Idrogeno e trasporto ferroviario: il caso della Sardegna

UNO STUDIO RSE PROPONE IL CASO DI UNA POSSIBILE RICONVERSIONE A IDROGENO DELLA RETE FERROVIARIA SARDA: UN'ANALISI COMPARATIVA PER ANALIZZARE QUALI EFFETTI NE DERIVEREBBERO IN TERMINI DI CONSUMI ENERGETICI E DI IMPATTO AMBIENTALE, SENZA TRASCURARE LA SOSTENIBILITÀ ECONOMICA DELL'INTERVENTO

mobilità

di Ennio Brugnetti, Stefano Moscarelli, Marco Borgarello, *RSE*

Gli sfidanti obiettivi della transizione energetica richiedono un significativo cambio di paradigma nel modo di produrre e consumare l'energia. Un caso significativo è quello del settore dei trasporti, fortemente energivoro e ancora dipendente dall'utilizzo di combustibili fossili. L'attuale discussione sull'opportunità di prevedere un blocco al 2035 alla produzione di auto a combustione interna evidenzia come la strategia con cui operare verso la transizione non sia ancora chiara e condivisa. Tuttavia, vi sono particolari ambiti e situazioni in cui è probabile immaginare soluzioni alternative all'approccio *convenzionale*: una di queste è quella della possibile e graduale sostituzione delle flotte di treni diesel con treni a idrogeno.

A tal proposito, RSE nell'ambito delle attività di Ricerca di Sistema ha analizzato un emblematico esempio di *cambio di passo*, studiando il caso di una possibile riconversione a idrogeno della rete ferroviaria della Regione Sardegna.

La scelta di analizzare questo caso trova ragioni in una serie di favorevoli condizioni al contorno. In primis, l'attuale rete sarda non è elettrificata e caratterizzata da un sistema di trazione a diesel. Inoltre, vi sono previsioni di un importante piano di sviluppo della produzione di energia elettrica da fonti energetiche rinnovabili (FER) sul territorio e sulla possibilità di sfruttare i fondi del PNRR. In particolare, la filiera H_2 è stata inserita nelle linee di indirizzo strategico per l'aggiornamento del piano energetico ambientale regionale e il fondo complementare al PNRR prevede 140 milioni di euro per il progetto pilota di collegamento a idrogeno Alghero centro - Alghero aeroporto. Si configurano, quindi, una serie di opportunità che consentirebbero di promuovere uno sviluppo più efficiente e sostenibile del servizio ferroviario del territorio, anche e soprattutto considerando la vocazione turistica dell'isola.

In tal senso, lo studio RSE propone un'analisi comparativa, a parità di domanda e offerta di mobilità della rete ferroviaria sarda, per analizzare, rispetto alla situazione attuale, quali effetti ne deriverebbero in termini di consumi energetici e di impatto ambientale. Poiché la sostenibilità passa anche attraverso la fattibilità economica, è stata valutata la convenienza dell'intervento con

una simulazione sui valori di TCO (Total Cost of Ownership), per una tratta specifica. L'analisi prevede il confronto, oltre che con l'attuale alimentazione a diesel e quella proposta a idrogeno, anche con l'ipotesi alternativa di elettrificare il servizio mediante catenaria.

Ma partiamo dall'attuale situazione della rete ferroviaria sarda.

Attualmente, la Sardegna conta 1,6 milioni di abitanti e una superficie di 24.090 km² che la rende la terza Regione di Italia per estensione. Questo territorio è suddiviso in 377 comuni dislocati in quattro province (Sassari, Nuoro, Oristano e Sud Sardegna) e una città metropolitana (Cagliari).

La rete ferroviaria sarda, lunga circa 1.035 km, non è elettrificata ed è servita mediante sistemi di trazione diesel. Come riportato in **Figura 1**, l'esercizio è attualmente di competenza di due società. La prima è il Gruppo Ferrovie dello Stato che gestisce, tramite le aziende controllate RFI e Trenitalia, le 4 linee ferroviarie a scartamento ordinario che si sviluppando per 432 km, con una rete articolata nella dorsale Cagliari-Golfo Aranci di 306 km con varie diramazioni (Chilivani-Sassari/Porto Torres di 66 km, Decimo-Villamassargia/Iglesias di 38 km e Villamassargia-Carbonia di 22 km).

La seconda è l'Azienda Regionale Sarda Trasporti (ARST) che

Figura 1 La rete ferroviaria della Sardegna

gestisce le restanti 5 tratte attive, a scartamento ridotto, che compongono la rete secondaria estesa per un totale di 609 km tra servizi TPL e linee turistiche, che fanno capo a Cagliari, Macomer e Sassari. Queste linee, attive soprattutto in estate e su richiesta, sono caratterizzate da una minore frequenza delle corse e da interruzioni di esercizio stagionali. Al 2020 solo i 50 km tra Cagliari e San Gavino Monreale sono a doppio binario, corrispondenti a circa l'11,6 per cento della rete RFI in Sardegna e il 4,8 per cento dell'intera rete sarda esistente.

Attualmente l'utilizzo del treno per gli spostamenti appare poco praticato.

Sulla base di uno studio sviluppato da RSE sulla mobilità a lungo raggio (*Scenari di efficientamento della mobilità extra-urbana di lungo raggio in Italia: valutazione degli impatti per il conseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione*, RDS n 21011654, 2021), che sfrutta un sistema di modellazione del traffico e l'utilizzo di dati delle reti di telecomunicazione mobile per la costruzione della matrice origine/destinazione della domanda di mobilità, è stato stimato che l'isola è interessata, per un giorno tipo, da circa 182 mila spostamenti, ripartiti fra le varie province, come indicato in **Tabella 1** (i dati Vodafone si riferiscono al periodo 2018-2019, quando le province sarde erano Sassari, Nuoro, Oristano, Sud Sardegna e Cagliari).

L'attuale rete sarda non è elettrificata e caratterizzata da un sistema di trazione a diesel. Vi sono in previsione importanti piani di sviluppo della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sul territorio e la possibilità di sfruttare i fondi del PNRR per la filiera dell'idrogeno

Dal modello emerge che in un giorno feriale tipo il 99,99 per cento degli spostamenti sull'isola avviene su strada. Questo dato evidenzia come ad oggi l'offerta del trasporto ferroviario in Sardegna non sia ritenuta competitiva rispetto a quella individuale con auto privata. In tal senso, il rinnovo del servizio potrebbe rendere più attrattivo il trasporto collettivo su rotaia.

Ma, ritornando allo studio RSE, quanto la svolta verso l'idrogeno *green*, quindi prodotto esclusivamente con fonti rinnovabili, sarebbe vantaggiosa in termini di consumo e di impatto ambientale?

Per rispondere si è valutato, a parità di chilometri percorsi, per ogni singola tratta considerata, secondo le attuali condizioni di

Tabella 1 **Spostamenti in un giorno feriale medio all'interno della Sardegna, indicati in entrata rispetto ad ogni provincia**

Cagliari	Nuoro	Oristano	Sassari	Sud-Sardegna	Totale
55.767	22.772	23.700	19.321	60.373	181.933

Tabella 2 **Valori considerati per l'analisi ambientale ed economica**

Fattore di emissione per treni diesel	3.151 kgCO_2/tonnellata diesel
Prezzo idrogeno verde	5,6 euro/kg
Prezzo diesel	1,3 euro/litro
Consumo medio diesel	1,45 litro/km
Consumo medio idrogeno	0,27 kg/km

NOTA. Le assunzioni legate ai valori di prezzo e consumo sono prese dallo studio di Roland Berger (*State of the art & Business case and market potential*, 2019), che utilizza tali ipotesi per il calcolo del Total Cost of Ownership (TCO) delle differenti soluzioni tecnologiche.

esercizio definite dalle due compagnie, ARST e RFI, le variazioni conseguenti al cambio di combustibile. Le ipotesi alla base dello studio sono riportate in **Tabella 2**.

Le risposta al quesito è sintetizzata in **Tabella 3**, in cui, è riportato il costo relativo e il consumo di combustibile necessario per la percorrenza annua delle linee RFI o ARST e, infine, è calcolato l'equivalente di emissioni di CO_2 evitate.

Considerando la percorrenza annua di entrambe le compagnie, i risultati evidenziano un significativo risparmio in termini di riduzione di emissione di CO_2: ogni anno si avrebbe una riduzione di oltre 19.000 tonnellate. Inoltre, dal punto di vista economico si avrebbe una netta diminuzione dei costi di carburante per la trazione alimentata a idrogeno, con un risparmio di oltre 3 milioni di euro.

Ovviamente, dal punto di vista dell'impatto ambientale l'utilizzo dei treni a idrogeno sembrerebbe una vera rivoluzione, producendo zero emissioni di CO_2 (nel caso in cui si parli di idrogeno verde).

Tuttavia, per valutare la convenienza dell'intervento di riconversione occorre anche tener conto degli investimenti economici di CAPEX (Capital Expenditure) e OPEX (Operating Expense) legati a una infrastruttura ancora da sviluppare. Per tale motivo, l'analisi di RSE considera oltre al combustibile, anche le voci di costo relative all'acquisto di nuovi treni, costi di manutenzione e costi legati all'infrastruttura. Come termine di confronto si è tenuto conto anche dell'opzione di prevedere l'elettrificazione della linea stessa.

Quindi, quando è economicamente fattibile la trazione ferroviaria a idrogeno in Sardegna?

Per dare una risposta a tale quesito, è stata effettuata un'analisi di sensitività sul TCO (Total Cost of Ownership) considerando la tratta Monserrato-Isili, gestita da ARST, scelta in virtù della sua lunghezza (circa 77 km, seconda soltanto alla dorsale che collega Cagliari a Golfo degli Aranci) e per il maggior numero di treni/giorno rispetto alle altre linee ARST.

La simulazione realizzata si basa sui valori di TCO di letteratura. In particolare, si è fatto riferimento alla casistica dei treni passeggeri regionali, i cui costi vengono stimati sulla base di alcuni parametri chiave:

- prezzo di diesel, energia elettrica e idrogeno, rispettivamente pari a 1,3 euro/litro, 90 euro/MWh e 5,6 euro/kg;
- lunghezza della tratta (100 km a semplice binario);
- consumo specifico dei treni a idrogeno e a diesel, rispettivamente pari a 0,27 kg/km e 1,45 litro/km.

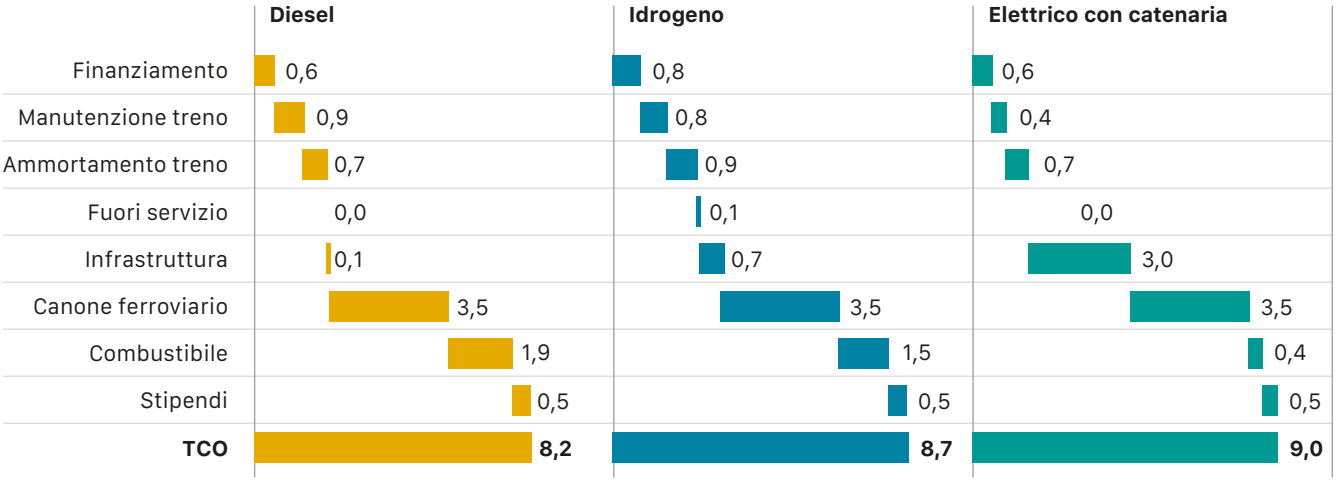
La produzione di idrogeno è ipotizzata *on-site* attraverso un elettrolizzatore; il costo dell'infrastruttura comprende una stazione di rifornimento e una di produzione tramite elettrolizzatore. Infine, il costo di elettrificazione è assunto pari a 1,1 milioni di euro per km. I valori di TCO per le differenti soluzioni tecnologiche sono mostrati in **Figura 2**.

Tabella 3 **Quantità di combustibile necessario per tratta: confronto tra diesel e idrogeno**

Tratta	Consumo diesel [tonnellate]	Consumo H_2 [tonnellate]	Costo combustile diesel [milioni di euro]	Costo combustibile H_2 [milioni di euro]	Tonnellate di CO_2 evitate
Totale annua linea RFI	4.910	972	7,64	4,86	15.472
Totale annua linea ARST	1.479	329	2,30	1,98	4.662
Totale	**6.389**	**1.301**	**9,94**	**6,84**	**20.134**

Figura 2 **Comparazione TCO treni diesel, idrogeno ed elettrici**

Fonte: *elaborazione RSE su dati di letteratura*



Partendo dai valori riportati, è stata effettuata un'analisi di sensitività al variare dei costi dei combustibili all'interno dei range, riassunti in **Tabella 4**.

Dato l'elevato peso dei costi di infrastruttura nel caso di elettrificazione della linea ferroviaria e l'incertezza sui reali costi del caso specifico sardo, le analisi di sensitività (**Figura 3**, **Figura 4** e **Figura 5**) sono state duplicate ipotizzando, per la specifica voce, dapprima un costo chilometrico pari a 3 euro/km (vedi voce *Infrastruttura* in **Figura 2**) e, successivamente, una sua riduzione del 30 per cento circa. Ciascuna coppia di grafici è costruita mantenendo fissi i prezzi di due dei tre combustibili considerati e variando invece il prezzo del terzo all'interno del range di **Tabella 4**, così da ottenere i valori limite di convenienza economica dall'incrocio delle tre curve. Sull'asse delle ordinate è indicato il TCO risultante dal prodotto tra il valore specifico (euro/km) e i km annuali percorsi sulla tratta di interesse.

I costi relativi all'infrastruttura aerea per l'elettrificazione della tratta incidono notevolmente sui risultati ottenuti e sui valori soglia che indicano la convenienza di una soluzione rispetto alle altre. In particolare, considerando i grafici di **Figura 4** relativi alla variazione del prezzo dell'idrogeno, si evidenzia che, nel caso di costi maggiori di elettrificazione la convenienza della soluzione con treni a idrogeno si otterrebbe per prezzi del medesimo inferiori a circa 3,5 euro/kg. Nel caso, invece, di minori costi necessari per elettrificare la linea, la soluzione con treni elettrici con catenaria risulterebbe comunque più conveniente, anche per prezzi dell'idrogeno inferiori a 1 euro/kg. A tal proposito, si riportano come riferimento i costi indicati dalla IEA in un recente rapporto (*Global Hydrogen Review 2021*) per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili al 2020 e 2050, in cui si osserva che il valore in Europa per l'H_2 generato mediante energia elettrica da solare fotovoltaico potrà arrivare fino a 2 dollari/kg (**Figura 6**).

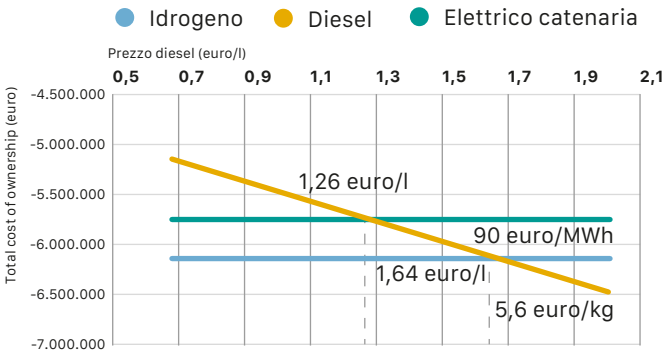
Si evidenzia che i risultati qui riepilogati devono essere considerati come valori medi di riferimento per il settore ferroviario del trasporto passeggeri regionale. Seppur alcuni valori di partenza dell'analisi siano stati rielaborati (al fine di tener conto delle caratteristiche della linea ferroviaria oggetto di simulazione), per un'analisi puntuale sui TCO e sulla convenienza economica delle differenti soluzioni tecnologiche non è possibile prescindere da spe-

Tabella 4 **Parametri variati nell'analisi di sensitività**

Parametro	Da	A
Prezzo diesel	0,67 euro/litro	2 euro/litro
Prezzo energia elettrica	10 euro/MWh	390 euro/MWh
Prezzo idrogeno	0,5 euro/kg	10 euro/kg

Figura 3 Analisi di sensitività sul prezzo del diesel

COSTI DI ELETTRIFICAZIONE DI ROLAND BERGER



COSTI DI ELETTRIFICAZIONE RIDOTTI

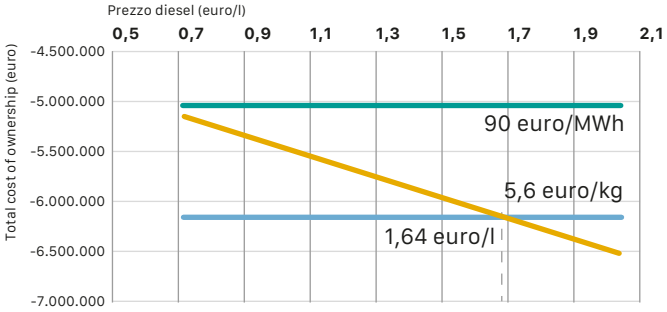
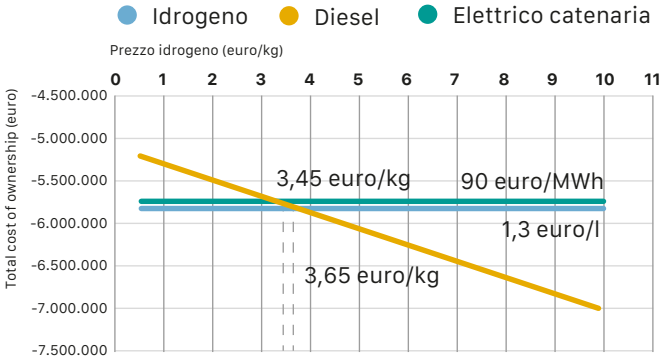


Figura 4 Analisi di sensitività sul prezzo dell'idrogeno

COSTI DI ELETTRIFICAZIONE DI ROLAND BERGER



COSTI DI ELETTRIFICAZIONE RIDOTTI

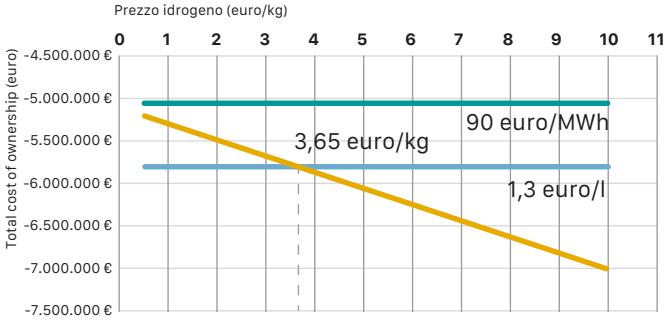
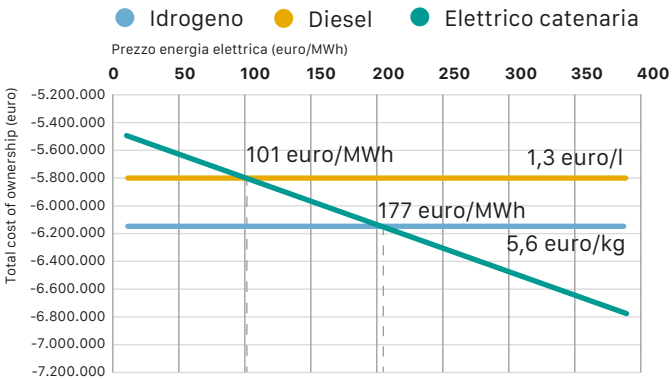


Figura 5 Analisi di sensitività sul prezzo dell'energia elettrica (OPEX)

COSTI DI ELETTRIFICAZIONE DI ROLAND BERGER



COSTI DI ELETTRIFICAZIONE RIDOTTI

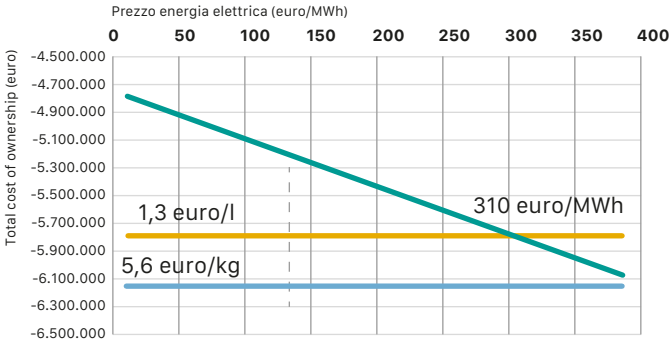
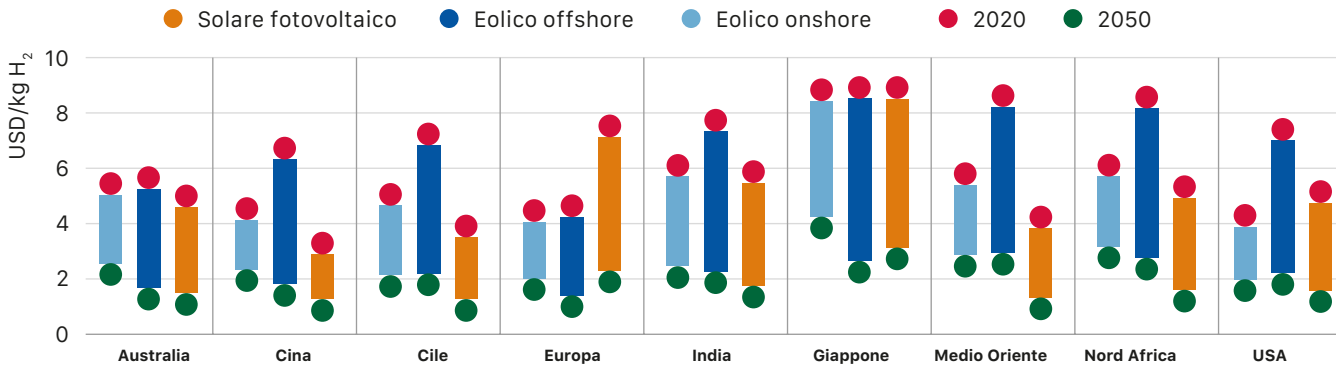


Figura 6 **Costo di produzione di idrogeno da fonti rinnovabili per tecnologia e regione nello Scenario a zero Emissioni Nette, 2020 e 2050**

Fonte: *IEA*



cifiche informazioni operative e di contesto, non note agli autori.

In conclusione, pensando solo all'impatto ambientale, i treni a celle a combustibile potrebbero fornire un importante contributo alla riduzione dei gas serra e degli inquinanti atmosferici, ma bisogna tener conto che le emissioni sono fortemente influenzate dal processo di produzione dell'idrogeno e dalla quota di energia rinnovabile che contribuisce al mix energetico di ogni singolo Paese.

I treni a celle a combustibile potrebbero fornire un importante contributo alla riduzione dei gas serra e degli inquinanti atmosferici, ma bisogna tener conto che le emissioni sono fortemente influenzate dal processo di produzione dell'idrogeno

Il caso studio in Sardegna ha evidenziato il potenziale vantaggio dell'utilizzo di idrogeno come combustibile nel trasporto ferroviario in termini di emissioni evitate, mentre dal punto di vista della sostenibilità economica al momento non si riscontra evidenza di convenienza rispetto alla elettrificazione delle tratte attualmente servite da motrici alimentate con diesel.

Tuttavia, le esigenze di procedere alla transizione, le preoccupanti implicazioni connesse al conflitto russo-ucraino e le prospettive di sviluppo delle fonti rinnovabili e dei costi per la loro produzione fanno ritenere che il punto di equilibrio si possa raggiungere nei prossimi decenni. Questa considerazione sarebbe ulteriormente rafforzata nel caso in cui il vettore idrogeno trovasse applicazioni in altri settori sia della mobilità (ad esempio, il trasporto navale) sia in altre filiere di produzione industriale, creando economie di scala.