

Il problema della scelta fra trazione ferroviaria elettrica e Diesel

Dott. Ingg. Antonio DANESI^(*) – Daniele MINGOZZI^(**)

1. Introduzione

I sistemi di trazione attualmente adottati sulle reti ferroviarie mondiali sono essenzialmente elettrici⁽¹⁾ o termici con ciclo Diesel. La trazione a vapore è stata gradualmente abbandonata a partire dagli anni '50 e sopravvive con rari esempi in Cina e per usi amatoriali, mentre la turbina a gas ha avuto scarsa utilizzazione, per il basso rendimento energetico e la notevole richiesta di aria per il suo funzionamento. Altri sistemi innovativi di produzione di energia, come ad esempio le "fuel cell", sono in fase sperimentale e ancora non economicamente vantaggiosi.

Come è noto, la principale differenza fra il sistema termico e quello elettrico consiste nel fatto che nel primo l'energia è prodotta direttamente sulla macchina, mentre nel secondo l'energia è fornita dall'esterno tramite una linea di contatto alimentata dalla rete elettrica nazionale o da una rete

dedicata. La scelta del sistema di trazione da impiegare discende da una serie di valutazioni tecnico-economiche. In Europa e in Giappone, è oggi elettrificata una vastissima parte della rete ferroviaria, mentre l'impiego della trazione Diesel è riservato a linee a medio-scarso traffico.

Per quanto riguarda l'Italia, la trazione elettrica si estende oggi su circa il 60% della rete ferroviaria del Paese, coprendo oltre il 90% del traffico complessivo. Viceversa, nel resto del mondo solo una piccola porzione della rete ferroviaria è elettrificata, per le diverse esigenze del trasporto. Ad esempio, negli USA e in Canada i principali vantaggi operativi che discendono dall'elettrificazione di una linea ferroviaria sono, generalmente, meno sentiti rispetto all'Europa. Infatti, il traffico ferroviario nordamericano è relativamente lento e a scarsa densità, essendo le linee dedicate in prevalenza al trasporto di merci a basso valore specifico sul lungo raggio.

Complessivamente, nel mondo, lo sviluppo delle linee elettrificate supera oggi i 200.000 km e corrisponde a circa il 20% dell'estensione globale delle reti ferroviarie.

2. Caratteristiche tecniche dei sistemi di trazione elettrico e Diesel

Un mezzo di trazione elettrico utilizza l'energia captata da una linea di contatto alimentata o dalla rete elettrica industriale ad alta tensione o da una rete elettrica dedicata. L'energia elettrica della rete esterna è opportu-

namente trasformata per l'utilizzo ferroviario in specifiche sottostazioni. Le caratteristiche degli impianti fissi cambiano a seconda del sistema elettrico prescelto. Anche i mezzi di trazione differiscono a seconda del sistema di alimentazione, ma, allo stato attuale della tecnica, è ormai generalizzato l'impiego dell'elettronica di potenza per il controllo dei motori di trazione del tipo trifase, asincrono o anche sincrono. In ogni caso, in ingresso sono previsti organi di captazione e di interruzione adeguati al sistema di alimentazione, ai quali segue un primo stadio di conversione: per la corrente alternata (50 Hz o 16,7 Hz) si tratta di un trasformatore abbassatore della tensione e di uno stadio raddrizzatore che fornisce una tensione continua intermedia stabilizzata, con la quale si alimentano i convertitori continua-trifase (inverter) di alimentazione dei motori a frequenza e tensione variabile per il controllo della coppia e della velocità. Nei mezzi a corrente continua non si ha il trasformatore ma un filtro di ingresso ed eventualmente uno stadio continua-continua di stabilizzazione della tensione intermedia, con la quale si alimentano gli inverter come nel caso precedente. In entrambi i casi dalla tensione intermedia si alimentano anche i servizi ausiliari di bordo. Con adeguate combinazioni degli stadi di ingresso, è possibile realizzare mezzi multitensione atti a circolare sotto sistemi diversi. È possibile anche realizzare degli azionamenti reversibili, in grado di frenare elettricamente recuperando l'energia meccanica e riversandola in linea per alimentare altri treni o altri servizi.

In un mezzo Diesel è presente il motore termico primario con il suo corredo di servizi ausiliari, (come pompe, radiatori, ventilatori, ...) e con i serbatoi di combustibile. Poiché le caratteristiche meccaniche all'albero di uscita del motore non sono idonee per la trazione, è necessaria una trasmissione che modifichi le curve per renderle prossime a quelle ideali. Questa attualmente può essere di tipo idraulico o elettrico.

(*) Dottore di ricerca in Ingegneria dei Trasporti, Università di Bologna – DI-START.

(**) Dottore di ricerca in Ingegneria dei Trasporti, libero professionista.

(1) In campo ferroviario esiste una notevole varietà di sistemi di trazione elettrica, sia a corrente continua, sia a corrente alternata monofase. In ogni caso, in funzione della potenza da trasmettere, si adottano alte tensioni di linea, per mantenere valori di corrente contenuti. Attualmente, le norme EN definiscono i sistemi unificati: 25 kV - 50 Hz; 15 kV - 16,7 Hz; 3 kV cc; 1,5 kV cc; 750 V cc, quest'ultimo limitatamente alla trazione leggera (tram, metro, etc.).

Nel primo caso uno o più convertitori di coppia sono eventualmente associati con cambio meccanico a più marce e la trasmissione è completata con un invertitore, alberi di trasmissione e ponti per trasmettere la coppia agli assi motori. Questo tipo di trasmissione è idoneo per potenze limitate; per grosse potenze e coppie elevate i cambi idraulici e i numerosi alberi di trasmissione diventano molto pesanti e di difficile gestione, per cui si preferisce la trasmissione elettrica. Così al motore termico è accoppiato un alternatore, che tramite un raddrizzatore alimenta il circuito intermedio a corrente continua che alimenta gli inverter per l'azionamento dei motori elettrici di trazione su ciascun asse, come nel caso della trazione elettrica.

Si può quindi osservare come una locomotiva Diesel abbia più componenti di una corrispondente locomotiva elettrica, e segnatamente il motore termico primario con i suoi accessori ed i serbatoi del combustibile. Pertanto, la potenza utile è inferiore a quella di una locomotiva elettrica di pari peso e dimensioni complessive.

Questo comporta che, a pari peso aderente, può corrispondere un pari sforzo di trazione trasmissibile alla rotaia, ma, per effetto della minore potenza, la locomotiva Diesel può sviluppare velocità minori (cioè treni di pari peso ma più lenti ovvero treni di uguale velocità ma più leggeri). Inoltre, la necessità di fornire servizi ausiliari al treno, quali l'illuminazione, la climatizzazione, etc, sottrae potenza al mezzo Diesel riducendone ulteriormente la potenza specifica destinata alla trazione.

Tutto ciò permette alle locomotive elettriche di raggiungere maggiori valori della velocità commerciale e maggiori carichi rimorchiabili e, quindi, capacità di trasporto più elevate. E' da notare che questa differenza si esalta all'aumentare della richiesta di potenza. In particolare, il sistema elettrico risulta particolarmente vantaggioso, se non insostituibile, oltre che sulle linee ad alta velocità, anche nei trasporti ferroviari di massa, specie se a fermate ravvicinate (urba-

ni e suburbani), e sulle linee a forte pendenza⁽²⁾.

Di contro, nel caso di automotrici il confronto è meno svantaggioso, perché la parte propulsiva rappresenta solo una quota del peso complessivo del veicolo e quindi la differenza di potenza specifica incide meno ed è possibile avere treni automotori Diesel con prestazioni abbastanza simili a quelli elettrici, almeno nel campo delle velocità convenzionali intorno ai 140÷160 km/h.

In generale, quindi, la trazione elettrica permette:

- maggiori potenze, a parità di peso e dimensioni delle locomotive;
- minor consumo e minor costo energetico, anche in virtù delle possibilità di recupero dell'energia in frenatura (per arresto o in discesa);
- minori costi di manutenzione e riparazione delle locomotive;
- assenza delle problematiche relative all'autonomia, alle attrezzature di rifornimento delle locomotive e ai perditempo di rifornimento, con conseguente aumento della disponibilità dei mezzi all'esercizio;
- minor inquinamento da rumore e assenza di inquinamento atmosferico lungo la linea, problema particolarmente sentito nel caso di trasporti urbani o suburbani, in grandi stazioni terminali o in linee con lunghe gallerie, specialmente in salita.

D'altra parte, devono essere sottolineati alcuni importanti punti a favore della trazione Diesel. Infatti:

- la trazione elettrica necessita di ingenti investimenti per la costru-

zione e l'esercizio di impianti fissi di trasformazione e di distribuzione dell'energia, non richiesti per l'alimentazione delle locomotive Diesel;

- le linee ferroviarie a trazione elettrica richiedono maggiori franchi di sicurezza per la costruzione di tunnel e ponti, data la presenza della catenaria.

3. Rendimento totale del sistema di trazione elettrico e Diesel

Per rendimento totale di un sistema di trazione ferroviario si intende il rapporto tra l'energia utile ai cerchioni e la quantità di energia assorbita dalle locomotive. Un calcolo rigoroso del rendimento complessivo del sistema si presenta come estremamente complesso, soprattutto se riferito al caso della trazione elettrica, date le molteplici componenti da considerare (centrali di produzione, linee di trasmissione, ...). Tuttavia, appare opportuno esporre alcune considerazioni di massima a tal proposito.

Fra i motori termici, il motore Diesel è quello che garantisce il rendimento termico maggiore (dell'ordine del 40%), essendo il rendimento termico definito come il rapporto fra la capacità termica del carburante ed il lavoro meccanico utile al giunto di accoppiamento del motore. Gli organi di trasmissione (meccanici, idraulici o elettrici) hanno un rendimento proprio pari a circa l'85% e portano il rendimento totale di una locomotiva Diesel intorno al 30%⁽³⁾.

Il rendimento proprio di una locomotiva elettrica è pari a circa l'80%, ma il rendimento totale del sistema di trazione elettrica dipende dal tipo di centrali utilizzate per la produzione

⁽²⁾ Per svolgere un servizio di tipo suburbano è richiesto un consumo di energia che, a parità di peso del treno e di lunghezza del percorso, può arrivare quasi a cinque volte quello che sarebbe sufficiente per un servizio diretto. I vantaggi energetici di una elettrificazione sono quindi molto consistenti nel caso delle ferrovie suburbane.

⁽³⁾ La trazione Diesel ferroviaria è oggi orientata quasi esclusivamente, per quanto riguarda la trasmissione della potenza, sulla trasmissione elettrica (sia in Europa che negli USA).

dell'energia e dalla tipologia delle linee di trasmissione. L'energia necessaria per la trazione elettrica è ancora oggi prodotta in larga misura nelle centrali termoelettriche⁽⁴⁾, le quali sono caratterizzate da un rendimento pari circa al 35% ÷ 40%, per le centrali convenzionali, e al 50 ÷ 60% per le più moderne centrali a ciclo combinato⁽⁵⁾. Tutto ciò comporta che il rendimento complessivo del sistema di trazione elettrico, tenuto conto anche delle perdite in linea, si abbassa tipicamente a valori dell'ordine del 30%, quindi paragonabili al caso della trazione Diesel⁽⁶⁾.

In conclusione, in termini di rendimento energetico totale, i due sistemi di trazione non presentano a tutt'oggi differenze significative.

4. Studio dei costi associati al sistema di trazione elettrica e Diesel

Il problema della scelta fra trazione elettrica e Diesel per una linea ferroviaria si pone in termini di confronto fra le prestazioni ed i costi di esercizio della linea prima e dopo l'elettificazione, una volta che siano stati messi in conto i costi per l'elettificazione della linea stessa.

I costi di esercizio per la trazione Diesel si possono considerare propor-

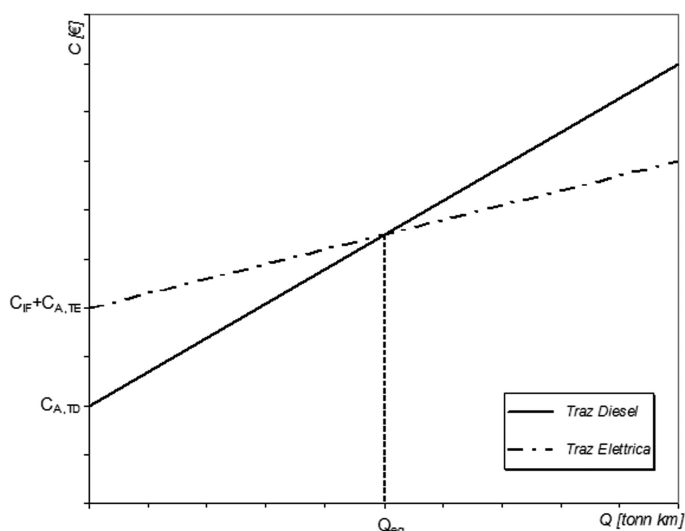


Fig. 1 – Andamento dei costi in funzione del traffico ferroviario nel caso di trazione elettrica (TE) e Diesel (TD).

zionali al volume di traffico. La trazione elettrica, invece, impone forti oneri per la costruzione e l'esercizio degli impianti fissi di alimentazione dei mezzi di trazione (linee primarie, sottostazioni elettriche, linee di contatto, ...), che rappresentano importanti voci di costo indipendenti dal volume di traffico sulla linea. L'incidenza dei costi per la costruzione e la gestione degli impianti fissi segna un limite (economico) alla convenienza della elettrificazione su quelle linee a bassa intensità di traffico per le quali le economie di esercizio, che possono essere garantite dalla trazione elettrica rispetto alla trazione Diesel, non riescono a compensare le maggiori spese per i suddetti impianti fissi.

Il diagramma dei costi totali (costi di esercizio, di manutenzione e oneri di capitali) della trazione elettrica in funzione del traffico sulla linea (fig. 1) risulta una retta caratterizzata da un'ordinata all'origine piuttosto elevata. Tale ordinata rappresenta i costi per gli impianti fissi (indipendenti dal traffico). L'analogo diagramma per la trazione Diesel risulta invece una retta caratterizzata da un'inclinazione maggiore, causata dai maggiori costi

di esercizio, e da un'ordinata all'origine pressoché nulla.

Nel dettaglio, i costi totali associati ai sistemi di trazione elettrica (C_{TE}) e Diesel (C_{TD}) dipendono dal volume e dalla tipologia di traffico e dalle caratteristiche della linea ferroviaria allo studio. Il costo totale è dato infatti dalla somma dei seguenti termini:

- 1) costo dell'energia consumata dalle locomotive ($C_{E,TE}$ per la trazione elettrica e $C_{E,TD}$ per la trazione Diesel);
- 2) costo per il personale di condotta, la manutenzione e la riparazione delle locomotive ($C_{L,TE}$ per la trazione elettrica e $C_{L,TD}$ per la trazione Diesel);
- 3) oneri relativi al capitale investito nelle locomotive ($C_{A,TE}$ per la trazione elettrica e $C_{A,TD}$ per la trazione Diesel);
- 4) solo per la trazione elettrica, costo degli impianti fissi di alimentazione delle locomotive elettriche (C_{IF} , comprendente gli oneri relativi al capitale investito, il costo per la manutenzione e la riparazione e il costo del personale addetto a tali impianti).

⁽⁴⁾ Nel 2005, la produzione nazionale di energia elettrica era coperta per il 71,7% attraverso centrali termoelettriche e dal 14,3% attraverso fonti rinnovabili (idroelettrica, geotermica, eolica e fotovoltaica). Il restante 13,9% è importato direttamente dall'estero.

⁽⁵⁾ La maggior parte delle centrali termoelettriche è alimentata a gas naturale (59,2%), carbone (17,3%) e derivati petroliferi (14,2%). Percentuali minori (circa il 2,3%) impiegano gas derivati (gas di acciaieria, di altoforno, di cokeria, di raffinaria) e un generico paniere di "altri combustibili" (circa il 7%) in cui sono comprese diverse fonti "minori", sia fossili che rinnovabili (biomassa, rifiuti, coke di petrolio, Orimulsion, bitume e altri).

⁽⁶⁾ Per confronto, una locomotiva a vapore potrebbe raggiungere un rendimento totale non superiore al 10%.

In formule, si può scrivere:

$$C_{TE} = C_{E,TE} + C_{L,TE} + C_{A,TE} + C_{IF} \quad (1)$$

e

$$C_{TD} = C_{E,TD} + C_{L,TD} + C_{A,TD} \quad (2)$$

Siano η_{TE} e η_{TD} rispettivamente il rendimento totale del sistema di trazione elettrica e Diesel, $c_{u,TE}$ e $c_{u,TD}$ il costo unitario dell'energia elettrica e del gasolio⁽⁷⁾ ed L il lavoro di trazione richiesto per l'esercizio della linea ferroviaria. Il lavoro di trazione vale:

$$L = g \cdot r \cdot Q \quad (3)$$

essendo Q il volume di traffico sulla linea (espresso in tkm), r il coefficiente unitario medio di resistenza al moto dei convogli⁽⁸⁾ (in N/kN) e g l'accelerazione di gravità (pari a 9,81 m/s²). Il costo dell'energia vale allora:

$$C_{E,TE} = a_{TE} \cdot c_{u,TE} \cdot L / \eta_{TE} = a_{TE} \cdot \dots \cdot c_{u,TE} \cdot g \cdot r \cdot Q / \eta_{TE} \quad (4)$$

per la trazione elettrica e

$$C_{E,TD} = a_{TD} \cdot c_{u,TD} \cdot L / \eta_{TD} = a_{TD} \cdot \dots \cdot c_{u,TD} \cdot g \cdot r \cdot Q / \eta_{TD} \quad (5)$$

per la trazione Diesel, essendo a_{TE} e a_{TD} due coefficienti correttivi che permettono di inglobare nell'espressione del costo dell'energia il costo dei lubrificanti necessari per le locomotive e, solo per le locomotive Diesel, gli oneri di funzionamento dei depositi di carburante ($1 < a_{TE} < a_{TD}$). Ponendo

$$k_{E,TE} = a_{TE} \cdot c_{u,TE} \cdot g \cdot r / \eta_{TE} \quad (6)$$

e

$$k_{E,TD} = a_{TD} \cdot c_{u,TD} \cdot g \cdot r / \eta_{TD} \quad (7)$$

risulta

$$C_{E,TE} = k_{E,TE} \cdot Q \quad (8)$$

per la trazione elettrica e

$$C_{E,TD} = k_{E,TD} \cdot Q \quad (9)$$

per la trazione Diesel ($k_{E,TE} < k_{E,TD}$). In sostanza, quindi, il costo dell'energia

necessaria per il trasporto è proporzionale al traffico e maggiore per il caso Diesel rispetto a quello elettrico.

Per ciò che riguarda il costo per la manutenzione, la riparazione ed il personale di condotta delle locomotive, anch'esso risulta proporzionale al volume di traffico Q , secondo le costanti di proporzionalità $k_{L,TE}$ e $k_{L,TD}$. Infatti, risulta, per la trazione elettrica e Diesel rispettivamente,

$$C_{L,TE} = k_{L,TE} \cdot Q \quad (10)$$

e

$$C_{L,TD} = k_{L,TD} \cdot Q \quad (11)$$

con $k_{L,TE} < k_{L,TD}$ per i minori oneri di manutenzione delle locomotive elettriche.

Riguardo invece agli oneri relativi al capitale investito nelle locomotive, essi sono proporzionali ad N , potenza complessiva del parco locomotori necessario, secondo i coefficienti $k_{A,TE}$ e $k_{A,TD}$. Vale infatti:

$$C_{A,TE} = k_{A,TE} \cdot N \quad (12)$$

per la trazione elettrica e

$$C_{A,TD} = k_{A,TD} \cdot N \quad (13)$$

per la trazione Diesel, con $k_{A,TE} < k_{A,TD}$ per il minor costo delle locomotive elettriche a parità di potenza e per la loro maggiore vita utile.

Infine, per la trazione elettrica, il costo degli impianti fissi è proporzionale alla lunghezza s della linea, intendendo per lunghezza di una linea lo sviluppo dei binari e risolvendo così implicitamente il caso di linee a doppio binario:

$$C_{IF} = c_{IF} \cdot s \quad (14)$$

Pertanto, si può scrivere:

$$C_{TE} = (k_{E,TE} + k_{L,TE}) \cdot Q + k_{A,TE} \cdot \dots \cdot N + c_{IF} \cdot s \quad (15)$$

e

$$C_{TD} = (k_{E,TD} + k_{L,TD}) \cdot Q + k_{A,TD} \cdot N \quad (16)$$

Eguagliando le due espressioni, si può ottenere il valore di traffico Q_{eq} che rappresenta il punto di pareggio dei costi del sistema di trazione elettrica e Diesel:

$$Q_{eq} = Q(C_{TE} = C_{TD}) = \frac{c_{IF} \cdot s - (k_{A,TD} - k_{A,TE}) \cdot N}{k_{E,TD} - k_{E,TE} + k_{L,TD} - k_{L,TE}} \quad (17)$$

Al di sopra di tale valore, che diminuisce all'aumentare della potenza N richiesta (e che dipende anche, attraverso $k_{A,TD}$, $k_{A,TE}$, $k_{E,TD}$, $k_{E,TE}$, $k_{L,TD}$, $k_{L,TE}$ e c_{IF} , dal costo del denaro), il sistema di trazione elettrica assume un costo inferiore rispetto alla trazione Diesel (fig. 2). Si può quindi notare immediatamente la numerosità dei fattori che possono spostare il valore di traffico corrispondente al punto di pareggio dei costi del sistema di trazione elettrica e Diesel per una certa linea ferroviaria. Pertanto, non si possono generalizzare i risultati ottenuti a partire da uno o più casi pratici, sperando di ottenere un limite di traffico di pareggio dei costi, che possa essere considerato universalmente valido per la scelta fra i due sistemi di trazione.

Ad esempio, secondo uno studio del 2001 redatto per il governo russo da un gruppo di esperti, l'elettificazione di una linea ferroviaria dovrebbe essere presa in considerazione, perché i costi dell'investimento possano essere recuperati attraverso le minori spese di esercizio, solo in presenza di un traffico superiore ai 20 milioni di tkm lorde annue. Uno studio del 1996 riferito al caso dell'India (redatto dai tecnici delle Ferrovie Indiane Sudorientali) fissa invece il punto di pareggio dei costi fra il sistema di trazione elettrico e Diesel intorno ai 50 milioni di tkm lorde annue (*Fonte: Railway Gazette International, Aprile 2001 e Novembre 2001*).

E' comunque da sottolineare che la valutazione dei costi è solo un aspetto parziale del problema della scelta del sistema di trazione da adottare su di una linea ferroviaria e tale valutazione non risulta del tutto esaustiva neppure per quanto riguarda il criterio di scelta economico-finanziario, che deve basarsi sui risultati di un'analisi benefici-costi.

5. Fattibilità economico-finanziaria degli interventi di elettrificazione delle linee ferroviarie

L'adozione della trazione elettrica nell'esercizio di una linea ferroviaria

⁽⁷⁾ Generalmente il costo unitario di fornitura del gasolio $c_{u,TD}$ è maggiore del costo di fornitura dell'energia elettrica $c_{u,TE}$.

⁽⁸⁾ Il coefficiente r comprende la resistenza dovuta alle caratteristiche plano-altimetriche della linea (pendenza e curve), la resistenza al rotolamento e la resistenza aerodinamica.

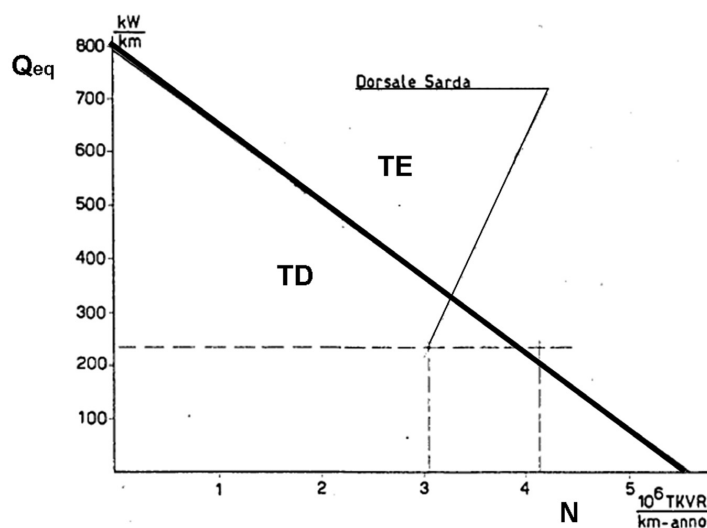


Fig. 2 - Campi di convenienza della trazione elettrica (TE) e Diesel (TD), in funzione del traffico sulla linea e della potenza complessiva del parco locomotori, calcolati per il caso della Dorsale Sarda (MAYER, 1982).

introduce benefici tecnici di cui godono sia gli utenti che l'esercente. Ad ogni decisione di nuova elettrificazione deve però essere presentata una chiara dimostrazione di convenienza economica dell'investimento.

Talvolta è capitato e può capitare che l'elettrificazione di una linea ferroviaria possa essere decisa per motivi diversi da quelli economici, come per esempio criteri di uniformità dei sistemi di trazione in una determinata area o la chiusura di maglie elettrificate esistenti, ma occorre in ogni caso che vengano stimate le conseguenze economiche della decisione, perchè la mancata assunzione degli oneri relativi ai capitali investiti nel caso di un eccesso di elettrificazione va a gravare, in ultima istanza, sulla finanza pubblica.

Le compagnie ferroviarie, pubbliche o private che siano, trattano la scelta del sistema di trazione per una linea come un problema economico-finanziario di minimizzazione dei costi di produzione ad output costante, essendo l'output di produzione il volume di traffico sulla linea. L'elettrificazione di una linea ferroviaria richiede l'impiego di ingenti capitali. Il

capitale investito deve poter essere recuperato in un arco di tempo non troppo lungo, attraverso l'aumento della potenzialità di traffico della linea con minori costi di esercizio e i benefici derivanti dall'incremento del livello di servizio.

L'analisi di fattibilità economica dell'elettrificazione di una linea ferroviaria deve essere svolta con la metodologia propria dell'analisi benefici-costi, che si avvale della tecnica dell'attualizzazione. La tecnica dell'attualizzazione consente, tenendo conto dell'evoluzione della congiuntura economica e del livello e del tipo di traffico, di trarre un bilancio economico indipendente dall'anno di riferimento scelto. Con questo sistema si parte dalla predeterminazione della vita utile dell'opera di elettrificazione e successivamente si passa a quantificare, anno per anno, nel caso di adozione della trazione elettrica e nel caso di mantenimento della trazione Diesel, gli oneri di capitale, i costi di esercizio, i ricavi previsti e, a vita utile ultimata, il valore residuo delle attrezzature e degli impianti. Attualizzando le varie voci in funzione del tasso di attualizzazione è possibile

valutare se l'operazione di elettrificazione della linea ferroviaria allo studio è conveniente oppure no⁽⁹⁾.

La successione dei costi comincia nel corso del periodo di investimento per l'elettrificazione con costi superiori a quelli che comporterebbe il mantenimento della trazione Diesel sulla linea, ma prosegue con costi minori nel periodo successivo ai lavori di elettrificazione, nel corso del quale si determinano le economie di esercizio⁽¹⁰⁾.

Stabilita la vita utile dell'opera, che, nel caso dell'elettrificazione di una linea ferroviaria, generalmente si considera pari a 20 o 30 anni (calcolati a partire dalla data presunta di messa in servizio della linea elettrificata), debbono essere formulate delle previsioni di traffico per la linea allo studio, attraverso l'impiego di modelli per la stima della domanda di trasporto e dei flussi di traffico.

Nel caso specifico, a favore della trazione elettrica, bisogna considerare che può verificarsi la generazione di nuova domanda di trasporto e la diversione di traffico stradale sulla linea, come effetto della riduzione dei tempi di viaggio e del miglioramento del livello di servizio conseguenti all'elettrificazione. D'altra parte, i flussi di traffico ed i ricavi dovuti al trasporto merci risultano di solito poco sensibili al particolare sistema di trazione adottato e, pertanto, non vengono previste dinamiche di sviluppo diverse per la domanda di trasporto merci nel caso di linea elettrificata e non elettrificata.

⁽⁹⁾ Un costo o un beneficio Z_t , previsto per l'anno $\tau = t$ può essere riportato all'anno $\tau = 0$ mediante la formula

$$Z_0 = \frac{Z_t}{(1+i)^t}$$

essendo i il tasso di attualizzazione scelto dall'analista e dipendente dal costo del denaro.

⁽¹⁰⁾ I costi da sostenere nel caso del mantenimento della linea a trazione Diesel comprendono i costi per la sostituzione del parco locomotori al termine della vita utile e l'eventuale ampliamento richiesto dagli incrementi di traffico.

Una volta stimati i flussi di traffico passeggeri e merci, deve essere predisposto uno schema di offerta idoneo a soddisfare tale domanda. Attraverso l'impiego di software specializzati, si possono quindi simulare i diagrammi di trazione, i tempi di percorrenza, i consumi energetici e la dimensione della flotta delle locomotive Diesel ed elettriche corrispondenti allo stato circolatorio atteso sulla linea ferroviaria. Tali parametri costituiscono importanti input dell'analisi finanziaria per l'elettificazione di una ferrovia.

Calcolati i costi totali, ottenuti sommando i costi attualizzati di investimento e di esercizio per ciascun anno del periodo considerato, si devono computare come benefici i ricavi attualizzati da traffico passeggeri e merci ed i valori residui delle attrezzature e degli impianti al termine della vita utile del progetto⁽¹¹⁾. In particolare, se si sta considerando il caso di una linea a trazione Diesel già in esercizio ed il parco locomotori Diesel non è da sostituire completamente al termine della vita utile del progetto, deve essere messo in conto il valore residuo del parco locomotori posseduto (alienabile o riutilizzabile su altre linee della rete).

A questo punto, è possibile calcolare gli indicatori economici caratteristici dell'analisi benefici-costi, ossia il "valore attuale netto" (VAN) ed il "saggio di rendimento interno" (SRI), nel caso (1) di elettrificazione e (2) di mantenimento della trazione Diesel sulla linea ferroviaria allo studio. Tali indicatori permettono di stabilire quale delle due scelte sia più conveniente dal punto di vista economico-finanziario (fig. 3). Indicando con B_t e

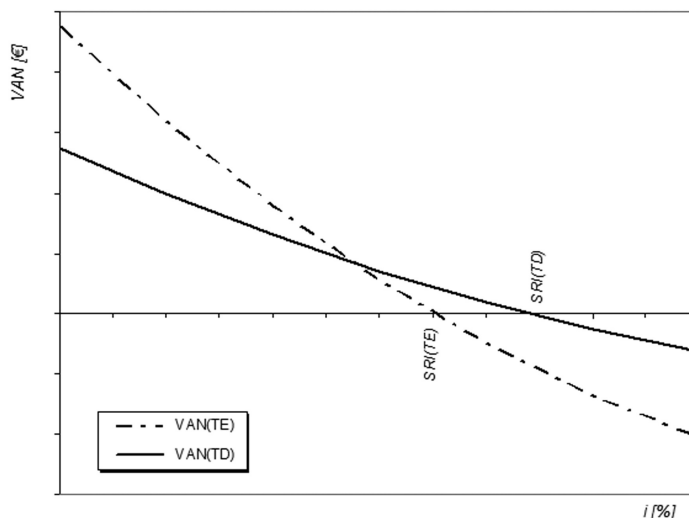


Fig. 3 – Indicatori economici dell'analisi benefici-costi per la scelta fra trazione elettrica (TE) e Diesel (TD) per una linea ferroviaria.

C_t i benefici ed i costi relativi all'anno t , con i il tasso di attualizzazione scelto dall'analista (in funzione del costo del denaro) e con n la vita utile dell'opera di elettrificazione, il VAN può essere calcolato nei due casi come:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (18)$$

Il saggio di rendimento interno (SRI) corrisponde invece al tasso di attualizzazione che rende nullo il VAN. Perché l'operazione di elettrificazione della linea sia giustificata sul piano economico:

- è necessario che il VAN calcolato nel caso di adozione della trazione elettrica sia positivo e maggiore del VAN calcolato nel caso di mantenimento della trazione Diesel;
- è sufficiente che l'indicatore SRI calcolato nel caso di adozione della trazione elettrica sia maggiore del tasso di attualizzazione i e dell'indicatore SRI calcolato nel caso di mantenimento della trazione Diesel.

E' da notare che il tasso di attualizzazione da utilizzare come base nei calcoli di convenienza dell'elettificazione di una linea ferroviaria deve essere quello che lo Stato è costretto ad offrire per i prestiti che contrae sul mercato dei capitali al tempo dell'investimento⁽¹²⁾.

Analoghi ragionamenti possono essere sviluppati nel caso in cui sia necessario provvedere al rinnovo dell'elettificazione di una linea ferroviaria già elettrificata; questo può accadere nel caso in cui il sistema di trazione elettrica adottato sia divenuto obsoleto e nel caso della conclusione della sua vita utile; infatti variazioni nei volumi di traffico, delle potenze richieste o di altre variabili potrebbero anche rendere conveniente la dismissione del sistema elettrico e la conversione a quello Diesel.

⁽¹¹⁾ E' da notare che i risparmi in termini di tempi di viaggio di cui possono godere i passeggeri di una linea ferroviaria in seguito all'elettificazione possono essere monetizzati ed essere portati come giustificazione di un contributo erogato da parte della finanza pubblica alla compagnia ferroviaria per l'adozione della trazione elettrica.

⁽¹²⁾ Il valore che l'analista assegna al tasso di attualizzazione riveste un'importanza fondamentale per il calcolo degli indicatori economico-finanziari dell'analisi benefici-costi.

6. Verifiche di sensibilità

La sensibilità della convenienza di una elettrificazione ferroviaria al variare dei fattori che sulla convenienza stessa incidono è notevole. Infatti, il costo dell'energia elettrica, il costo del carburante, il costo del lavoro ed il tasso di inflazione sono variabili esogene che possono condizionare pesantemente, così come le previsioni di traffico, l'esito dell'analisi di fattibilità economico-finanziaria dell'elettrificazione di una ferrovia. E' quindi importante svolgere delle verifiche di sensibilità per tali variabili, la cui stima comporta spesso ampi margini di indecisione.

Il limite di convenienza dell'elettrificazione di una ferrovia risulta particolarmente sensibile alla variazione dei seguenti fattori:

- tasso di interesse considerato per l'attualizzazione;
- costo dell'energia;
- costo di acquisto e manutenzione delle locomotive;
- costo degli impianti fissi per la trazione elettrica (costruzione e gestione).

Il tasso di attualizzazione dipende dal costo del denaro. Se aumenta il costo del denaro, allora aumenta il tasso di interesse da considerare ed il limite di convenienza economica per l'elettrificazione di una linea ferroviaria si sposta verso valori di traffico più elevati. Anche il costo dell'energia incide fortemente sulla densità minima di traffico capace di rendere economicamente conveniente un'elettrificazione ferroviaria. Tale costo mostra un notevole campo di variabilità, che dipende:

- dalla variabilità del costo di un chilowattora e di un chilogrammo di gasolio;
- dall'andamento plano-altimetrico della linea;
- dal numero di fermate a parità di percorso;
- dalla velocità media di esercizio della linea (e quindi dal rapporto fra volume di traffico passeggeri e merci);

- dal rapporto fra il peso del treno completo ed il peso rimorchiato.

E' da notare che, se aumenta il prezzo del petrolio, il limite di convenienza economica per l'elettrificazione di una linea ferroviaria si porta verso valori di traffico più bassi, specialmente nel caso di una forte diversificazione delle fonti di produzione dell'energia elettrica.

Il costo degli impianti fissi di elettrificazione dipende dal particolare sistema di elettrificazione che si intende adottare, mentre il costo delle locomotive varia a seconda del numero e della potenza delle locomotive necessarie, che, a loro volta, dipendono da numerosi fattori connessi al tipo di trazione ed alle caratteristiche della linea e al sistema di elettrificazione prescelto.

7. Considerazioni conclusive

Sulla rete ferroviaria italiana, ma il discorso può essere esteso anche a quella europea, oltre il 90% del traffico risulta oggi a trazione elettrica. In altri paesi, invece, la maggioranza delle linee ferroviarie è a trazione Diesel, poiché non si verificano quei volumi di traffico e quelle richieste di potenza motrice tali da rendere economica la trazione elettrica.

Per esempio, le linee ferroviarie nordamericane sono essenzialmente dedicate al trasporto di merci a basso valore specifico sul lungo raggio e sono percorse da treni di grande composizione ma in numero ridotto e relativamente lenti. Tali convogli presentano esigenze di potenza limitate, pur richiedendo elevati sforzi di trazione, che vengono forniti da una serie di locomotive in comando multiplo (fino ad 8 macchine accoppiate o intercalate nel treno).

Inoltre, nel caso specifico, il costo delle locomotive Diesel è relativamente contenuto, visti i grandi numeri della produzione e la sua standardizzazione. Si può quindi affermare che la trazione Diesel conserva ancora oggi un suo campo di impiego ben definito, oltre che per le operazioni di

manovra, per l'effettuazione di servizi passeggeri e merci regolari su linee a scarsa intensità di traffico o a modesta richiesta di potenza.

Per quanto riguarda le linee a scarso traffico, non è detto che esse possano consentire di recuperare il costo dell'investimento relativo agli impianti fissi necessari per l'alimentazione delle locomotive elettriche.

Nel caso specifico delle linee ferroviarie regionali di tipo secondario, non si può semplicemente sostenere che la "non elettrificazione" sia la causa prima della scarsità di traffico e che quindi elettrificando la linea si possa generare automaticamente la domanda di trasporto necessaria e sufficiente a garantire la sostenibilità economica dell'investimento. Elettrificare una linea con un volume di traffico insufficiente o anche solo immaturo significa provocare delle ricadute negative sulla finanza pubblica, che in molti paesi continua a sostenere, direttamente o indirettamente, le ferrovie. Oltretutto, nei mezzi di trazione leggeri, la differenza di potenza specifica, e quindi di livello di servizio fornito, tra il sistema di trazione elettrico e Diesel non è sostanziale.

Pertanto, ogni progetto di elettrificazione deve essere accompagnato da un'accurata analisi di fattibilità economico-finanziaria.

I vantaggi economici e tecnici ottenibili con l'elettrificazione di una linea ferroviaria sono per la maggior parte vantaggi monetari o monetizzabili. Poiché tali vantaggi sono proporzionali all'intensità di traffico presente e prevedibile per il futuro, bisogna valutare, con un livello di approssimazione accettabile, se tale traffico è o sarà in grado di indurre economie sufficienti a compensare il costo dei capitali necessari per l'elettrificazione, nonché i costi per la gestione degli impianti fissi di trazione elettrica.

D'altra parte, i benefici indiretti derivanti dall'adozione della trazione elettrica sono di più incerta determinazione e monetizzazione. Questi ultimi sono per lo più relativi alla mitigazione degli impatti ambientali in termini di inquinamento acustico ed atmosferico.

E' peraltro da sottolineare che le emissioni gassose inquinanti eliminabili con l'elettificazione di una linea ferroviaria non possono essere computate come un beneficio secco a favore della trazione elettrica. Bisogna, infatti, considerare pure le emissioni che vengono prodotte, anche se non lungo la linea ferroviaria, per l'alimentazione delle locomotive elettriche, almeno fino a che l'energia elettrica non verrà più prodotta utilizzando in prevalenza centrali termiche.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. KLEIN (1984), *"The potential for railway electrification in Canada: the methodology and results of a route-specific study"*, in Rail vehicle energy design considerations, a cura di B.C. HOUSER, Elsevier Science Publishers, pp. 37-54.
- [2] P. LANINO, N. GIOVENE (1918), *"Sui limiti di convenienza economica della trazione elettrica ferroviaria"*, Ingegneria Ferroviaria, aprile 1990, pp. 235-244.
- [3] J. MAJUMDAR (1985), *"The economics of railway traction"*, Gower.
- [4] L. MAYER (1982), *"L'elettificazione della linea dorsale sarda"*, Ingegneria Ferroviaria, ottobre 1982, pp. 687-694.
- [5] L. MAYER (1984), *"Sensibilità ai diversi fattori tecnici ed economici della convenienza dell'elettificazione di una linea ferroviaria"*, Ingegneria Ferroviaria, giugno 1984, pp. 323-330.
- [6] L. MAYER (1989), *"Convenienza della elettrificazione delle linee di ferrovie ad alta densità di traffico"*, Ingegneria Ferroviaria, maggio 1989, pp. 261-267.
- [7] D. MINGOZZI (2007), *"La nuova concezione della ferrovia europea dalle reti nazionali ad una rete integrata. Effetti delle direttive sulla liberalizzazione, interoperabilità e sicurezza"*, Tesi di dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università di Bologna.
- [8] E. MINGOZZI (2006), *"Storia della trazione elettrica in Italia"*, Bollettino Ingegneri, dicembre 2006, pp. 3-14.
- [9] F. PERTICAROLI (2001), *"Sistemi elettrici per i trasporti"*, Casa Ed. Ambrosiana.
- [10] G. PIRO (2000), *"La trazione Diesel ai nostri giorni"*, Ingegneria Ferroviaria, giugno 2000, pp. 377-385.
- [11] F. SANTORO (1982), *"Una recente indagine sulla trazione nelle Ferrovie Regionali"*, Ingegneria Ferroviaria, agosto 1982, pp. 535-538.
- [12] G. VICUNA (1986), *"Organizzazione e tecnica ferroviaria"*, ed. CIFI.

Indice Analitico della **"RIVISTA TECNICA DELLE FERROVIE ITALIANE"** 1912-1939 con supplementi 1940-42 e 1943-44.

Uno strumento indispensabile per conoscere la storia dell'ingegneria ferroviaria italiana.

Riproduzione in fotocopia da originale di n. 222 pagine – Fascicolo formato A4, legatura all'americana - **Prezzo € 20,66, I.V.A. inclusa, più spese di spedizione.**

Versamento su c.c.p. n. 31569007 intestato a **"Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani"** – Via Giolitti, 48 – 00185 ROMA

Indici analitici di **"INGEGNERIA FERROVIARIA"** dal 1946 ad oggi

In vendita in fascicolo estratto originale o in fotocopia per le annate più lontane.

Prezzo di un fascicolo € 5,16 per le annate dal 1980 e € 7,75 per quelle anteriori. I prezzi su indicati si intendono comprensivi di IVA e spese di spedizione.

Per ordinativi superiori a 10 fascicoli si applica lo sconto del 20%.

Per informazioni rivolgersi alla Redazione della Rivista: tel. 06/48.27.116. Importo da versare su c.c.p. n. 31569007 intestato a **"Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani"** – Via Giolitti, 48 – 00185 ROMA