Costo personale di guida: €/anno* agente (anno 0)	170.000
Valore residuo €	25.000
	0

Fig. 8 - Tabella degli indici di costo utilizzati dagli autori sulla base della loro esperienza.

Per il processo di calcolo si utilizzeranno le seguenti formule:

Calcolo del valore presente (P) di un futuro costo (F) da sostenersi ad un dato anno (N) ad un dato tasso di sconto I:

$$P=F/(1+I)^N$$

Calcolo valore presente (P) di un costo futuro predefinito (A) da sostenersi annualmente per un periodo di anni(N) al dato tasso di sconto (I)

$$P=A[1-(1+I)-N]/I$$

Il calcolo del costo del ciclo di vita effettuato sulla base delle quantità e qualità dei dati disponibili potrà ulteriormente arricchirsi secondo forme complesse, che richiederanno allora specifici programmi di calcolo e, nel caso dei tempi di vita lunghi che caratterizzano i sistemi di trasporto (mediamente intorno ai 20-30 anni), essere soggetti all'alea dovuta alla possibilità del mutare dei fattori economici.

I calcoli possono assumere forme diverse sulla base dei dati disponibili e della precisione che si vuole raggiungere in base alle finalità che si intendono perseguire (confronto tra sistemi diversi, calcoli di redditività, ecc.)

Nella esposizione che segue, finalizzata al confronto fra sistemi di trasporto a diversa modalità di gestione ma con equivalenti capacità, vengono analizzati i costi di vita diretti più significativi relativi all'acquisizione ed esercizio dei sistemi stessi.

Per brevità di trattazione si sono introdotte alcune semplificazioni, scegliendo di non prendere in considerazione i costi di progettazione dei sistemi, oltre ad alcuni costi minori come quelli generati anche dal semplice possesso dei sistemi stessi (es. tasse ed assicurazioni) o dai costi e/o ricavi per dismissioni.

Pertanto i modelli esaminati potrebbero essere ulteriormente arricchiti ed affinati in termini di quantità e precisione dei dati introducibili nel calcolo.

I veicoli della linea filovaria 90 sono bimodali, utilizzando batterie di trazione che hanno peraltro un rilevante costo aggiuntivo. E' perciò coerente proprio qui utilizzare il metodo del calcolo del LCC per valutare quanto influisca la vita delle batterie sul costo complessivo di esercizio del sistema, a seconda di come e quanto variano i cicli di carica e scarica che esse consentono durante la durata della loro vita.

SCIENZA E TECNICA

Flotta di n° 20 FILOBUS 18 m (vita batteria 5.000 cicli)													
Anno	Km veicolo per anno	Km totali flotta n° 20 veicoli per anno	Costo batterie flotta 20 veic.	Costo flotta 20 veicoli (i5%)	Costo Impianti elettrici	Costo rimessaggio	Costo revisione generale	Prezzo unitario elettricità	Costo trazione elettrica	Costo manutenzione veicoli	Costo manutenzione e sorveglianza linea di contatto ed impianti T.E.	Costo Personale di guida(50 turni giornalieri)	TOTALE life cycle cost
0			17.000.000,00	17.117.117,12	3.400.000,00					0,24	300.000,00	1.250.000	
1	56.014,85	1.120.297,00	1.600.000,00	1.364.123,98	1.373.521,75	272.824,80		0,144	351.803,26	274.132,41	305.870,24	1.274.459	
2	56.014,85	1.120.297,00						0,148	358.590,08	279.420,84	311.770,94	1.299.046	
3	56.014,85	1.120.297,00		1.697.923,50				0,153	366.169,38	285.326,79	318.360,66	1.326.503	
4	56.014,85	1.120.297,00						0,158	373.417,19	290.974,44	324.662,16	1.352.759	
5	56.014,85	1.120.297,00		1.763.151,80				0,162	380.236,33	296.288,05	330.590,96	1.377.462	
6	56.014,85	1.120.297,00						0,167	388.337,50	302.600,85	337.634,41	1.406.810	
7	56.014,85	1.120.297,00		1.836.162,36				0,172	395.981,58	308.557,08	344.280,44	1.434.502	
8	56.014,85	1.120.297,00						0,177	403.653,37	314.535,10	402.751,39	1.462.294	
9	56.014,85	1.120.297,00	1.909.138,38					0,183	411.719,39	320.820,30	357.963,45	1.491.514	
10	56.014,85	1.120.297,00						0,188	419.719,87	327.054,45	364.919,35	1.520.497	
11	56.014,85	1.120.297,00	1.985.595,57					0,194	428.207,93	333.668,51	372.299,17	1.551.247	
12	56.014,85	1.120.297,00						0,200	436.605,79	340.212,30	379.600,57	1.581.669	
13	56.014,85	1.120.297,00	2.065.198,24					0,206	445.374,81	347.045,31	387.224,67	1.613.436	
14	56.014,85	1.120.297,00						0,212	454.152,47	353.885,04	394.856,28	1.645.234	
15	56.014,85	1.120.297,00	2.145.794,39					0,218	462.755,95	360.589,05	402.336,45	1.676.402	
16	56.014,85	1.120.297,00						0,225	472.438,06	368.133,55	410.754,41	1.711.477	
17	56.014,85	1.120.297,00	2.232.066,12					0,231	481.361,07	375.086,55	418.512,40	1.743.802	
18	56.014,85	1.120.297,00						0,239	491.419,14	382.924,00	427.257,24	1.780.239	
19	56.014,85	1.120.297,00	2.324.210,53					0,246	501.232,67	390.570,91	435.789,47	1.815.789	
20								0,253	510.726,01	397.968,32	452.732,12	1.886.384	
			19.559.240,88	22.304.791,20	22.458.454,13	4.460.958,30	1.362.726,86		8.533.901,86	6.649.793,90	7.480.166,79	30.951.524,85	123.761.558,76

Fig. 9 - Modello di calcolo del LCC filobus 90 con vita delle batterie di trazione a 5.000 cicli.

Nella tabella della fig. 8 sono indicati i costi unitari valutati all'anno 2007 (anno a cui attualizzare i costi), che sono stati assunti come base per il calcolo dei costi annui poi elencati nella successiva fig. 9: il calcolo prevede un sistema di 20 filobus, in grado di coprire una domanda di circa 2.000 passeggeri per senso di marcia nell'ora di punta.

Tra gli elementi consideriamo: il costo di acquisto dei veicoli, la loro durata, il costo della revisione generale, i costi unitari per la manutenzione e il ricovero, il fabbisogno specifico di energia per chilometro percorso, il numero dei chilometri prevedibilmente percorsi annualmente da ogni veicolo.

Riguardo gli indici di costo indicati nella fig. 8, nonché il loro andamento nel tempo, si precisa che:

- il tasso ufficiale di riferimento nel corso dei prossimi 20 anni è stato previsto mediamente pari al 4% (valore al 26/02/2008);
- il tasso di inflazione nel corso dei prossimi 20 anni è previsto al 3%;
- il tasso di interesse per l'ammortamento dei mutui per l'acquisto di veicoli e realizzazione di infrastrutture è stabilito al 5% (anno 2007);
- il costo delle batterie di trazione (benché se ne attendesse da tempo la notevolissima riduzione, fino anche oltre il 50%, al momento tale circostanza non si sta ve-

rificando) è stato nel calcolo ipotizzato come sotto-messo ad aumento legato al tasso di inflazione;

- il prezzo dell'energia elettrica in €/kWh è stato ipotizzato in aumento in linea con il tasso di inflazione, e pertanto pari al 3% su base annua;
- il costo unitario medio della manutenzione dei veicoli è stato ipotizzato, sulla base delle notizie sulle esperienze estere, in aumento in linea con il tasso di inflazione del 3% su base annua. Comprende i costi di quanto necessario all'uscita giornaliera dei veicoli;
- il costo per la manutenzione e la sorveglianza della linea di contatto e degli impianti T.E. è stato ipotizzato prevedendo la costituzione di un nucleo di agenti addetti al presidio del centro di supervisione impianti T.E. e del controllo degli impianti di linea. L'incidenza del costo rappresentato da questo personale e dalle relative attrezzature è riducibile in misura considerevole nel caso della esistenza di altre linee su cui ripartire l'onere economico del servizio. Anche per questi costi si è ipotizzato un aumento in linea con il tasso di inflazione del 3% su base annua;
- il costo della revisione generale dei filobus al decimo anno di vita: si è ipotizzato un costo del 20% rispetto al costo iniziale del veicolo.

Applicando i costi appena elencati alla situazione di esercizio prevista per la linea filoviaria 90 si può costruire la ta-

SCIENZA E TECNICA

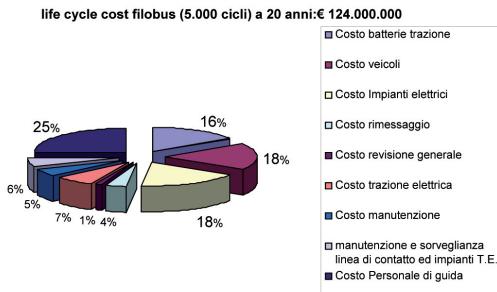


Fig. 10 - Ripartizione del LCC della linea filoviaria 90 in modalità bimodale con vita delle batterie ipotizzata a 5.000 cicli.

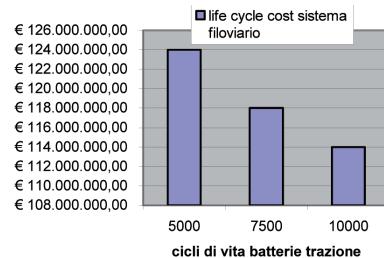


Fig. 13 - LCC della filovia 90 bimodale in funzione dei cicli di vita delle batterie.

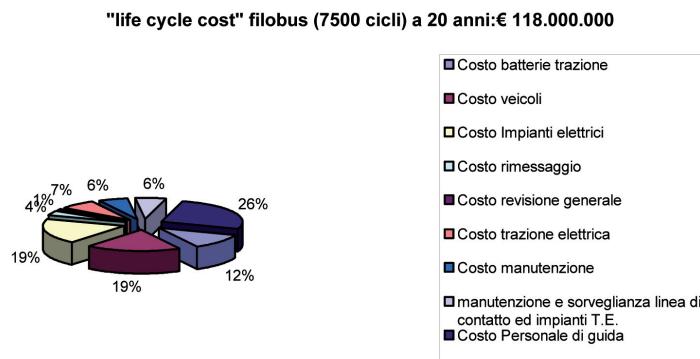


Fig. 11 - Rappresentazione del life cycle cost della linea filoviaria 90 bimodale con vita delle batterie ipotizzata a 7.500 cicli.

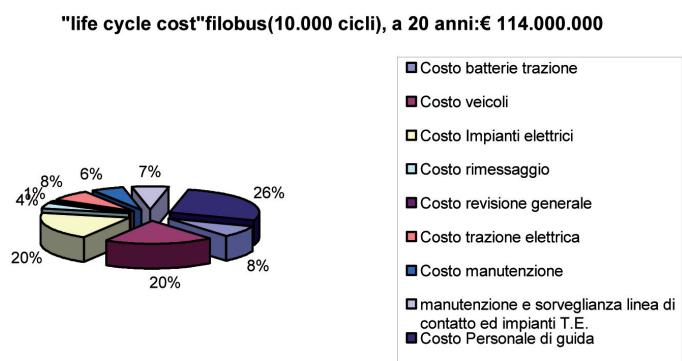


Fig. 12 - Rappresentazione del life cycle cost della linea filoviaria 90 bimodale con vita delle batterie ipotizzata a 10.000 cicli.

bella di calcolo rappresentata nella fig. 9, dove sono registrati tutti i costi che anno per anno si dovranno sostenere per l'esercizio della linea attualizzati al 2007 supponendo una vita delle batterie pari a 5000 cicli: il LCC della linea secondo il modello assunto (arrotondato alle prime tre cifre) è risultato di € 124.000.000.

Le percentuali di ogni singolo contributo a questo costo complessivo sono rappresentate nel grafico rappresentato nella fig. 10, mentre nelle figg. 11 e 12 sono riportati i risultati conclusivi degli analoghi calcoli sviluppati se si suppone la vita delle batterie estesa rispettivamente a 7.500 e 10.000 cicli, e nella fig. 13 sono riportati i risultati del confronto fra i singoli LCC per ognuna delle situazioni ipotizzate a seconda del diverso numero dei cicli di carica e scarica considerati.

Come si può osservare nel grafico della fig. 14, se si adottano strategie di controllo della profondità di carica e scarica fino a conseguire un numero di cicli progressivamente crescente si verifica un considerevole abbattimento del valore di LCC. Abbattimento che, nella situazione teorica risultante dalle prove al banco come sopra esposte, risulta, con vita delle batterie a 10.000 cicli, pari a circa € 10.000.000, e cioè pari all'8% del LCC con batterie a 5.000 cicli (€ 124.000.000). Pertanto l'incidenza del costo delle batterie, che con vita delle batterie stesse di 5.000 cicli è pari al 16% del LCC, si dimezzerebbe fino all'8% se la vita delle batterie arrivasse a 10.000 cicli.

Nei grafici delle figg. 15 e 16 sono riportati gli LCC che risulterebbero rispettivamente nel caso si esercisse la linea filoviaria 90 con un sistema filo-

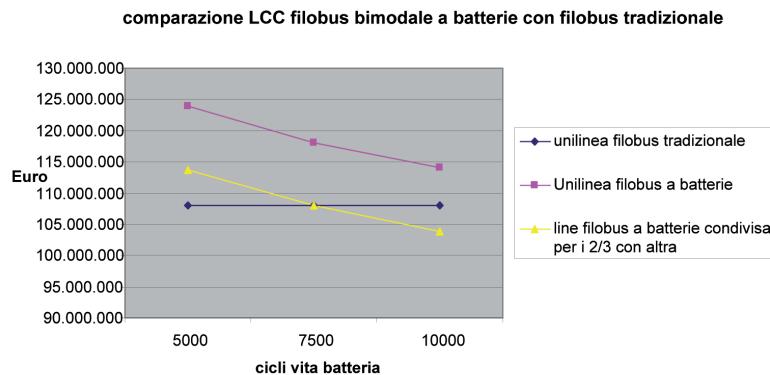


Fig. 14 - Confronto tra il LCC della linea 90 nella situazione “tutta provvista di linea di contatto” con il LCC della stessa filovia in funzione dei cicli di vita ammessi delle batterie.

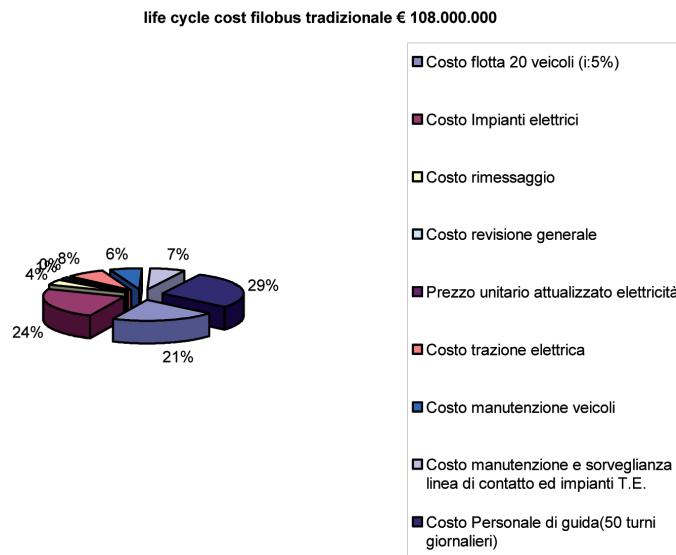


Fig. 15 - Rappresentazione del LCC di filovia tutta attrezzata con tradizionale bifilare.

viario tradizionale (fig. 15) e nel caso che la stessa linea venisse esercita con filobus bimodali a batteria che avessero però la linea di contatto in comune per i 2/3 del percorso con una ulteriore ipotetica linea filoviaria (fig. 16), nell'ipotesi di costituire una rete.

Di particolare interesse è il confronto tra gli LCC calcolati per la unilinea filoviaria 90, di cui ai grafici delle figg. 10, 11 e 12, con quello di una identica linea esercita invece con il tradizionale bifilare per tutto il suo percorso. Il confronto è sintetizzato nel grafico della fig. 14, nel quale è rappresentato in blu il LCC in modalità filoviaria tra-

dizionale (ovviamente costante) e in rosso l'andamento (invece variabile in funzione dei cicli di vita delle batterie) del LCC con veicoli bimodali. Come si può vedere la messa in atto di strategie per l'aumento del numero dei cicli di carica e di scarica riduce l'incidenza del costo delle batterie (aumentandone la durata di vita) e tende progressivamente, con l'aumento della vita delle batterie a 10.000 cicli alla sostanziale equivalenza economica delle due soluzioni. Il rimanente scarto economico (valutabile circa in € 300.000/anno) sarebbe a tutt'oggi il “prezzo” necessario per l'adozione di un sistema di trasporto di superficie a emissioni inquinanti zero, privo della linea di contatto aerea nel centro storico; linea che costuisce fino ad ora l'ostacolo alla introduzione della modalità filoviaria nelle città d'arte.

Qualora poi si volessero prendere in considerazione i costi esterni dovuti all'inquinamento e derivanti dalla tradizionale modalità di trasporto con autobus fino ad ora adottata, il suddetto scarto economico si troverebbe ad essere ampiamente ridimensionato, e probabilmente rovesciato, in una più complessiva valutazione dei costi/benefici.

Se si dovesse costituire una vera e propria rete con la creazione di più linee filoviarie, i costi di installazione ed esercizio degli impianti elettrici di alimentazione si ripartirebbero poi in adeguata proporzione tra le diverse tratte, conducendo di fatto all'abbassamento dei valori di LCC delle singole linee filoviarie. Tale situazione è mostrata nel grafico di fig. 14, nel quale la linea in colore giallo indica l'andamento del LCC in funzione dei cicli di vita delle batterie, qualora la linea di contatto della filovia 90 fosse condivisa, per esempio, per i 2/3 del suo percorso con altra diversa linea filoviaria.

Come si vede, in questo caso il valore del LCC della linea bimodale pareggerebbe quello della linea tradizionale anche con la vita delle batterie a 7.500 cicli; con una vita delle batterie superiori si perverrebbe addirittura ad un minore costo della linea bimodale rispetto a quella tradizionale.

AUTOBUS ARTICOLATI 18m	
Tasso di sconto	20
Tasso di inflazione	4%
Tasso di interesse sui mutui	3%
Anni di vita autobus	5%
Costo autobus	12
Consumo autobus litri/Km (a 2/3 carico max)	385.000
Costo gasolio €/l (dicembre 2007 con accise ridotte 30%)	0,833
Costo rimessaggio € / Veicolo	170.000,00
Costo di manutenzione ordinaria € / Km (mano d'opera e spese accessorie)	0,7
Costo revisione generale anno n° 8 €/veicolo	96.250,00
Valore residuo €	0

Fig. 16 - Tabella degli indici di costo utilizzati dagli autori sulla base della loro esperienza.

7. Calcolo del LCC di una linea autobus equivalente alla linea 90 come capacità di trasporto

E' interessante confrontare il LCC delle diverse situazioni ipotizzate per la linea filoviaria 90 con il LCC della stessa linea esercita con autobus da 18 m di capacità equivalente dai filobus.

Nella fig. 16 è riportata la tabella dei costi unitari alla base del calcolo del LCC.

Nella tabella sono state ipotizzate le seguenti condizioni:

- anni di vita degli autobus: 12, con necessità di revisione generale all'ottavo anno;
- tasso di aumento annuale del costo del gasolio: sulla base dell'andamento dei prezzi medi del petrolio Brent riportato nel grafico di fig.17 tra gli anni 2000-2006 (aumento del prezzo del Brent del 15%) si ritiene verosimile una previsione di incremento annuo del prezzo del gasolio al tasso medio del 5%.

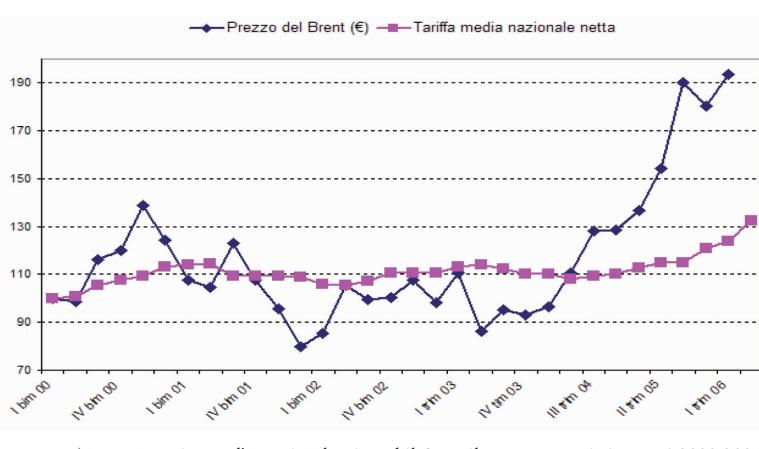
Sulla base degli elementi economici descritti il LCC del sistema basato su autobus tradizionali, con capacità di trasporto equivalente a quella della linea filoviaria 90, risulta di circa € 111.000.000,00. Nella fig.18 si può osservare l'incidenza percentuale delle singole categorie di costi che compongono la somma.

8. Conclusioni

I diversi LCC delle modalità di trasporto prese in esame - filobus bimodale con batterie, filobus tradizionale, autobus - vengono rapportati alla situa-

zione reale della linea 90 realizzata a Roma per consentire un confronto che non rimanga ipotetico. Tale confronto è sintetizzato dal grafico di fig. 19 e conduce alle seguenti conclusioni:

- il filobus bimodale - se esercito in modalità unilinea - ha un *life cycle cost* (indicato nel grafico con linea color magenta) che appare il sistema più costoso. Tuttavia lo scostamento economico rispetto alle modalità tradizionali (con autobus, indicato con linea in colore azzurro chiaro; con filobus tradizionale, indicato con linea in colore blu) è suscettibile di progressiva riduzione con l'aumentare del numero di cicli di vita consentiti dalle batterie di trazione, fino a portarsi ad un sostanziale pareggio dei costi nel caso che le batterie di trazione raggiungano i 10.000 cicli di carica e scarica. Il raggiungimento della vita media delle batterie a 7.500 cicli, che in base a quanto fino ad oggi sperimentato è il traguardo più verosimile, il maggior costo del sistema filoviario bimodale a batteria rispetto al sistema autobus rimane comunque contenuto intorno al 9%. La valutazione economica basata sul calcolo del *life cycle cost* considera i soli costi diretti di sistema e non considera gli ulteriori costi esterni aggiuntivi che l'esercizio del trasporto in modalità autobus scarica sulla collettività in termini di maggiore inquinamento complessivamente prodotto;
- l'uso delle batterie tale da consentire il raggiungimento dei 7.500 cicli di vita, che l'esperienza fatta sulla linea 90 dimostra ipotesi verosimile, comporta che, do-



(Fonte: Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas, rilevamento statistico anni 2000-2006)
Fig.17 - Andamento degli indici dei prezzi del petrolio Brent (linea blu) e dell'energia elettrica per utenti industriali con potenze impegnate oltre 2MW (linea rossa), fatti pari a 100 nel I bimestre dell'anno 2000.

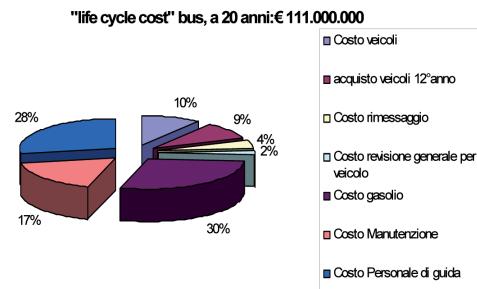


Fig. 18 - LCC della linea 90 esercita con modalità BUS da 18 m.

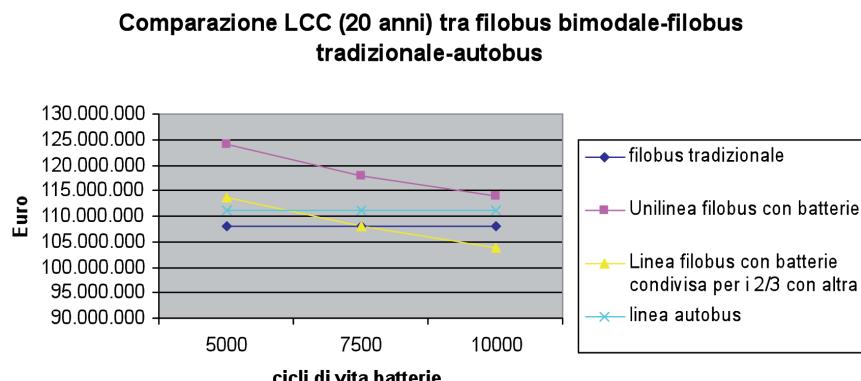


Fig. 19 - Confronto tra i LCC della linea 90 esercita in diverse modalità, in funzione dei cicli di vita ammessi delle batterie.

po 20 anni di esercizio, il costo della linea così esercita, con i parametri e prezzi del ciclo economico futuro ipotizzati nei calcoli del presente studio, è maggiore di circa il 9% rispetto al costo di una linea filoviaria tradizionale. Tuttavia l'uso delle batterie, seppure al momento complessivamente più costoso, consente di rimuovere le ragioni ostative alla introduzione della modalità di trasporto filoviaria all'interno dei centri storici delle città, consentendo l'esercizio senza linea di contatto nei contesti più delicati;

- una rete di più linee in grado di condividere parzialmente i costi di costruzione e gestione dell'infrastruttura del sistema elettrico di trazione consentirebbe di

ridurre ulteriormente il LCC di ciascuna linea filoviaria, portando il LCC complessivo della rete a valori economici addirittura inferiori a quelli della modalità di trasporto autobus;

- per quanto riguarda il costo delle batterie di trazione, valutato nel calcolo del LCC crescente insieme al tasso di inflazione, va qui ripetuta l'attesa di una consistente diminuzione dei loro prezzi; tuttavia, qualora essa, come fino ad oggi avvenuto, non dovesse verificarsi, rimane invece molto concreto il problema dell'aumento dei combustibili, il cui tasso di crescita va già oggi ben al di là di quello della inflazione (esame del grafico di fig. 17: crescita del prezzo del petrolio tra l'anno 2000 e l'anno 2006).

Nel lungo periodo, quindi, la maggiore vita utile dei veicoli filoviari, le loro minori necessità di manutenzione ed il miglior rendimento energetico del processo di trazione elettrica, sono in grado di pareggiare i maggiori costi dovuti all'acquisto di filobus bimodali e all'impianto dell'infrastruttura elettrica.

La possibilità di prolungare la vita delle batterie oltre i 7.500 cicli, l'attesa diminuzione del prezzo delle batterie ed, infine, la possibilità di utilizzare sperimentalmente le infrastrutture elettriche di trazione, abbasserebbe notevolmente il *life cycle cost* del sistema filoviario bimodale, e tale modalità, anche sotto il mero profilo della convenienza economica diretta, diverrebbe più vantaggiosa del sistema autobus equivalente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Advanced Batteries for Electric Drive Vehicles - Final Report, May 2004, By Electric Power Research Institute, California-USA.

Sommaire

LIFE CYCLE COST D'UN SYSTÈME DE BUS À FIL BIMODALE À BATTERIE DE TRACTION COMPARÉ DU POINT DE VUE ÉCONOMIQUE AU SYSTÈME DE BUS TRADITIONNEL

Depuis Mars 2005, est en service à Rome la ligne 90 de bus à fil avec des caractéristiques fortement innovatrices comme: manque de ligne de contacte dans le parcours de pénétration du centre ville (1.7 km), alimentation du moteur de traction par batterie au nickel et hydrures métalliques rechargeée durant la marche en modalité traditionnelle. Sans tenir compte des coûts indirectes par pollution, etc., le thème de l'évaluation économique des coûts directes d'installation et fonctionnement, par rapport à la modalité de bus traditionnelle, peut dériver uniquement de la comparaison entre les respectifs *Life Cycle Cost*.

Summary

LIFE CYCLE COST OF A BIMODAL TROLLEY-BUS SYSTEM WITH TRACTION BATTERIES IN COMPARISON TO TRADITIONAL BUS

The new trolley-bus line n. 90 is being operated in Rome since March 2005 with highly innovative characteristics such as: lack of contact line in the line section penetrating the city centre (km 1,7), traction engine fed by a nickel and metallic hydride battery that is charged during vehicle traditional run. The economical evaluation of operation and installation direct costs of this transport solution, with respect to the traditional bus, can be done by comparing the relevant *life cycle costs*, without taking into account pollution indirect costs.

Zusammenfassung

LCC EINES TROLLEYBUSSYSTEMS, DESSEN ENERGIESPEISUNG VON EINER OBERLEITUNG ODER VON AKKUMMULATOREN ENTLANG DER LINIE ERFOLGT. OKONOMISCHER VERGLEICH MIT EINEM TRADITIONELLEN BUSSYSTEM-

Seit März 2005 ist im Betrieb in Rom eine Trolleybuslinie, deren Merkmalen sehr innovativ sich aufweisen. Die Energiespeisung erfolgt durch Nickel – und Metallischen idridenakkus im Teil der Linie (1,7 km), der im Stadtzentrum sich befindet.

Der Rest der Linie ist mit einer normalen Oberleitung ausgerüstet.

Neben einer kurze Systems Beschreibung und Funktionsweise, es werden Betriebs – und Unterhaltungskosten vorgestellt, die mit denen einer traditionellen Buslinie vergleicht werden.



Perseo



6141-05

DISPONIBILI N. 50 ESEMPLARI AL QUARZO

PREZZO:	€ 130,00 IVA inclusa per i Soci;
	€ 160,00 IVA inclusa per i non Soci e abbonati alle riviste IF-TP;
più	€ 10,00 spese di spedizione.

Condizioni di pagamento: pagamento anticipato sul c.c.p. N. 31569007 intestato a Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani – Via Giolitti, 48 – 00185 Roma, indicando la causale di versamento, oppure tramite bonifico bancario: INTESA SAN PAOLO - IBAN: IT80 O03069 03235 100000000008 - BIC: IBSPITTM.

Per informazioni e ordini contattare Sig. Stefano Leonetti FS. 970-6825 064742986 – Fax 064742987 – e-mail: amministrazione@cifi.it