

SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE ED ENERGETICA DEL MINIMETRÒ DI PERUGIA

Fabio Maria Ciuffini¹, Michele Goretti², Leonardo Naldini³

¹Studio Ciuffini

²Dipartimento di Ingegneria Industriale – Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Perugia

³U.O. Pianificazione e Regolazione della Mobilità – Comune di Perugia

SOMMARIO

L'innovativo sistema di trasporto a fune Minimetrò, recentemente entrato in esercizio a Perugia, è un originale esempio di mobilità sostenibile, alternativo ai tradizionali sistemi di trasporto collettivo. Il Minimetrò è costituito da vetture prive di motore che si muovono vincolate ad una fune di acciaio, azionata da un motore alimentato a corrente elettrica. L'opera garantisce rapidità di spostamenti, flessibilità alle variazioni della domanda di trasporto e decongestione della rete viaria urbana.

Il presente lavoro illustra i risultati di valutazioni sui benefici ambientali ed energetici derivanti dal funzionamento di tale sistema trasportistico. La riduzione del numero di veicoli in circolazione sulle strade contribuisce notevolmente al miglioramento delle condizioni ambientali urbane, soprattutto nelle aree a più elevata densità di traffico attraversate dall'opera, con una significativa diminuzione delle emissioni atmosferiche. Nel lavoro è valutata la sostenibilità ambientale associata all'esercizio del Minimetrò, stimando le emissioni evitate di CO₂. Si è quindi presentata un'analisi comparativa dei consumi energetici nei differenti scenari, per diversi flussi di passeggeri trasportati e differenti velocità di esercizio dell'infrastruttura, confrontando lo scenario determinato dall'esercizio del nuovo sistema di trasporto con l'alternativa "zero", che consiste nell'attuale composizione del traffico urbano, con un elevato numero di auto private e autobus in assenza di Minimetrò.

LA MOBILITÀ ALTERNATIVA A PERUGIA E LE DIVERSE FASI DI INTERVENTO: SCALE MOBILI E MINIMETRÒ

La città di Perugia persegue sin dai primi anni '70 la politica della "mobilità alternativa", pianificando, progettando e realizzando sistemi di trasporto "no auto", ma fortemente innovativi con prestazioni superiori, minori costi, minori consumi di energia e minori emissioni. In questa accezione, le limitazioni di traffico e la rinuncia all'auto non assumono caratteri costrittivi, ma divengono una consapevole e vantaggiosa scelta alternativa, così come confermato da un vasto consenso riscontrato tra la cittadinanza.

Questa politica si è concretizzata, fin dai primi anni '70, nella pedonalizzazione del Centro Storico e – come progetto alternativo all'uso dell'auto – nella realizzazione di due ascensori pubblici sul versante nord-est della città, e – soprattutto – di due complessi sistemi di scale mobili, il primo inserito nella Rocca Paolina, l'altro ad immediato ridosso della città antica. Le cascate di scale mobili, con grande capacità di trasporto, vere e proprie "metropolitane pedonali", inserite in un contesto storico di grande valore, immediatamente adottate da cittadinanza e turisti come mezzo di gran lunga preferito, hanno fatto di Perugia l'icona della mobilità alternativa a livello nazionale ed anche internazionale.

Una terza cascata di scale mobili è stata realizzata negli anni '80 – '90 per collegare un ulteriore parcheggio di scambio con la Stazione ferroviaria di S. Anna ed il Centro Storico, sempre con la logica di supporto meccanizzato lungo un esteso e ramificato itinerario pedonale. Con queste realizzazioni Perugia ha compiuto la prima fase del suo percorso verso la mobilità e l'accessibilità alternative, collegando l'acropoli storica con la fascia urbana al suo contorno.

La seconda fase è stata da poco iniziata con la realizzazione della prima linea di Minimetrò, un ulteriore originale esempio di mobilità alternativa, oltre che all'auto, anche ai tradizionali sistemi di trasporto collettivo che - a Perugia - si concretizzano principalmente in una estesa rete autobus. Una quarta risalita meccanizzata è stata inoltre realizzata, in concomitanza con la realizzazione del Minimetrò, per collegate con una cascata di scale mobili ed un ascensore inclinato il terminale del Pincetto con Piazza Matteotti, in pieno Centro Storico.

In questo articolo si esporrà il risultato di sintetiche valutazioni effettuate con l'ausilio dell'Ufficio Mobilità del Comune di Perugia¹, condotte con metodi speditivi ma pur sempre attendibili in un ragionevole *range* di tolleranza (dal 5% al 10%). Verrà stimato il contributo dei vari impianti di mobilità alternativa già realizzati, ma anche di quelli prefigurati dal Piano Urbano della Mobilità (PUM) [1]; questo sia sotto il profilo delle minori emissioni di CO₂² in rapporto al minor numero di veicoli circolanti, sia sotto il profilo del risparmio energetico, valutando il differenziale energetico tra minori consumi (auto private ed autobus) ottenuti con l'inserimento del Minimetrò in rete ed i consumi (elettrici) del Minimetrò Linea 1.

GLI EFFETTI SOTTO IL PROFILO AMBIENTALE DEL PROGRAMMA MINIMETRÒ

Già nella prima fase si è registrato un primo significativo abbattimento di emissioni valutabile in 816,7 tonn di CO₂ annue, pari al 43% del totale delle emissioni nella fascia

¹ Nella fattispecie del suo Dirigente, l'Ing. Leonardo Naldini.

² Assunta come indicatore di efficacia ambientale, in rapporto anche agli obiettivi.

urbana relativa al centro storico.

All'inizio della seconda fase, il Minimetrò conferma la vocazione di Perugia all'innovazione nei sistemi di trasporto (ed insieme il successo presso la popolazione di un sistema effettivamente competitivo con il trasporto su gomma) estendendo al continuo urbano il concetto di mobilità alternativa, prima limitato alla sola Acropoli. L'abbattimento di circolazione, emissioni e consumi, si produrrà in maniera ancora più significativa, in relazione al diverso peso ed alla diversa estensione dell'intervento.

Il nuovo sistema di trasporto (Figura 1), primo al mondo nel suo genere, è infatti costituito da una linea a doppia sede di 3 km di lunghezza (dai confini del continuo urbano sino al Centro), su cui circolano, in modo completamente automatico, fino a 25 vetture della capacità di 50 passeggeri e passaggi ogni minuto circa³, che si prevede possa captare in media – a regime⁴ – da 10.000 a 20.000 pax/giorno.



Figura 1: Il sistema Minimetrò

Alle stazioni, le vetture si sganciano dalla fune, fermano e ripartono come una qualsiasi metropolitana. Le sette stazioni della Linea 1 del Minimetrò, che collega un grande parcheggio di valle da 3.000 vetture con il Centro Storico, toccando la principale stazione ferroviaria, servono oggi il quadrante sud-ovest della città e del territorio circostante (Figura 2).

È importante rilevare come proprio la precisione consentita dall'automazione del sistema automatismi consenta la frequenza di passaggi di circa un minuto, in modo tale che, a tutti gli effetti, i tempi di attesa sono dunque così ridotti, che il sistema viene percepito come semicontinuo. I tempi di percorrenza complessivi – 12 minuti circa tra i due terminali – e quelli tra tutte le stazioni, sono notevolmente inferiori a quelli di percorrenza in auto, pur senza considerare i tempi di ricerca del parcheggio in destinazione. Dunque il Minimetrò, per tutta la zona di influenza e captazione da esso servita è il mezzo di trasporto più veloce, frequente sotto il profilo della qualità del servizio e più conveniente sotto il profilo economico. Esso consente, nella sua zona di influenza e captazione, una mobilità completamente sostitutiva dell'auto, ma anche del mezzo pubblico su gomma.

³ Periodo di 1,076 minuti con gli attuali tempi di permanenza in stazione, che tuttavia potrebbero essere ridotti.

⁴ Il sistema è stato inaugurato il 29 gennaio 2008 ed andrà a regime con la completa attuazione del PUM.

Come completamento di questo disegno di mobilità alternativa alla scala urbana, la Linea 2 del Minimetrò (progettata ma non ancora finanziata) conetterà la Stazione FCU di S. Anna con il capolinea della Linea 1 e proseguirà verso il quartiere storico di Monteluce, dove verrà messa in campo una decisiva operazione di trasformazione urbana con il recupero delle aree e degli immobili dell'ospedale cittadino, in via di delocalizzazione verso il territorio esterno (Figura 2). Questo scenario, confermato dal nuovo PUM di Perugia continuerà a portare effetti positivi sul quadro delle emissioni cittadine.

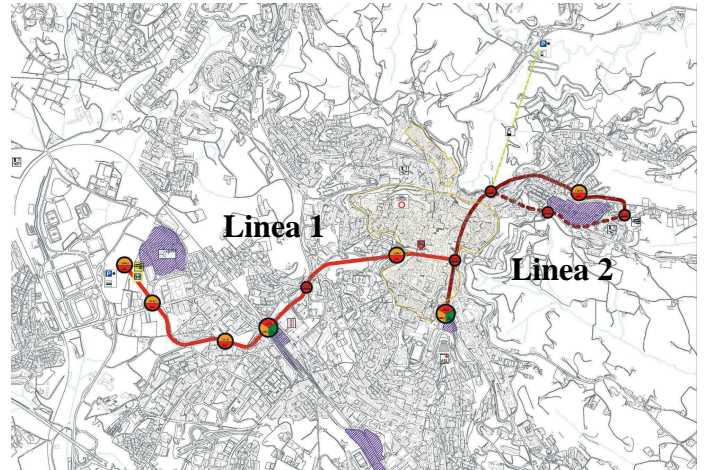


Figura 2: Linea 1 e Linea 2 del Minimetrò

L'entrata in funzione della prima linea di Minimetrò, avrà come conseguenza a regime – cioè non appena entrato in funzione il PUM con tutte le interconnessioni previste – un taglio negli accessi di circa 7.000 vetture al giorno, pari al 26,5% del totale sull'asse di penetrazione urbana oggi più frequentato, ovvero l'asse sud-ovest, corrispondente al corridoio di penetrazione della Linea 1, ma anche un abbattimento del traffico autobus su gomma, sostituito dal Minimetrò, quantificabile attorno al 15% dei km annuali eserciti.

Il taglio di emissioni conseguente (solo per le auto) è pari a 2.520 tonn di CO₂ annue, pari al 4,0 % delle emissioni all'interno della città compatta, di cui si serve solo uno degli assi di penetrazione.

La seconda linea del Minimetrò, ha un effetto previsto sulla mobilità perugina pari ad un incremento della captazione del sistema Minimetrò del 40%, con un ulteriore taglio delle emissioni proporzionale a tale valore, e porterà la riduzione di emissioni totale al 5,6 %, cui andrà sommato il taglio di emissioni conseguente all'entrata in funzione della linea urbana della FCU Ponte S. Giovanni – S. Anna.

Le opere ancillari al Minimetrò, un'ipotesi da percorrere in ragione dei vantaggi sia sulla captazione del sistema sia dei vantaggi ambientali conseguenti

È possibile prospettare, con l'avvio del progetto Minimetrò, una ulteriore sfaccettatura del modello di intervento, e cioè quella delle "opere ancillari", opere e provvedimenti utili ad aumentare l'attrazione del Minimetrò.

Con queste opere è pensabile di raddoppiare la distanza ammissibile dalla residenza alla stazione, così come dalla stazione di destinazione alla meta finale: l'effetto complessivo è dato dal quadruplicamento dell'area di attrazione e

dell'utenza di prossimità, che può arrivare fino a 6.800 pax/giorno.

Il taglio di emissioni conseguente a questo ulteriore investimento potrà essere misurato in 1.605 tonn CO₂ annue, con un incremento del 64% dell'efficacia del sistema Minimetrò sulla sola Linea 1 rispetto agli effetti sulla sola utenza in scambio dall'auto.

Questo aumento di efficacia si otterrebbe con un incremento della spesa sostenuta per la sola Linea 1 appena del 10%, a testimonianza dell'alta resa delle opere ancillari se realizzate.

Sul totale, l'effetto combinato sull'utenza di scambio e quella di prossimità sulla sola Linea 1 è pari al 6,5%, estendibile al 9,1% realizzando la Linea 2 del Minimetrò.

È interessante rilevare che, dagli studi connessi alla redazione del PUM, attualmente adottato dal Comune di Perugia, risulta che tale riduzione è pari al 50% della riduzione prevista da tutte le misure che il Comune intende adottare nei prossimi 10 anni, che scontano, tra l'altro un'ulteriore crescita del parco auto, e che, inoltre, la riduzione ottenibile con il solo sistema Minimetrò con le connesse opere ancillari, sarebbe perfettamente in linea con gli obiettivi fissati dal protocollo di Kyoto.

Va inoltre ricordato che le cifre sopra esposte si riferiscono al normale traffico urbano ed escludono tutte le situazioni straordinarie in relazione ad eventi che, più volte in un anno attraggono traffico turistico straordinario, tutto servibile attraverso il sistema Minimetrò, che consentirà, in queste occasioni, di sostenere più agevolmente l'impatto di afflussi che sono sempre molto rilevanti.

L'effetto riduttivo dei vari interventi sopra illustrati sulle emissioni di CO₂ è riassunto nella tabella che segue (Tabella 1).

Tabella 1: Valutazione delle emissioni di CO₂ evitate

Intervento	Tonn/annue di CO ₂ tagliate	Percentuali sul totale
Sistemi di risalita esistenti al servizio del Centro Storico	816,7	-43% nell'area centrale
Minimetrò Linea 1	2.520	-4% nell'intera area urbana
Minimetrò Linea 1 + Linea 2	3.528	-5,6% nell'intera area urbana
Opere ancillari alla Linea 1	1.605	+64% dell'effetto Minimetrò
Minimetrò + opere ancillari alla Linea 1	4.125	-6,5% nell'intera area urbana
Minimetrò Linee 1 e 2 + opere ancillari	5.775	-9,1% nell'intera area urbana
Sistema Minimetrò + opere ancillari + misure del PUM	11.550	-18,2% nell'intera area urbana

SOSTENIBILITÀ ENERGETICA

La verifica della sostenibilità energetica dell'innovativo sistema trasportistico è stata effettuata valutando il risparmio di energia primaria, dato dalla differenza tra consumi evitati da auto private ed autobus e consumi derivanti dall'esercizio del

Minimetrò Linea 1.

Il percorso stradale da Pian di Massiano a Pincetto – Centro, data anche l'orografia del territorio urbano, risulta piuttosto articolato ed è pari a circa 5.800 m sullo stesso itinerario del Minimetrò, il quale invece attraversa la città superando dislivelli ed ostacoli con un percorso più diretto, che si sviluppa su una lunghezza di circa 3.050 m tra le due stazioni terminali.

Valutazione del consumo evitato di energia primaria da veicoli pubblici e privati

Le presenti valutazioni del risparmio di energia primaria da auto private e mezzi di trasporto pubblici sono da considerare previsioni di minima, in quanto riferite all'esercizio della sola Linea 1 del Minimetrò: i consumi evitati sono stati stimati a meno dei positivi effetti derivanti dalla realizzazione della Linea 2 e delle opere ancillari, che permettono sia di estendere l'area di captazione sia di incrementare l'utenza di prossimità, riducendo ulteriormente il traffico veicolare urbano.

È stata valutata l'energia primaria risparmiata corrispondente ad una riduzione del traffico privato di circa 7.000 veicoli al giorno, in accordo con le previsioni alla base delle stime della riduzione di inquinanti in atmosfera. Vista la composizione del parco macchine della provincia di Perugia, confrontata anche con il dato nazionale [2], sono stati considerati circa il 67% di veicoli a benzina ed il restante 33% circa di veicoli a gasolio.

Sono stati quindi calcolati i litri di carburante necessari a compiere il percorso stradale di 5,8 km sul medesimo itinerario del Minimetrò, tra Pian di Massiano e Pincetto – Centro, considerando consumi medi per ciclo urbano rispettivamente pari a 8km/l per vetture a benzina e 12 km/l per vetture a gasolio. Noto infine il potere calorifico inferiore dei carburanti ($PCI_{benzina} = 32.000$ kJ/l e $PCI_{gasolio} = 35.000$ kJ/l) è stato valutato l'ammontare di energia primaria evitata per effetto della diminuzione del traffico privato (Tabella 2).

Tabella 2: Valutazione del consumo giornaliero di energia primaria evitato da auto private

Veicoli	Numero veicoli	Consumo carburante l	Potere calorifico kJ/l	Energia primaria GJ/giorno
Auto benzina	4.690	3.400,25	32.000	108,808
Auto gasolio	2.310	1.116,50	35.000	39,078
Totale	7.000	-	-	147,886

Il servizio urbano di Perugia presenta una percorrenza annua di 6.900.000 km [3]. La riduzione quantificata in circa il 15% dei km annuali eserciti, prevista in sede di valutazione della sostenibilità ambientale del Minimetrò, ammonta a 1.035.000 km in meno percorsi da autobus in un anno, corrispondenti mediamente a circa 2.836 km al giorno.

Suddetta diminuzione è stata ripartita equamente tra autobus a gasolio ed autobus a metano; inoltre sono stati considerati cautelativamente consumi medi nel ciclo urbano di 2,5 km/l per i mezzi pubblici alimentati a gasolio, con $PCI_{gasolio} = 35.000$ kJ/l, e di 1,8 km/m³ per quelli alimentati a metano, con $PCI_{gasolio} = 34.000$ kJ/m³ (Tabella 3).

Tabella 3: Valutazione del consumo giornaliero di energia primaria evitato da autobus

Veicoli	km percorsi	Consumo carburante	Potere calorifico	Energia primaria GJ/giorno
Autobus gasolio	1.418	567,123 l	35.000 kJ/l	19,849
Autobus metano	1.418	787,671 m ³	34.000 kJ/m ³	26,781
Totale	2.836	-	-	46,630

L'energia primaria risparmiata in conseguenza della riduzione del numero di autobus è stata infine sommata a quella derivante dalla diminuzione di vetture private, ottenendo il consumo totale evitato di energia primaria a seguito della riduzione del traffico urbano, che assume il valore di circa 194 GJ/giorno (Tabella 4).

Tabella 4: Valutazione del consumo giornaliero totale di energia primaria evitato

Veicoli	Energia primaria GJ/giorno
Auto private	147,886
Autobus	46,630
Totale	194,516

Valutazione del consumo di energia primaria per il funzionamento del Minimetrò

Il Minimetrò, nel tratto Pian di Massiano – Pincetto Centro, effettua orari di esercizio dalle 6.40 alle 21.00 dal lunedì al sabato e dalle 8.30 alle 20.30 la domenica e i giorni festivi. Nei giorni feriali, quindi, il sistema funziona per 14 ore e 20 minuti.

Una delle principali caratteristiche del Minimetrò è la gestione modulabile sia della velocità sia del numero di vetture in linea. Tenendo presenti i consumi energetici, la velocità del sistema è regolata in relazione al flusso dei passeggeri ed alla economicità del sistema.

Il regime di esercizio considerato nelle presenti valutazioni corrisponde alla velocità massima di progetto di 7 m/s, per la quale l'offerta di trasporto della Linea 1 è in grado di soddisfare con ampio margine la domanda proveniente da auto e autobus stimata in precedenza. Suddette condizioni di funzionamento forniscono una stima prudenziale di massima dei consumi di energia primaria necessari per l'esercizio del sistema di trasporto.

Circa 1/3 dell'intera potenza elettrica richiesta dal Minimetrò Linea 1 è assorbito nella stazione di testa presso il terminal di Pincetto Centro, dove è ubicato l'argano, mentre nelle altre stazioni sono presenti i motori degli azionamenti, di "frenata" e di "lancio" delle vetture: i carichi elettrici sono quindi distribuiti lungo l'intero percorso.

Il sistema è suscettibile di una notevole mutazione della potenza elettrica assorbita in funzione della velocità della fune, che come detto può essere modificata al variare del

flusso di passeggeri, aumentando al crescere del numero di persone da trasportare.

La potenza elettrica richiesta può variare da un valore minimo di 600 kW, previsto per il ritorno dei mezzi in stazione a 0,5 m/s, fino a circa 3.200 kW, per velocità della fune pari a 7 m/s [4].

A questo proposito si osserva che i dati relativi ai consumi elettrici del sistema in esercizio indicano un assorbimento di potenza media di circa 980 kW alla velocità di 7m/s con 20 vetture sulla linea.

Da tali dati, considerando le 14 ore e 20 minuti di funzionamento di un giorno feriale al regime di esercizio di 7 m/s precedentemente indicato, è stata valutata l'energia elettrica necessaria per alimentare il sistema Minimetrò; infine, ipotizzando un rendimento di produzione di circa il 50%, è stato stimato il corrispondente consumo di energia primaria (Tabella 5).

Tabella 5: Valutazione del consumo totale giornaliero di energia primaria per il funzionamento del Minimetrò

Velocità esercizio m/s	Potenza media kW	Rendimento	Tempi esercizio hh.mm	Energia primaria GJ/giorno
7	980	50%	14.20	101,136

CONCLUSIONI

L'energia primaria necessaria per il funzionamento della Linea 1 del Minimetrò, nelle condizioni di esercizio alla velocità massima di progetto, è stata valutata pari a circa 101 GJ/giorno, inferiore al consumo di energia primaria evitato dai veicoli pubblici e privati, stimato in circa 194 GJ/giorno. Il risparmio energetico conseguibile nello scenario ipotizzato è risultato pari a circa il 48% rispetto allo scenario "zero", corrispondente all'assenza del Minimetrò ed all'attuale assetto del trasporto pubblico e privato nell'area urbana. I benefici introdotti dall'esercizio dell'infrastruttura nel settore dell'energia risultano quindi di notevole rilievo.

Si ribadisce che suddette stime energetiche costituiscono una valutazione di minima, effettuata in uno scenario parziale che prevede soltanto l'esercizio della Linea 1 del Minimetrò. In un contesto più vasto, tale da considerare le positive conseguenze che è ragionevole attendersi dall'integrazione della Linea 1 con la Linea 2 e le opere ancillari, si possono prevedere ampi margini di miglioramento del risparmio energetico, sia per le potenzialità di un'area di attrazione più estesa, sia per la maggiore utenza di prossimità, che si traducono in un'ulteriore diminuzione del numero di veicoli sulle strade urbane.

In riferimento alla realizzazione della Linea 2 e delle opere ancillari, data anche l'elevata potenzialità di trasporto del sistema Minimetrò, è possibile prevedere un risparmio di energia, in termini percentuali, circa pari a quello stimato per la Linea 1.

A tali benefici sotto il profilo della sostenibilità energetica si aggiungono i vantaggi conseguibili in termini di riduzione delle emissioni inquinanti rispetto al trasporto su auto ed autobus. È stato stimato che l'effetto combinato generato sull'utenza di scambio e di prossimità dal sistema integrato di trasporto, comprendente Minimetrò (Linee 1 e 2), opere ancillari e misure previste dal PUM a regime, si traduce in una diminuzione pari al 18,2% delle tonnellate di CO₂ prodotte

annualmente nell'intera area urbana: tali valutazioni, effettuate per un gas assunto come indicatore di riferimento, confermano il valore del progetto Minimetò dal punto di vista della sostenibilità ambientale e consentono di prevedere una sensibile riduzione anche delle emissioni di altri inquinanti atmosferici generati da traffico veicolare, quali ad esempio il particolato, con un positivo contributo al miglioramento complessivo della qualità dell'aria nel territorio urbano di Perugia.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Piano Urbano della Mobilità PUM, Comune di Perugia, 2006.
2. ACI, Annuario statistico, 2007.
3. Sito internet APM, www.apmperugia.it
4. L. Codecasa, *La fune giusta per il Metrò di Perugia*, Rivista "Elettro", n. 10, pp 21-24, novembre 2006.

