



Ricerca di Sistema elettrico

## Sviluppo di algoritmi euristici per l'ottimizzazione del processo di elettrificazione di reti di trasporto pubblico urbano in presenza di vincoli sugli investimenti

Dario Pacciarelli, Andrea Gemma

## SVILUPPO DI ALGORITMI EURISTICI PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI ELETTRIFICAZIONE DI RETI DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO IN PRESENZA DI VINCOLI SUGLI INVESTIMENTI

Dario Pacciarelli (Università degli Studi Roma Tre), Andrea Gemma (Università degli Studi Roma Tre)

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza Energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D7 – Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: a. Scenari di mobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Sviluppo di algoritmi euristici per l'ottimizzazione del processo di elettrificazione di reti di trasporto pubblico urbano in presenza di vincoli sugli investimenti"*

Responsabile scientifico ENEA: Maria Pia Valentini

Responsabile scientifico Università degli Studi Roma Tre: Dario Pacciarelli

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	6
2.1 DEFINIZIONE DEI MODELLI DI PROGRAMMAZIONE MATEMATICA.....	6
2.1.1 <i>Revisione del modello con budget destinato all’elettrificazione della rete.....</i>	7
2.1.2 <i>Modello con budget destinato al rinnovo del parco autobus elettrico+fossile .....</i>	8
2.2 RISULTATI TEORICI DI BASE PER IL PROGETTO DEGLI ALGORITMI .....	9
2.2.1 <i>Calcolo di Upper Bound e Lower Bound .....</i>	9
2.3 PROGETTAZIONE DEGLI ALGORITMI RISOLUTIVI EURISTICI .....	10
2.3.1 <i>Introduzione.....</i>	10
2.3.2 <i>Tecnologia Ibrido-Metano-Diesel Nuovo .....</i>	10
2.3.3 <i>Tecnologia Ultra-Rapida o Elettrificazione C .....</i>	11
2.3.3.1 Dimensionamento al nodo .....	12
2.3.4 <i>Utilizzo del budget per la sola elettrificazione .....</i>	14
2.3.5 <i>Algoritmo di ottimizzazione rete.....</i>	14
2.3.5.1 Genoma .....	16
2.3.6 <i>Mutazione.....</i>	16
2.3.7 <i>Crossover.....</i>	16
2.3.8 <i>Elitismo .....</i>	16
2.3.9 <i>Algoritmo di ottimizzazione delle fermate.....</i>	17
2.4 ANALISI DEI RISULTATI .....	19
3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	34
4 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	35
5 APPENDICE 1. BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....	36
5.1 PROF. DARIO PACCIARELLI .....	36
5.2 PHD. ING. ANDREA GEMMA.....	36

## Sommario

Il presente documento costituisce il “Rapporto tecnico descrittivo dei moduli SW e dei risultati della ricerca effettuata” dall’Università degli Studi Roma Tre prevista dall’allegato tecnico all’accordo di collaborazione per una attività di ricerca dal titolo: “Sviluppo di algoritmi euristici per l’ottimizzazione del processo di elettrificazione di reti di trasporto pubblico urbano in presenza di vincoli sugli investimenti”, stipulato tra Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA nel seguito) e Dipartimento di Ingegneria dell’Università degli Studi Roma Tre (DI-RM3 nel seguito) nell’ambito del nell’ambito del Progetto D.7 “Mobilità elettrica sostenibile” del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2017, ripartito in dieci Progetti, riferito alla seconda annualità dell’Accordo di Programma MISE-ENEA 2015-2017. Più in dettaglio, l’attività di ricerca fa riferimento all’Area “Efficienza energetica negli usi finali elettrici e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori elettrici”, tematica di ricerca “Mobilità elettrica”; nello specifico, si riferisce all’obiettivo a “Scenari mobilità elettrica”, sub-obiettivo a.1 “Strumenti di supporto TPL”, del progetto “Mobilità elettrica sostenibile”.

I temi sviluppati nel suddetto accordo di collaborazione tra ENEA e DI-RM3 rientrano nell’ambito dello sviluppo di modelli di ottimizzazione in presenza di vincoli di investimento e fanno seguito alla ricerca condotta nel primo anno nell’ambito del PAR 2016.

L’attività del DI-RM3 nel secondo anno della ricerca ha riguardato:

1. Analisi dei dati forniti da ENEA e perfezionamento dei modelli di programmazione matematica del problema da affrontare già sviluppati nel primo anno di attività. I modelli messi a punto nel primo anno hanno riguardato inizialmente due architetture: (A) *elettrificazione dei bus con ricarica al deposito* e (B) *elettrificazione dei bus con ricarica al capolinea*. L’attività del secondo anno ha allargato l’ambito di studio per superare le semplificazioni introdotte nel primo anno di attività. In particolare, sono stati studiati due problemi distinti e di interesse per le Aziende del Trasporto Pubblico Locale:

1. nel primo caso, come già affrontato nel precedente periodo di Ricerca, si assume disponibile un budget destinato solo all’elettrificazione della rete mediante impiego di veicoli di tipo full electric (BEV);
2. nel secondo caso si assume disponibile un budget destinato indistintamente al rinnovo del parco autobus (compresi eventuali investimenti per garantire il rifornimento energetico in caso di impiego di fonti energetiche alternative al gasolio), lasciando agli algoritmi di ottimizzazione il compito di definire la soluzione più conveniente, che potrà essere parzialmente in elettrico e parzialmente a combustibile tradizionale e/o ibrido, in funzione delle caratteristiche della rete.

Alle architetture A e B studiate nel primo anno si è aggiunta la terza architettura (C) *elettrificazione dei bus con ricarica lungo il percorso*. Per l’architettura A il modello è partito dall’assunto dell’esistenza di un unico deposito per tutta la rete e di un numero di percorsi per ogni linea maggiore o uguale a 1. Alle soluzioni tecnologiche tradizionali messe a confronto con la soluzione full electric (BEV) già esaminate nel primo anno (diesel) si sono aggiunte nel secondo anno della ricerca l’alimentazione a metano e la motorizzazione diesel-elettrica senza necessità di ricarica esterna (HEV). Per l’architettura B il modello ha ipotizzato per ogni linea uno o più percorsi distinti tra più capilinea, su tutti i quali deve essere distribuita l’infrastruttura di ricarica necessaria al rifornimento energetico dei percorsi della linea. Per l’Architettura C il modello si è limitato ad analizzare il caso di al più due percorsi per ogni linea, uno di Andata e uno di Ritorno.

2. Progettazione di algoritmi risolutivi euristici del problema, basati sulle architetture A, B e C. Per quanto riguarda le architetture A e B studiate, nel secondo anno sono state rimosse le semplificazioni introdotte nel primo anno della ricerca. In particolare, il dimensionamento degli impianti di ricarica nei nodi capolinea e nei nodi fermate è stato calcolato esattamente a valle della selezione dell’insieme delle linee da elettrificare e delle relative soluzioni di ricarica. Questo approccio ha consentito di certificare l’ammissibilità delle soluzioni prodotte dall’algoritmo e per calcolare in modo più accurato il costo delle soluzioni trovate con il modello semplificato utilizzato nel primo anno. L’efficienza degli algoritmi sviluppati ha consentito comunque la

risoluzione del problema in tempi contenuti, illustrati in dettaglio nella sezione dedicata alle prove sperimentali.

3. Implementazione di un dimostratore dell'algoritmo progettato ed esecuzione di test funzionali e prestazionali dell'algoritmo, sulla base delle istanze fornite da ENEA e dei risultati della procedura esatta sviluppata dall'Università di Roma Tor Vergata, che utilizza il calcolo parallelo per enumerare tutte le soluzioni del problema. Il dimostratore è stato validato sulla città di Roma, un caso di studio molto significativo fornito da ENEA, e ha consentito di validare i modelli matematici e gli algoritmi definiti e sviluppati per configurare l'elettrificazione ottimale di una rete di trasporto pubblico urbano.

Inoltre il dimostratore è stato integrato all'interno della catena modellistica completa, oggetto di sviluppo da parte di ENEA e di altre Università Co-beneficiarie, che comprende i codici per l'acquisizione dei dati di input, il calcolo dei consumi e delle emissioni e il confronto economico delle alternative tecnologiche per singola linea. Il dimostratore così integrato è disponibile per un utilizzo da parte degli utenti destinatari. I risultati della sperimentazione sono estremamente promettenti, in quanto soluzioni ottime o quasi per una rete delle dimensioni di una grande città Italiana vengono sempre trovate in tempi molto contenuti.

## 1 Introduzione

Il contesto internazionale e, di conseguenza, la letteratura scientifica registrano negli ultimi anni una forte accelerazione verso quello che viene definito lo *shift to electromobility*. Il *White Paper "Roadmap to a Single European transport Area"* [1] ipotizza il *phasing out* dai veicoli a combustibile tradizionale entro il 2050. Analisi socio-economiche, spesso frutto di progetti di ricerca internazionali, si trovano nella letteratura scientifica di Europa [2,3,4,5,6], U.S.A. [7], Cina [8] e Giappone [9]. Più di recente, anche i mass-media hanno riportato di importanti decisioni di grandi aziende o nazioni in questo senso. Per esempio, a luglio 2017 l'azienda automobilistica Volvo ha annunciato che dal 2019 cesserà le attività di ricerca volte allo sviluppo di motori a sola combustione [10], mentre Emmanuel Macron negli stessi giorni ha annunciato l'intenzione della Francia di proibire la vendita di veicoli a benzina o diesel entro il 2040 [11]. La Norvegia si è spinta a prevedere l'eliminazione di tutte le auto a combustibile fossile entro il 2025 [12]. Il rapporto Bloomberg "Electric Vehicle Outlook 2017" [13] ha rivisto al rialzo le precedenti stime di crescita del mercato elettrico, portando la previsione di vendita di veicoli elettrici nel 2040 al 54% del mercato, contro la previsione precedente del 35%. Tale accelerazione è causata non solo dalla spinta ambientalista verso una riduzione delle emissioni ma soprattutto dal calo deciso previsto per il prezzo delle batterie al Litio (-70% entro il 2030, [13]). In effetti il calo dei prezzi delle batterie apre scenari del tutto nuovi anche per il trasporto pubblico, che già oggi vede la possibilità di un risparmio nei costi operativi rispetto alle tecnologie diesel o benzina.

Questo progetto intende mettere a punto uno strumento di supporto alle decisioni operative delle pubbliche amministrazioni interessate a convertire quote di trasporto pubblico dagli attuali motori diesel alle nuove tecnologie elettriche. A fronte di un budget per l'investimento iniziale in elettro-mobilità (o anche per il rinnovo della rete senza vincoli architetture sugli investimenti) si vuole definire l'insieme di elettrificazioni più convenienti (o di investimenti più convenienti) in una data rete di trasporto al fine di massimizzare la riduzione dei costi operativi. Poiché il mercato offre già numerose soluzioni che presentano costi di investimento e operativi anche molto diversi fra loro lo strumento deve non solo definire le linee interessate all'elettro-mobility shift ma deve anche definire la tecnologia più conveniente per ciascuna linea da un punto di vista globale. Il progetto parte dall'identificazione di tre architetture oggi disponibili: (A) elettrificazione dei bus con ricarica al deposito, che include anche l'investimento in nuovi mezzi diesel, ibridi o a metano, (B) elettrificazione dei bus con ricarica al capolinea, (C) elettrificazione dei bus con ricarica lungo il percorso.

Scopo specifico dell'attività di ricerca del DI-RM3 è quello di mettere a punto modelli e algoritmi di ottimizzazione rapidi ed efficienti per la soluzione di questo problema. Nel secondo di attività la ricerca si è allargata alle architetture A-diesel, A-ibride, A-metano e C, oltre a quelle già studiate nel primo anno A-elettrico e B. Sono stati definiti algoritmi euristici veloci in grado di risolvere problemi di dimensioni realistiche (grande città italiana) in tempi contenuti.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Definizione dei modelli di programmazione matematica

Dall'analisi dei dati forniti da ENEA, che comprendevano la definizione di diversi modelli matematici, il DI-RM3 ha sviluppato alcuni modelli di programmazione matematica, e precisamente di Programmazione Non Lineare (PNL) al fine di meglio definire i problemi di ottimizzazione affrontati e le loro proprietà matematiche. In questa sezione vengono illustrati i due modelli prodotti nel secondo anno, che fanno riferimento a due distinti problemi di ottimizzazione, il primo con un budget destinato solo all'elettificazione della rete mediante impiego di veicoli di tipo full electric (BEV) e il secondo con un budget destinato indistintamente al rinnovo del parco autobus (compresi eventuali investimenti per garantire il rifornimento energetico in caso di impiego di fonti energetiche alternative al gasolio). In entrambi i modelli le variabili di decisione (Booleane)

del problema sono ricomprese in un vettore  $x$ , tutte le altre grandezze identificate nel seguito si riferiscono a dati e parametri del problema. La notazione, comune ai due modelli, è stata anche rivista come segue:

### Dati di input

**Insiemi:** Insieme dei depositi  $D$  di stazionamento dei veicoli, insieme delle linee  $L$  della rete, insieme delle fermate (stop)  $S$  della rete, insieme dei capilinea (terminal)  $T$  della rete.

**Diesel:** costo di investimento  $I_l^D$  e costo operativo  $C_l^D$  dei mezzi dedicati alla linea  $l \in L$  e alimentati a diesel.

**Metano:** costo di investimento  $I_l^M$  e costo operativo  $C_l^M$  dei mezzi dedicati alla linea  $l$  e alimentati a metano.

**Ibrido:** costo di investimento  $I_l^I$  e costo operativo  $C_l^I$  dei mezzi dedicati alla linea  $l$  con alimentazione ibrida.

**Tecnologia A:** Costo di investimento  $I_l^A$  e costo operativo  $C_l^A$  dei mezzi dedicati alla linea  $l$  con alimentazione *full electric* e tecnologia  $A$ . Costo di investimento  $I_d^E$  e costo operativo  $C_d^E$  di elettrificazione di una postazione di stazionamento al deposito  $d \in D$ . Numero di mezzi  $n_l$  dedicati alla linea  $l$ . Se la linea è elettrificata, ogni postazione di stazionamento al deposito  $d$  deve essere equipaggiata con una stazione di caricamento, pertanto il deposito deve riservare  $n_l$  stazioni di caricamento linea  $l$ . I consumi elettrici e i costi di manutenzione dei veicoli sono ricompresi nella voce  $C_l^A$ .

**Tecnologia B:** Costo di investimento  $I_l^B$  e costo operativo  $C_l^B$  dei mezzi dedicati alla linea  $l$  con alimentazione *full electric* e tecnologia  $B$ . Costo di investimento  $I_d^E$  e costo operativo  $C_d^E$  di elettrificazione di una postazione di stazionamento al deposito. Numero di mezzi  $n_l$  dedicati alla linea  $l$ . Se la linea è elettrificata, è necessario equipaggiare con una stazione di caricamento tutte le postazioni di stazionamento al deposito dedicate alla linea e, in aggiunta, un numero appropriato di postazioni ai capilinea (Terminal)  $t \in T$ . Poiché le postazioni ai terminal possono essere condivise tra più linee, dimensionando opportunamente le postazioni di ricarica, i costi di investimento  $I_T(x)$  e i costi operativi  $C_T(x)$  per l'elettrificazione del terminal  $T$  dipendono dalla soluzione complessiva  $x$  di elettrificazione di tutte le linee che insistono sul terminal  $T$ , equipaggiate con tecnologia  $B$  e  $C$ . Le due funzioni investimento  $I_T(x)$  e  $C_T(x)$  risultano essere concave e crescenti all'aumentare del numero di linee elettrificate con tecnologia  $B$  e  $C$  per la presenza di costi fissi ed economie di scala. I consumi elettrici e i costi di manutenzione dei veicoli della linea sono ricompresi nella voce  $C_l^B$ .

**Tecnologia C:** Costo di investimento  $I_l^C$  e costo operativo  $C_l^C$  dei mezzi dedicati alla linea  $l$  con alimentazione *full electric* e tecnologia  $C$ . Costo di investimento  $I_d^E$  e costo operativo  $C_d^E$  di una postazione di stazionamento al deposito. Numero di mezzi  $n_l$  dedicati alla linea  $l$ . Se la linea è elettrificata, è necessario equipaggiare con una stazione di caricamento tutte le postazioni di stazionamento al deposito e ai terminal della linea. In aggiunta, anche alcune fermate dell'insieme  $S$  devono essere equipaggiate con stazioni di ricarica. A differenza dei terminal, tuttavia, il tempo di ricarica alla fermata  $s \in S$  è molto limitato (nell'ordine dei secondi), il che consente di equipaggiare le fermate con una sola postazione di ricarica, indipendentemente dal numero di linee che usufruiscono della stessa postazione. Chiaramente i costi di gestione vanno ripartiti tra le linee che utilizzano la stessa postazione. Si indicano con  $I_s^E$  e  $C_s^E$  i costi di investimento e operativi di una postazione di ricarica alla fermata (stop)  $s \in S$ . Analogamente alle precedenti tecnologie, i consumi elettrici e i costi di manutenzione dei veicoli della linea sono ricompresi nella voce  $C_l^C$ .

### Variabili (per ogni linea $l$ )

$x_{la}$  variabile binaria pari a 1 se la linea  $l$  è equipaggiata con tecnologia  $a$  e 0 altrimenti.  $a = D, M, I, A, B, C$  rispettivamente se la tecnologia è Diesel, Metano, Ibrida, A, B, C.

$y_s$  variabile binaria pari a 1 se lo stop  $s \in S$  è elettrificato e 0 altrimenti.

#### 2.1.1 Revisione del modello con budget destinato all'elettrificazione della rete

Il modello sviluppato nel primo anno del progetto fa riferimento a un problema di ottimizzazione semplificato con vincoli e funzione obiettivo lineari e privo dell'architettura C. Nel secondo anno di progetto il modello è

stato rivisto aggiungendo questa tecnologia e rappresentando esplicitamente le non linearità nella funzione obiettivo e nei vincoli. Nel seguito si rappresentano solo le parti modificate, rinviando al rapporto del primo anno per i restanti vincoli. Il problema risultante è il seguente:

**Funzione obiettivo**

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A,B,C\}} [(I_l^a + C_l^a) - (I_l^D + C_l^D)] x_{la} + \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A,B,C\}} (I_d^E + C_d^E) n_l x_{la} + \\ \sum_{t \in T} [I_t(x) + C_t(x)] + \sum_{s \in S} (I_s^E + C_s^E) y_s \end{array} \right\}$$

**Vincoli**

$$\sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A,B,C\}} I_l^a x_{la} + \sum_{d,l,a} I_d^E n_l x_{la} + \sum_{t \in T} I_t(x) + \sum_{s \in S} I_s^E \cdot y_s \leq budget$$

$$x_{lA} + x_{lB} + x_{lC} \leq 1$$

Gli ulteriori vincoli, per i quali si rimanda al rapporto PAR 2016 dello scorso anno, servono a garantire che la tecnologia *a* sia ammissibile per la linea *l* e che depositi, terminali e stop siano elettrificati coerentemente con le scelte sulle linee da elettrificare.

**2.1.2 Modello con budget destinato al rinnovo del parco autobus elettrico+fossile**

Questo modello è stato introdotto con il secondo anno di ricerca (PAR 2017) ed è stato sviluppato per affrontare il problema di rinnovo complessivo del parco autobus, a partire da un budget destinato indistintamente al rinnovo del parco autobus (compresi eventuali investimenti per garantire il rifornimento energetico in caso di impiego di fonti energetiche alternative al gasolio) e lasciando agli algoritmi di ottimizzazione il compito di definire la soluzione più conveniente, che potrà essere parzialmente in elettrico e parzialmente a combustibile tradizionale e/o ibrido, in funzione delle caratteristiche della rete.

Il problema risultante è il seguente:

**Funzione obiettivo**

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A,B,C,M,I\}} [(I_l^a + C_l^a) - (I_l^D + C_l^D)] x_{la} + \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A,B,C\}} (I_d^E + C_d^E) n_l x_{la} + \\ \sum_{t \in T} [I_t(x) + C_t(x)] + \sum_{s \in S} (I_s^E + C_s^E) y_s \end{array} \right\}$$

**Vincoli**

$$\sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A,B,C,M,I\}} I_l^a x_{la} + \sum_{d,l,a} I_d^E n_l x_{la} + \sum_{t \in T} I_t(x) + \sum_{s \in S} I_s^E \cdot y_s \leq budget$$

$$x_{lA} + x_{lB} + x_{lC} + x_{lD} + x_{lI} + x_{lM} = 1$$

Gli ulteriori vincoli, per i quali si rimanda al rapporto PAR2016 dello scorso anno, servono a garantire che la tecnologia  $a$  sia ammissibile per la linea  $l$  e che depositi, terminali e stop siano elettrificati coerentemente con le scelte sulle linee da elettrificare.

## 2.2 Risultati teorici di base per il progetto degli algoritmi

In questa sezione vengono descritti i risultati teorici ottenuti, che hanno consentito lo sviluppo degli algoritmi oggetto delle sezioni successive. Partendo dai modelli descritti nella sezione precedente, sono state sviluppate le seguenti, interessanti, proprietà teoriche.

### 2.2.1 Calcolo di Upper Bound e Lower Bound

Il valore ottimo dei problemi di programmazione non lineare della sezione precedente può essere sovrastimato o sottostimato risolvendo all'ottimo dei problemi lineari, seppure a numeri interi. Allo scopo è sufficiente sostituire le funzioni non lineari  $\sum_{t \in T} [I_T(x) + C_T(x)]$  con delle sovrastime  $\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} [I_{tla} + C_{tla}] x_{la}$  o delle sottostime  $\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lfloor I_{tla} + C_{tla} \rfloor x_{la}$ , dove le quantità  $\lceil I_{tla} + C_{tla} \rceil$  e  $\lfloor I_{tla} + C_{tla} \rfloor$  approssimano per eccesso o per difetto il contributo della linea  $l$  al costo di elettrificazione del terminal  $t$  quando la linea  $l$  è equipaggiata con la tecnologia  $a$ . Chiaramente  $\lceil I_{tla} + C_{tla} \rceil = \lfloor I_{tla} + C_{tla} \rfloor = 0$  se la linea  $l$  non utilizza il terminal  $t$ . Per dare un'idea del risultato, si consideri il seguente esempio.

La linea  $l$  ha una frequenza di 7 bus/h. Ciascun bus, se equipaggiato con tecnologia B, richiede un tempo di ricarica al terminal  $t$  pari a 10 m, più un margine di 2 m per evitare l'eventualità di code eccessive alla postazione di ricarica. Se equipaggiato con tecnologia C il bus richiede 1 m di ricarica, più un margine di 12s. Ne segue che una postazione di ricarica al terminal può servire al più 5 bus/h con tecnologia B o 50 bus/h con tecnologia C. La linea  $l$  avrà quindi necessità di almeno 1,4 postazioni di ricarica con tecnologia B e 0,14 con tecnologia C. Sia  $LB$  il costo per l'elettrificazione di una postazione al terminal calcolato utilizzando solo le voci di costo non scalabili (quindi trascurando i costi fissi) e sia  $UB$  il costo complessivo di elettrificare una postazione (quindi con tutti i costi fissi e senza economie di scala) al terminal  $t$ . Chiaramente  $UB \geq LB$ . Allora si ha:  $\lceil I_{tLB} + C_{tLB} \rceil = 1,4LB$ ;  $\lfloor I_{tLB} + C_{tLB} \rfloor = 2UB$ ;  $\lceil I_{tLC} + C_{tLC} \rceil = 0,14LB$ ;  $\lfloor I_{tLB} + C_{tLB} \rfloor = UB$ . Procedendo analogamente per tutte le linee e tutti i terminal, si ottiene il risultato:

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lceil I_{tla} + C_{tla} \rceil x_{la} \leq \sum_{t \in T} [I_T(x) + C_T(x)] \leq \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lfloor I_{tla} + C_{tla} \rfloor x_{la}$$

Discorso analogo può essere fatto per il termine non lineare  $\sum_{t \in T} I_t(x)$  presente nei vincoli del problema:

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lfloor I_{tla} \rfloor x_{la} \leq \sum_{t \in T} I_T(x) \leq \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lceil I_{tla} \rceil x_{la}$$

Sostituendo  $\sum_{t \in T} [I_T(x) + C_T(x)]$  con  $\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lceil I_{tla} + C_{tla} \rceil x_{la}$  nella funzione obiettivo e  $\sum_{t \in T} I_T(x)$  con  $\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lfloor I_{tla} \rfloor x_{la}$  nei vincoli e risolvendo all'ottimo il problema di PLI risultante si ottiene una sottostima dell'ottimo non lineare, mentre sostituendo  $\sum_{t \in T} [I_T(x) + C_T(x)]$  con  $\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lfloor I_{tla} + C_{tla} \rfloor x_{la}$  nella funzione obiettivo e  $\sum_{t \in T} I_T(x)$  con  $\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{a=B,C} \lceil I_{tla} \rceil x_{la}$  nei vincoli e cercando una soluzione ammissibile del problema di PLI risultante si ottiene una sovrastima dell'ottimo non lineare.

Poiché il peso relativo del termine  $\sum_{t \in T} [I_T(x) + C_T(x)]$  nella funzione obiettivo è tipicamente molto contenuto rispetto alle altre voci di costo, è possibile ottenere ottime stime dell'ottimo attraverso la soluzione di problemi di PLI.

## 2.3 Progettazione degli algoritmi risolutivi euristici

### 2.3.1 Introduzione

Le attività svolte nell'ambito di quest'anno di ricerca sono state mirate al miglioramento e all'estensione degli algoritmi studiati ed analizzati nel primo anno della ricerca. In particolare, le estensioni principali hanno riguardato:

- L'introduzione di tecnologie alternative ma basate su combustibili fossili come Metano ed Ibrido;
- L'introduzione della possibilità di scegliere come opportunità di investimento l'acquisto di una vettura Diesel nuova;
- Adattare l'algoritmo a gestire il budget di investimento per il rinnovo generale della flotta, vagliando tutte le tecnologie a disposizione, o per la sola elettrificazione della rete.
- L'introduzione della tecnologia Ultra-Rapida o Elettrificazione C;
- Mantenimento contenuto dei tempi di calcolo pur aumentando la complessità del problema e del calcolo della funzione obiettivo.

L'obiettivo principale dell'introduzione della tecnologia C ha richiesto, inoltre, lo sviluppo di alcune procedure di pre-processing per l'analisi dell'utilizzazione delle infrastrutture di nodo.

Nel seguito di questa sezione si descrive l'impatto dei diversi obiettivi in riferimento al lavoro svolto.

### 2.3.2 Tecnologia Ibrido-Metano-Diesel Nuovo

L'implementazione di queste nuove tecnologie ha aumentato notevolmente lo spazio delle soluzioni che l'algoritmo di ottimizzazione deve esplorare. In particolare, si è passati dalle 2 tecnologie A e B del primo anno di ricerca a 6 tecnologie, tenendo in considerazione anche la tecnologia C:

- Elettrificazione Lenta (A)
- Elettrificazione Rapida (B)
- Elettrificazione Ultra-Rapida (C)
- Diesel Nuovo
- Metano Nuovo
- Ibrido Nuovo

Definendo  $n$  il numero di linee della rete, questo incremento di tecnologie ha esteso lo spazio delle soluzioni da  $O((2 + 1)^{|L|})$ , dato dalle possibili combinazioni delle 2 tecnologie elettriche in alternanza a quella tradizionale, a  $O((6 + 1)^{|L|+|S|})$ , aumentando i tempi necessari alla ricerca di una soluzione valida. Durante l'attività di quest'anno si è cercato, pertanto, di ottimizzare il codice e l'algoritmo al fine di migliorare sia l'efficienza che l'efficacia del software. In particolare, si è cercato di sviluppare delle procedure di pre-processing che semplificassero la valutazione della funzione obiettivo in modo da contenere i tempi di elaborazione. Partendo da questa base, nel secondo anno della ricerca è stato sviluppato un nuovo algoritmo meta-euristico, che ha consentito di mantenere risultati di efficacia analoghi a quelli ottenuti nel primo anno anche per il problema, molto più generale, affrontato nel secondo anno. Questo risultato è stato raggiunto grazie a una migliore dell'architettura del software unita con la parallelizzazione dei processi, che ha consentito di ridurre notevolmente i tempi di esecuzione, dando maggior spazio all'esplorazione dello spazio delle soluzioni.

Dal punto di vista algoritmico Ibrido, Metano e Diesel sono state trattate alla pari della tecnologia A e B ma non intervengono sulla definizione del costo di nodo.

### 2.3.3 Tecnologia a ricarica Ultra-Rapida o Elettrificazione C

Nell'anno precedente sono state analizzate le tecnologie di elettrificazione a ricarica Lenta (A) e Rapida (B). Queste tecnologie prevedono l'installazione di infrastrutture di ricarica al deposito e al capolinea ma, avendo deciso nell'anno precedente di elettrificare tutti i capolinea delle linee con tecnologia B, il problema di ottimizzazione, come descritto nella relazione precedente, si era incentrato sulla scelta delle linee da elettrificare e sulla tecnologia da usare ignorando la scelta e il dimensionamento del nodo. Per poter tenere in considerazione, nella funzione obiettivo, l'effetto rete dato dall'utilizzo condiviso dei capolinea era stata introdotta una funzione euristica K che correlava il numero di linee incidenti su un nodo con lo sconto dei costi di infrastruttura.

In questo anno di attività si è scelto di perfezionare la modellazione del problema introducendo la tecnologia di tipo C, ovvero la tecnologia di ricarica ultra-rapida basata sui super-condensatori. In questo tipo di tecnologia si fa utilizzo di infrastrutture di ricarica che vengono posizionate in corrispondenza delle fermate (es: pantografi o spire). A causa dei costi che devono essere sostenuti per la realizzazione delle infrastrutture, questa tecnologia può avere dei ritorni economici solo se le infrastrutture vengono condivise. L'introduzione di tale tecnologia ha richiesto, pertanto, una modifica sostanziale dell'algoritmo di ottimizzazione da usare e il raffinamento dell'analisi dei costi di nodo. Si osserva come la tecnologia C introduca una ulteriore necessità di ottimizzazione a valle della decisione di elettrificare o meno le varie linee con tecnologia C. Infatti, non tutti gli stop devono essere elettrificati e l'elettrificazione delle fermate non può essere una decisione stand-alone linea per linea ma il problema va risolto complessivamente per tutta la sottorete elettrificata con tecnologia C. Nel seguito si mostra un esempio di una sottorete di tre linee (nera, rossa e verde) da elettrificare con tecnologia di ricarica ultra-rapida C. In figura sono indicati in blu i terminali delle linee (ogni linea con 2 terminali) e in bianco gli stop. Inoltre, è mostrata la distanza in metri tra fermate consecutive. Si assuma che la tecnologia richieda una distanza massima di 2 km tra fermate elettrificate consecutive, mentre tutti i nodi terminali sono sempre elettrificati.

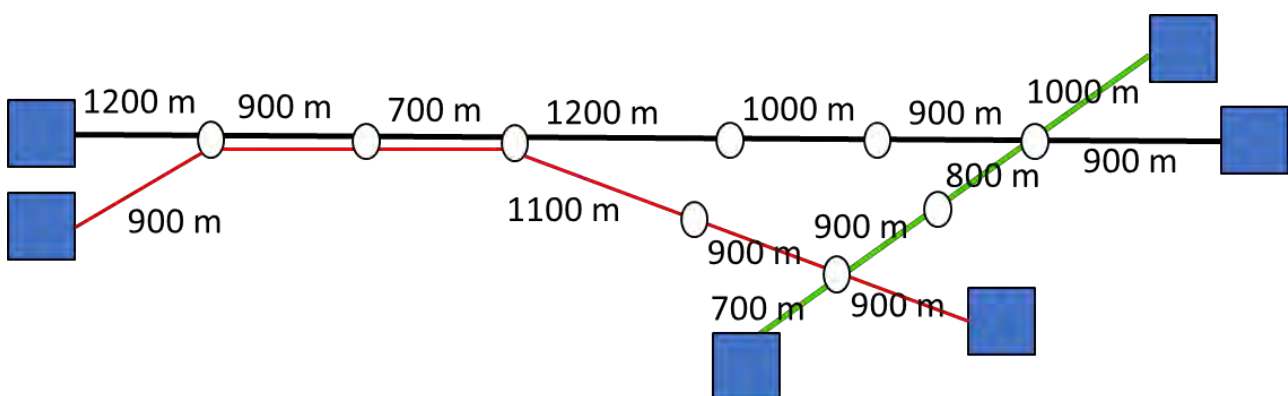


Figura 1: Una sottorete con tre linee

Risolvendo il problema stand-alone su ciascuna linea, si ottengono le tre soluzioni mostrate nella prossima figura, ciascuna ottima per la singola linea, dove vengono evidenziate in rosso le fermate elettrificate.

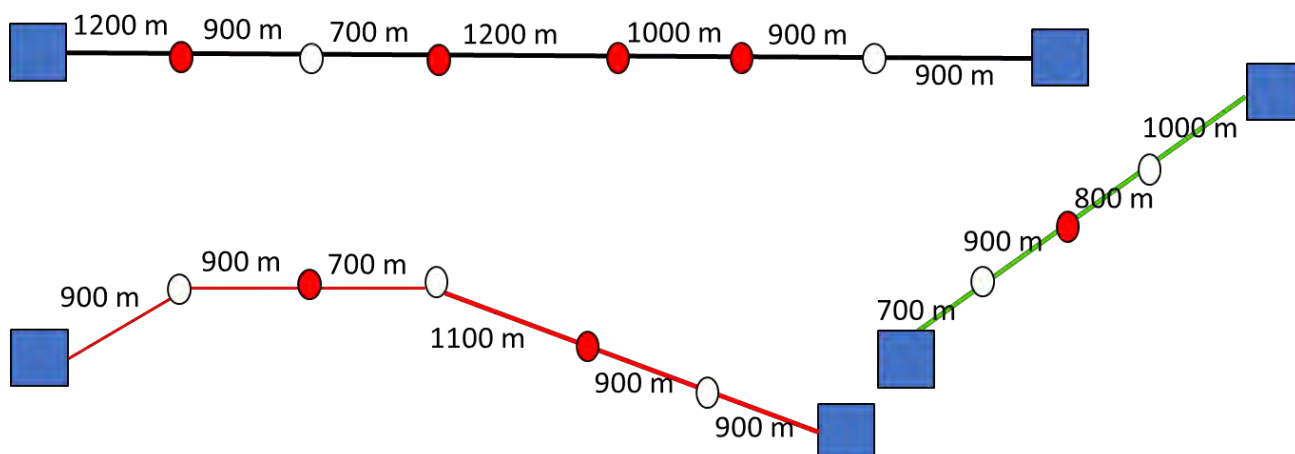


Figura 2: Elettrificazione di costo minimo per ciascuna linea stand-alone

L'unione delle tre soluzioni stand-alone è mostrata nella figura seguente. La soluzione complessiva richiede di elettrificare 7 fermate in quanto non risultano fermate condivise tra due linee.

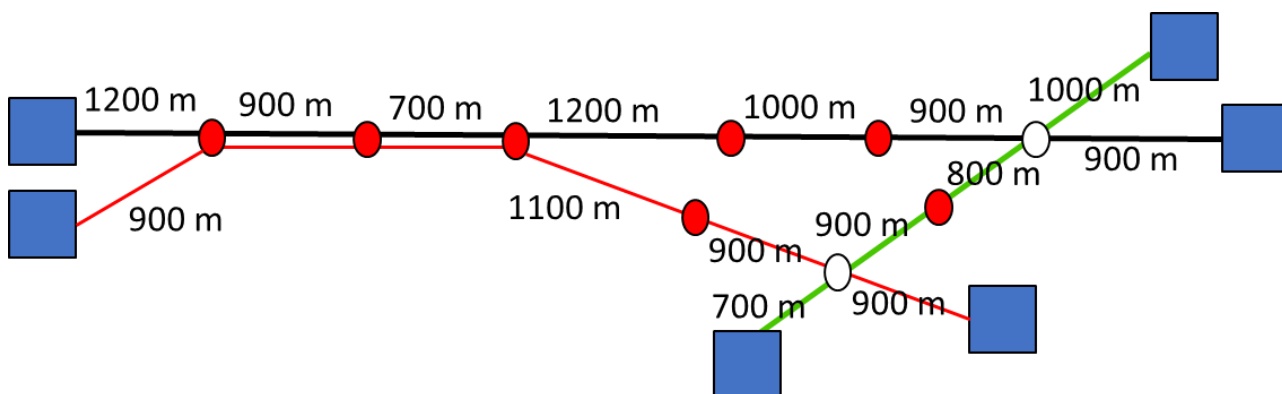


Figura 3: L'unione delle tre soluzioni stand-alone

Tale soluzione è evidentemente sub-ottima per la sottorete complessiva, in quanto è possibile elettrificare tutta la sottorete limitandosi a elettrificare 5 stop in totale, come mostrato nella figura seguente.

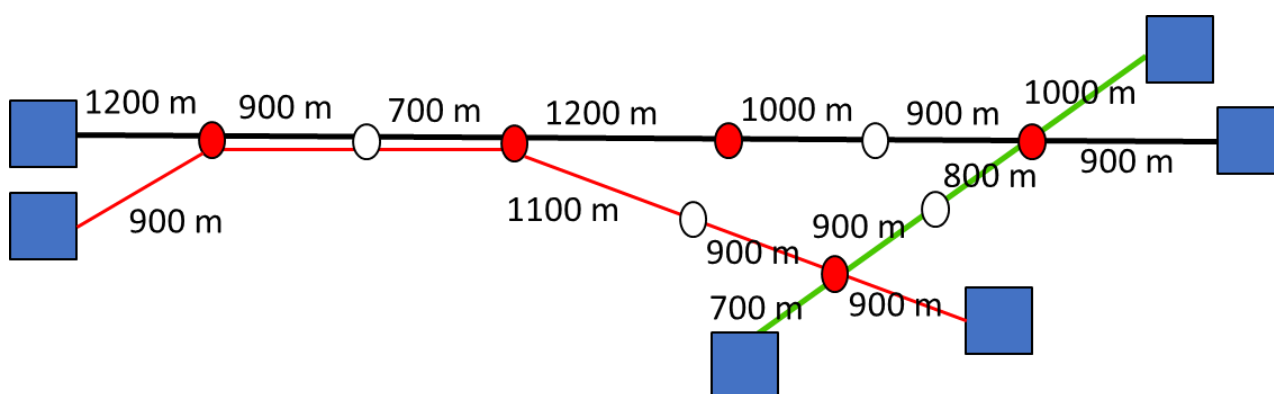


Figura 4: Una soluzione ottima per la sottorete

### 2.3.3.1 Dimensionamento al nodo

Le considerazioni del paragrafo precedente hanno portato all'esigenza di un calcolo dell'effetto rete con una accuratezza superiore a quella dell'anno precedente. Per questo motivo è stato introdotto il calcolo del

dimensionamento del nodo in funzione dell'effettivo utilizzo dell'infrastruttura in termini di linee, corse e consumi. Dall'analisi effettuata dall'ENEA sull'utilizzo dei nodi il collo di bottiglia che si crea nella condivisione di tale risorsa è di natura puramente temporale e dettata principalmente dal numero di linee incidenti e dalla frequenza delle corse. Tale dimensionamento è stato definito, quindi, come una funzione  $f(N, T, L_{NT})$  dipendente dal nodo  $N$ , dalla tecnologia in analisi  $T$  e del numero di linee di tecnologia  $T$  incidenti nel nodo  $L_{NT}$ . In particolare, a partire dal numero di linee incidenti sul nodo e dalla frequenza delle corse viene effettuato un calcolo sull'utilizzazione temporale massima del nodo. A partire da uno studio basato sulla teoria delle code viene stimato il numero di impianti di ricarica da installare per ridurre al minimo i tempi di attesa durante i possibili accodamenti delle vetture. La funzione per la stima dell'utilizzazione è stata definita dall'ENEA, in collaborazione con le università coinvolte nel progetto, ed implementata da Roma Tre all'interno della catena modellistica durante una fase di pre-processing degli algoritmi di ottimizzazione.

Di seguito una descrizione dell'algoritmo di dimensionamento di un capolinea di tecnologia B. Analogo algoritmo è stato utilizzato per le tecnologie di tipo C.

- Definizione del coefficiente di utilizzazione  $U$ :
  - Per ogni capolinea  $C$  e per ogni linea  $L$  elettrificabile con tecnologia B sono state calcolati il numero  $n$  corse incidenti nel capolinea per ogni fascia oraria  $h$
  - Ad ogni corsa è stato associato un tempo di ricarica  $t$  dipendente dal consumo per la tecnologia B e fisso per la tecnologia C
  - È stato così calcolato il coefficiente  $U[C, h, L] = n \cdot t$
  
- Dimensionamento
  - $S$  = Soluzione di rete da analizzare
  - $\forall$  capolinea  $C$  da elettrificare con tecnologia B viene calcolato il numero di linee  $L$  che incidono sul capolinea.
  - $\forall$  per ogni fascia oraria  $h$  viene calcolata  $V_h = \sum_{\forall l \in L} U[C, l, h]$
  - Il numero di impianti di ricarica da installare è pari a  $\frac{\max V_h}{0.7}$  dove il parametro 0.7 è stato calibrato per mezzo di un'analisi effettuata basata sulla teoria delle code.

Il dimensionamento alla fermata per le linee di tipo C mantiene la stessa struttura algoritmica del modello sviluppato per i capolinea fatta eccezione per il calcolo diretto del numero di impianti che segue la logica presentata nella tabella seguente:

	2 linee	3 linee	4 linee	5 linee	> 5 linee
<b>N. di postazioni di ricarica</b>	<b>n. passaggi ora di punta assoluta</b>				
<b>1</b>	(0;46]	(0;41]	(0;37]	(0;34]	(0;31]
<b>2</b>	[47;81]	[42;72]	[38;65]	[35;59]	[32;54]
<b>3</b>	[82;114]	[73;101]	[66;91]	[60;83]	[55;76]
<b>4</b>	[115;123]	[102;110]	[92;99]	[84;90]	[77;83]
<b>5</b>	[124;128]	[111;114]	[100;103]	[91;94]	[84;86]

Quindi, inerentemente alle tecnologie B e C sono state implementate le procedure di dimensionamento delle infrastrutture di ricarica al nodo in funzione del tempo di utilizzazione e conseguentemente del numero di corse incidenti sul nodo. In particolare, tale procedura è stata sviluppata per:

- Infrastrutture al capolinea per tecnologie di tipo B;
- Infrastrutture al capolinea per tecnologie di tipo C;
- Infrastrutture alle fermate per tecnologie di tipo C;

Per poter procedere al dimensionamento sono state implementate inoltre le procedure per calcolare le seguenti grandezze:

- Percentuale di utilizzazione dell'infrastruttura di tipo B al capolinea per linea e fascia oraria (pre-processing)
- Percentuale di utilizzazione dell'infrastruttura di tipo C al capolinea per linea e fascia oraria (pre-processing)
- Percentuale di utilizzazione dell'infrastruttura di tipo C alla fermata per linea e fascia oraria (pre-processing)
- Numero di corse incidenti per ogni fermata
- Numero di corse incidenti per ogni capolinea;

Più avanti, nella relazione, verranno descritte le modifiche dell'algoritmo introdotte per l'introduzione, tra le possibili scelte, della tecnologia C.

#### 2.3.4 Utilizzo del budget per la sola elettrificazione

L'algoritmo è stato sviluppato tenendo in considerazione la possibilità di utilizzarlo per risolvere problemi reali e per rispondere a domande differenti inerenti al problema di rinnovamento di una flotta del TPL come ad esempio:

- Voglio investire. Quale è la flotta più conveniente da acquistare?
- Voglio investire sull'elettrico. Quale è la flotta elettrica più conveniente da acquistare?
- Voglio investire ma ho un determinato budget. Quale è la flotta o flotta elettrica più conveniente da acquistare?
- Devo investire almeno un determinato budget. Quale è la flotta o flotta elettrica più conveniente da acquistare?

Lo sviluppo e l'aggiornamento dell'algoritmo ha tenuto in considerazione queste possibili casistiche attraverso la gestione di opportune variabili di controllo.

#### 2.3.5 Algoritmo di ottimizzazione rete

L'introduzione dell'ottimizzazione delle fermate ha suggerito la modifica del precedente algoritmo di ottimizzazione in un algoritmo bi-livello. A livello superiore l'algoritmo di ottimizzazione di rete sceglie le linee da elettrificare e le relative tecnologie cercando di minimizzare i costi, nel livello sottostante l'algoritmo ottimizza le fermate per tutte le linee di tecnologie C cercando di ottimizzare il livello di utilizzazione delle fermate.

L'algoritmo di primo livello è costituito da questi due blocchi di calcolo:

- Algoritmo meta-euristico di ricerca globale
- Algoritmi ispirati ai metodi greedy per il problema di Knapsack per la costruzione delle soluzioni iniziali;
  - KBM o Knapsack a budget minimo: rispetto all'algoritmo tradizionale l'algoritmo termina appena è stato superato il budget minimo di investimento. Questo algoritmo viene iterato, generando nuove soluzioni, modificando il budget minimo da superare al budget dell'ultima soluzione calcolata con questa tecnica:
    - $S = \text{KBM}(\text{Investimento Minimo})$
    - $S1 = S$
    - $S = \text{KBM}(\text{Budget di } S1)$
    - Itera dal punto b fino a quando S diverso da S1

- KMinCost: rispetto al knapsack tradizionale le scelte non vengono ordinate per valore specifico ma per costo di investimento in ordine crescente;
- KMaxCost: rispetto al knapsack tradizionale le scelte non vengono ordinate per valore specifico ma per costo di investimento in ordine decrescente;
- KMinFO: rispetto al knapsack tradizionale le scelte non vengono ordinate per valore specifico ma per valore in ordine crescente;
- KMaxFO: rispetto al knapsack tradizionale le scelte non vengono ordinate per valore specifico ma per valore in ordine decrescente;
- KTPBest o Knapsack con tecnologie proibite: Per ogni coppia di tecnologie scelte nella soluzione migliore tra quelle precedenti, viene generata una nuova soluzione con il knapsack tradizionale nel quale vengono proibite tali scelte.
- KTP o Knapsack con tecnologie proibite: Per ogni soluzione generata con gli algoritmi precedenti viene iteratamente applicato l'algoritmo per knapsack tradizionale proibendo a turno una delle tecnologie scelte dalla soluzione. Questa variante è equivalente al precedente ma viene applicata a tutte le soluzioni ma proibendo una sola tecnologia per volta.

Pur mantenendo la sua struttura originale, ciascuno di questi algoritmi è stato modificato, durante quest'anno di attività, per poter gestire le nuove tecnologie e i nuovi parametri di controllo. Inoltre, in questo anno di attività, il precedente algoritmo ILS/TS è stato sostituito con un più rapido e altrettanto efficace algoritmo genetico.

Gli Algoritmi Genetici sono algoritmi meta-euristici utilizzati per risolvere problemi di ricerca e ottimizzazione globale e sono basati sui principi che regolano l'evoluzione naturale delle specie. L'idea che sta alla base degli AG è quindi quella di selezionare le soluzioni migliori e di ricombinarle fra loro in maniera tale che esse evolvano verso un punto di ottimo. In natura gli individui si riproducono mescolando i propri patrimoni genetici, cioè i loro cromosomi: i nuovi individui generati avranno pertanto un patrimonio genetico derivato in parte dal padre e in parte dalla madre. La selezione naturale (cioè il riutilizzo di soluzioni buone) fa sì che riescano a sopravvivere e quindi a riprodursi solo gli individui più forti, "più adatti", cioè quelli con la fitness (funzione da massimizzare) più elevata (più vicini all'ottimo); la fitness media della popolazione tenderà quindi ad aumentare con le generazioni, portando così la specie ad evolversi nel tempo. La selezione di un individuo dipende dal suo valore di fitness (cioè quanto l'individuo è "buono" a risolvere il problema): un valore più alto di fitness corrisponde ad una maggiore possibilità di essere scelto come genitore per creare la nuova generazione. Uno dei criteri più utilizzati è quello di Holland, utilizzata in questo progetto, che attribuisce una probabilità di scelta proporzionale al fitness. Grazie al meccanismo della selezione, solo gli individui migliori hanno la possibilità di riprodursi e quindi di trasmettere il loro genoma alle generazioni successive. Per la creazione di nuovi individui ad ogni generazione si utilizzano due operazioni ispirate all'evoluzionismo biologico: il crossover e la mutazione. Una volta individuati una coppia di genitori con il meccanismo della selezione, i loro genomi possono andare incontro a ciascuna delle due operazioni con probabilità definite.

**2.3.5.1 Genoma**

Per poter rappresentare correttamente ed efficientemente una soluzione il genoma è stato rappresentato per mezzo di un vettore costituito da un elemento per ogni linea. Il valore del singolo elemento della linea rappresenta la tecnologia usata per quella linea:

Linea 1	Linea 2	Linea 3	Linea 4	Linea 5	Linea 6	Linea 7	Linea 8	Linea 9	Linea 10
A	A	Diesel 3	B	C	Diesel 3	A	B	C	Diesel3

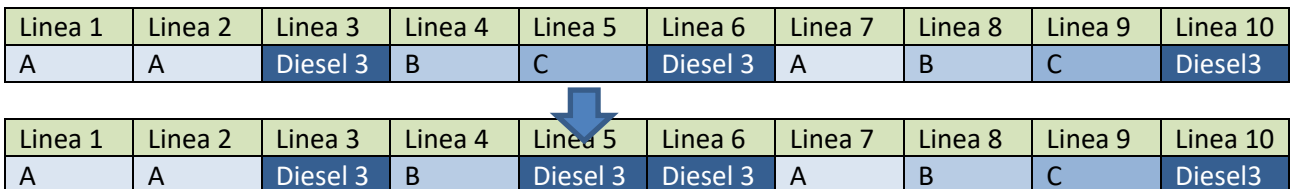
All'interno del genoma è stato esplicitato il Diesel Euro 3 come una possibile tecnologia che però equivale alla scelta di non aggiornare la linea.

Con questa metodologia descrittiva, un insieme di soluzioni, ovvero sia la popolazione, è stata rappresentata da una matrice di elementi dove ogni riga rappresenta una soluzione.

Linea 1	Linea 2	Linea 3	Linea 4	Linea 5	Linea 6	Linea 7	Linea 8	Linea 9	Linea 10
A	A	Diesel 3	B	C	Diesel 3	A	B	C	Diesel 3
Diesel 3	B	A	Diesel 3	B	C	Diesel 3	B	Diesel 3	Diesel 3
B	C	Diesel 3	A	A	Diesel 3	B	B	C	Diesel 3

**2.3.5.2 Mutazione**

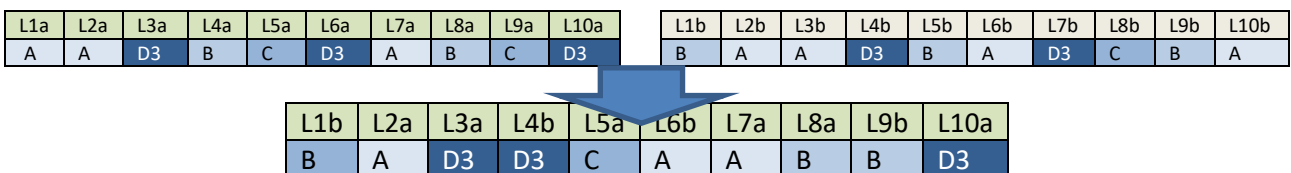
La mutazione genetica è stata implementata alterando casualmente la tecnologia applicata ad una o più linee, scegliendo tra le tecnologie fattibili. Questo garantisce che le soluzioni create con l'operatore di mutazione siano sempre fattibili rendendo l'operatore di mutazione non-distruttivo.



La probabilità con cui si effettua una mutazione viene definita a-priori così come la probabilità che ogni linea subisca un cambio di tecnologia.

**2.3.5.3 Crossover**

L'operatore di crossover, per ogni linea, sceglie la tecnologia da usare da uno dei 2 genitori rispettando comunque il vincolo di budget.



**2.3.5.4 Elitismo**

Per evitare che il patrimonio genetico migliore si disperda, viene definita una certa percentuale della popolazione che viene copiata nella generazione successiva. Questo fenomeno viene chiamato elitismo.

### 2.3.6 Algoritmo di ottimizzazione delle fermate

L'algoritmo di secondo livello creato è un algoritmo greedy che persegue la ricerca di una soluzione buona attraverso l'elettrificare un insieme di fermate ad alta incidenza di corse. In questo caso sono state evitati algoritmi meta-euristici poiché i tempi di esecuzione rendevano sconsigliata tale scelta. Dal punto di vista della complessità computazionale, l'introduzione dell'ottimizzazione delle fermate, ha aumentato la dimensione dello spazio delle soluzioni di un fattore pari a  $2^m$ , con  $m$  pari al numero di fermate che si possono elettrificare. Questo aumento dello spazio delle soluzioni ha richiesto lo studio di alcune strategie per la riduzione di tale impatto.

In particolare, facendo un'analisi complessiva sull'utilizzazione massima di Roma, solo poche fermate richiedono più di una infrastruttura e questo ha suggerito che un'euristica per la minimizzazione dei costi può essere ottenuta con la minimizzazione delle fermate che è correlata con la massimizzazione della somma dei gradi delle fermate, ovvero il numero di corse incidenti. Questa considerazione sposta il problema della scelta della configurazione migliore alla scelta delle fermate con maggior livello di condivisione mantenendo il vincolo di fattibilità tecnica nell'elettrificazione della linea.

Tenendo in considerazione quanto detto l'algoritmo può essere suddiviso in 2 parti in funzione della tipologia di linea:

- Linee isolate che non intersecano altre linee con tecnologia C: Nel caso di linee isolate la scelta delle fermate avviene scegliendo i nodi in ordine di comparizione lungo la linea e rispettando i vincoli energetici:
  - A partire dalla prima fermata, considerata elettrificata in quanto capolinea, si analizza il consumo necessario per passare alla fermata successiva  $f$ . Se l'energia presente nelle batterie è sufficiente allora l'algoritmo procede nella propria analisi, in caso contrario viene elettrificata la fermata  $f-1$ .

In questo caso non esiste una vera e propria ottimizzazione ma l'approccio greedy tende comunque a diminuire il numero di fermate utilizzato.

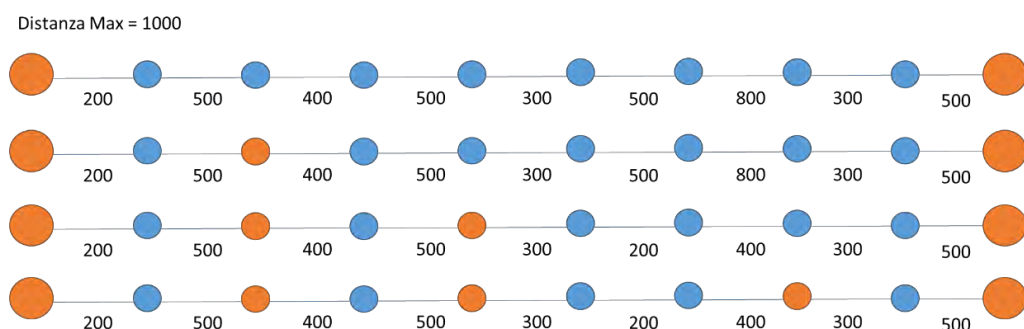


Figura 5: Esempio di sequenza di elettrificazione di una linea isolata

- Linee sovrapposte: Quando più linee si sovrappongono, condividendo alcune fermate, allora l'algoritmo, cercando di massimizzare i gradi e minimizzare il numero di nodi scelti, esegue i seguenti passi:
  - Calcola i livelli di incidenza delle linee da elettrificare con tecnologia C e delle relative corse per ogni fermata;
  - Elettrifica tutte le fermate interessate dalle linee da elettrificare;
  - Ordina le fermate a partire da livelli di incidenza bassi;

- Per ogni fermata, a partire da livelli di incidenza bassi:
  - Per ogni percorso incidente:
    - Verifica che sia possibile eliminare l’impianto di ricarica la fermata garantendo l’elettrificazione del percorso
  - Se l’impianto è eliminabile per tutti i percorsi incidenti allora viene eliminato dalla soluzione

Un esempio della funzionalità dell’algoritmo di ottimizzazione viene mostrato di seguito. In questo particolare esempio sono state prese 23 linee elettrificabili con tecnologia C che facevano utilizzo di 982 fermate. L’algoritmo ha ridotto il numero di fermate a soli 177 nodi ottimizzando la loro localizzazione in funzione del livello di condivisione.



**Figura 6: Ottimizzazione delle fermate**

Nella medesima soluzione, si può vedere come le fermate lungo gli assi principali siano state preferite dall’algoritmo nella scelta dell’elettrificazione.



**Figura 7: Ottimizzazione lungo gli assi principali**

## 2.4 *Analisi dei risultati*

L'algoritmo sviluppato è stato confrontato, per una sua validazione, con l'algoritmo esatto sviluppato dall'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (UTV). Quest'ultimo algoritmo, utilizzando il sistema di super calcolo CRESCO, ha esplorato l'insieme completo delle soluzioni alla ricerca della soluzione ottima. Questo confronto, già effettuato nell'anno precedente, è stato effettuato su alcune istanze generate a partire dal servizio del TPL del Comune di Roma. In particolare, la rete di partenza, importata a partire dagli open data distribuiti dal comune di Roma è caratterizzata dai seguenti numeri:

- 283 Linee;
- 632 Percorsi;
- 7409 Fermate;
- 228 Capolinea;



**Figura 8: Mappa del TPL di Roma utilizzato**

A partire dall'istanza generale di Roma, per poter confrontare i due algoritmi, sono state create delle istanze ad hoc sulle quali è stata valutata la capacità dell'algoritmo approssimato di avvicinarsi alla soluzione ottima. Le istanze analizzate sono state costruite a partire da 2 scenari denominati:

- Via del Corso:
  - 13 linee
  - 550 fermate
  
- Termini:
  - 6 linee
  - 221 fermate



Figura 9: Istanza di via del Corso e Istanza di Termini

A questi scenari sono stati successivamente associati:

- Budget: caratterizzante lo spazio delle soluzioni ammissibili e utilizzato per il pruning durante l'esecuzione dell'algoritmo esatto dell'UTV.
- Tolleranza: Rapporto tra budget minimo ammissibile e il budget.

Da questo incrocio sono state generate 26 istanze:

Id	Scenario	Budget	Tolleranza
1	Via del Corso	10000000	0.1
2	Via del Corso	20000000	0.1
3	Via del Corso	30000000	0.1
4	Via del Corso	40000000	0.1
5	Via del Corso	50000000	0.1
6	Via del Corso	60000000	0.1
7	Via del Corso	70000000	0.1
8	Via del Corso	80000000	0.1
9	Via del Corso	100000000	0.9
10	Via del Corso	200000000	0.9
11	Via del Corso	300000000	0.9
12	Via del Corso	400000000	0.9
13	Via del Corso	500000000	0.9
14	Via del Corso	600000000	0.9
15	Via del Corso	700000000	0.9
16	Via del Corso	800000000	0.9
17	Termini	30000000	0.1
18	Termini	50000000	0.1
19	Termini	100000000	0.1
20	Termini	200000000	0.1
21	Termini	300000000	0.1
22	Termini	30000000	0.9
23	Termini	50000000	0.9
24	Termini	100000000	0.9
25	Termini	200000000	0.9
26	Termini	300000000	0.9

Per poter comprendere l'efficacia e l'efficienza dell'algorithm il calcolo è stato limitato a:

- 60000 soluzioni analizzate;
- 30 secondi di calcolo;

In particolare, i parametri dell'algorithm genetico usati durante queste ottimizzazioni sono state:

- Generazioni totali: 300
- Popolazione di ogni generazione: 200
- Probabilità di mutazione: 20%;
- Probabilità che durante una mutazione una linea cambi la sua tecnologia: 20%
- Elitismo: 10%

Le soluzioni ottenute, sulle 26 istanze, dal metodo euristico ed esatto sono state confrontate tra loro e dal confronto si evidenzia che l'algorithm bilivello, sviluppato dall'Università di Roma Tre, trova sempre una soluzione molto buona o ottima. Dal confronto sono state escluse soluzioni negative in quanto considerate non praticabili. Queste soluzioni negative sono state riscontrate per le istanze 14, 15, 16 e 26 caratterizzate da un fattore di tolleranza molto alto e pari a 0.9. Questo fattore indica che una soluzione viene considerata ammissibile solo se prevede l'investimento del 90% del budget complessivo. Questo vincolo può obbligare un investimento anche se non conveniente creando soluzioni di nessun interesse. Rilassando tale vincolo, abbassandone il valore, l'algorithm trova soluzioni di investimento migliori.

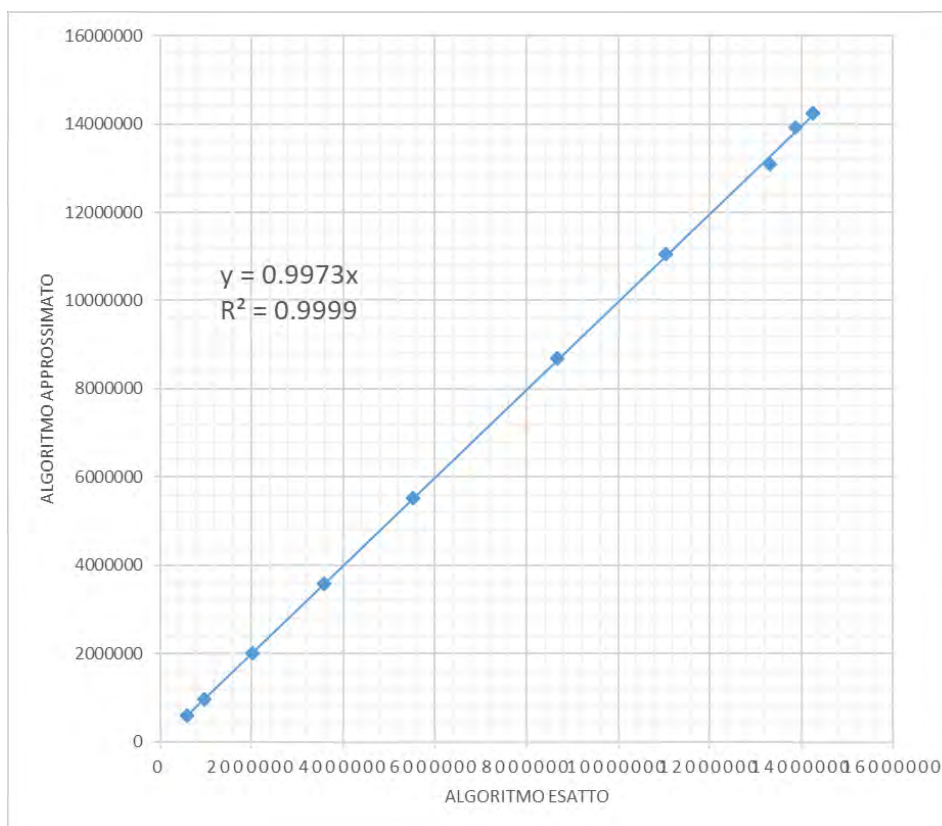


Figura 10: Confronto tra le soluzioni migliori delle singole istanze

Oltre al confronto tra le soluzioni migliori è stato effettuato un confronto anche tra le prime n soluzioni di ciascun algorithm, sia in termini di FO che in termini di tecnologie usate. Al fine di effettuare il confronto, per tutte le istanze analizzate è stata anche effettuata una rappresentazione grafica delle soluzioni per

evidenziare le differenze all'interno del set di soluzioni, non solo in termini di FO ma anche in termini di tecnologie adottate. Per alcune istanze, questo confronto verrà presentato di seguito.

Le soluzioni trovate dai due algoritmi risultano molto simili, da cui si può dedurre la capacità dell'algoritmo meta-euristico di esplorare efficacemente l'insieme ammissibile, anche nel tempo di calcolo molto limitato concesso.

L'analisi ha inoltre evidenziato che la tecnologia C non è mai presente nelle soluzioni prodotte. Da un'analisi approfondita, effettuata per comprenderne la ragione, è emerso che tale tecnologia risulta ad oggi competitiva nei confronti della tecnologia tradizionale Diesel ma non altrettanto competitiva nei confronti delle altre tecnologie elettriche.

Istanza 1

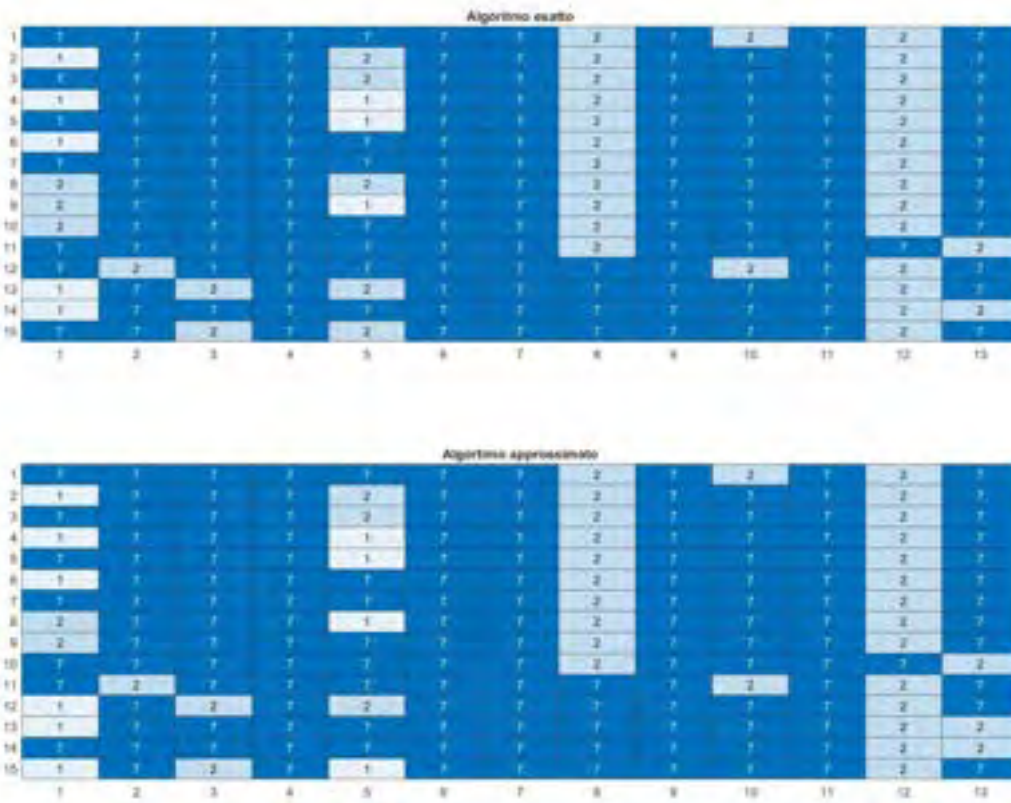


Figura 11: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

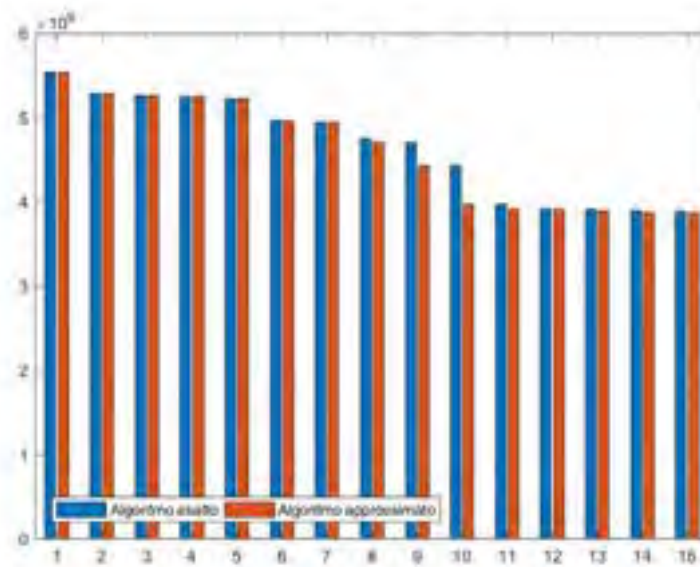


Figura 12: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 4

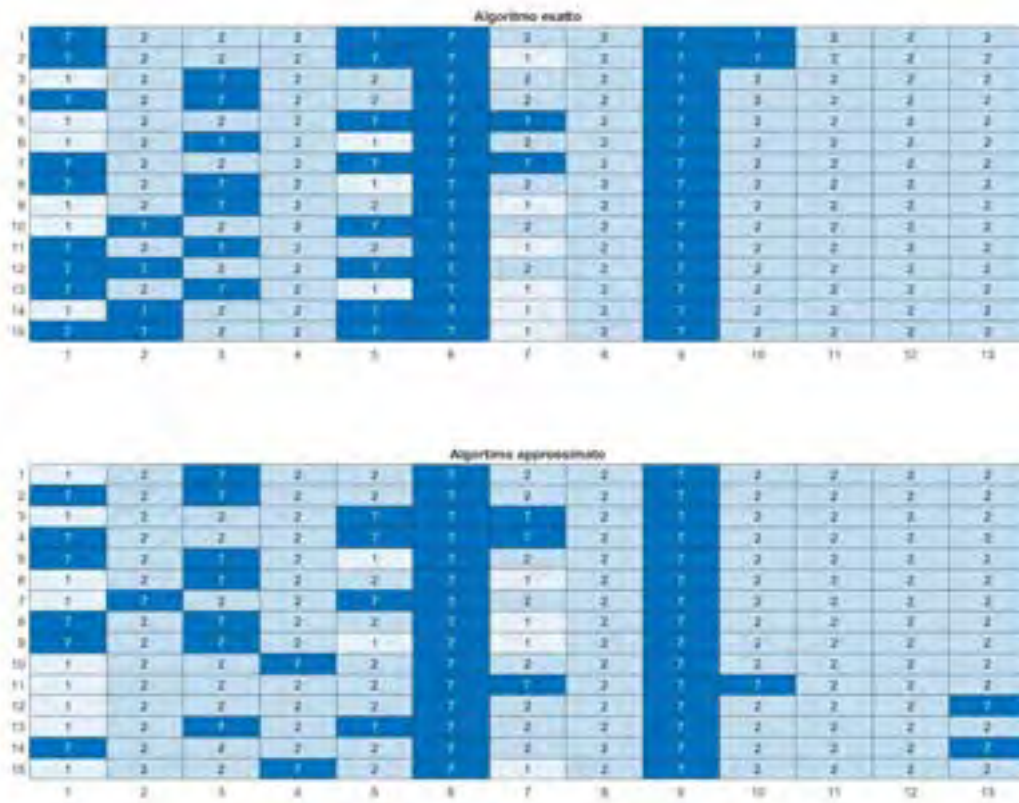


Figura 13: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

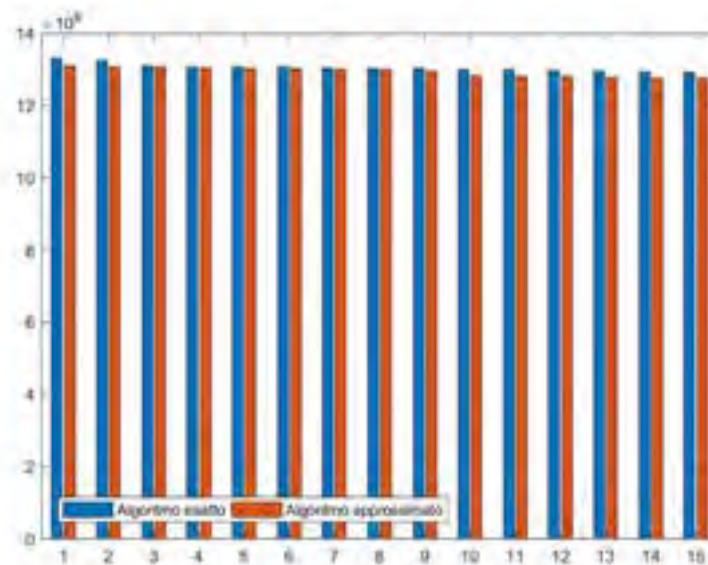


Figura 14: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 5

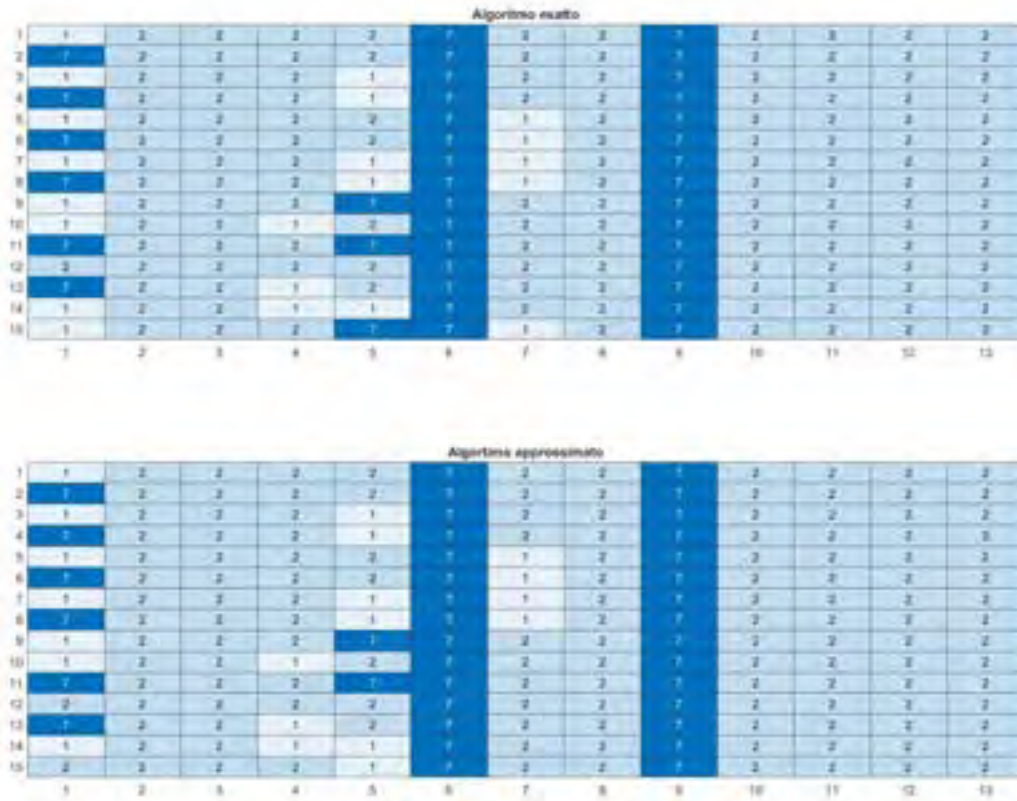


Figura 15: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

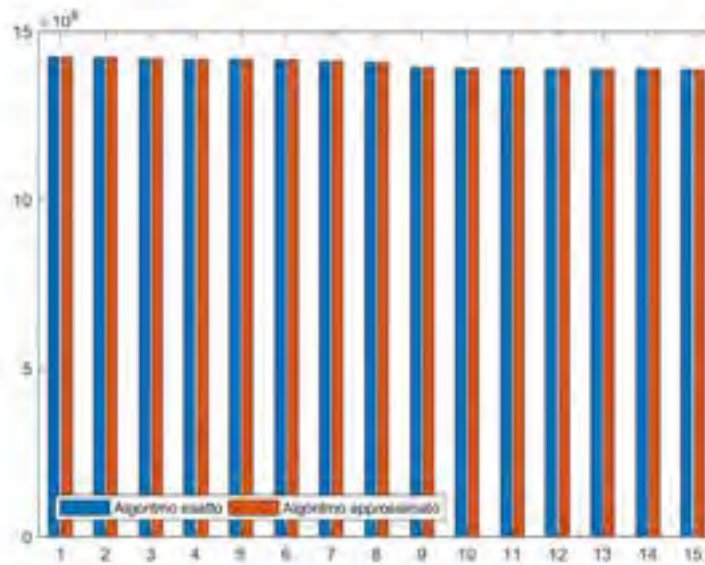


Figura 16: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 8

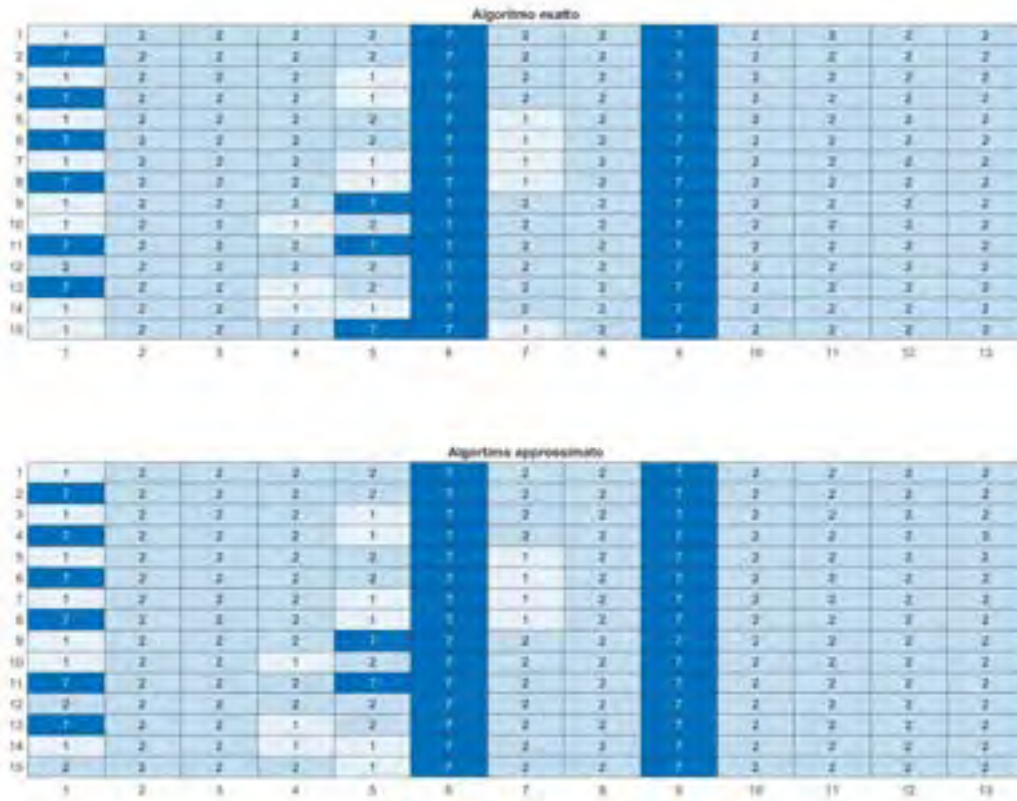


Figura 11: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

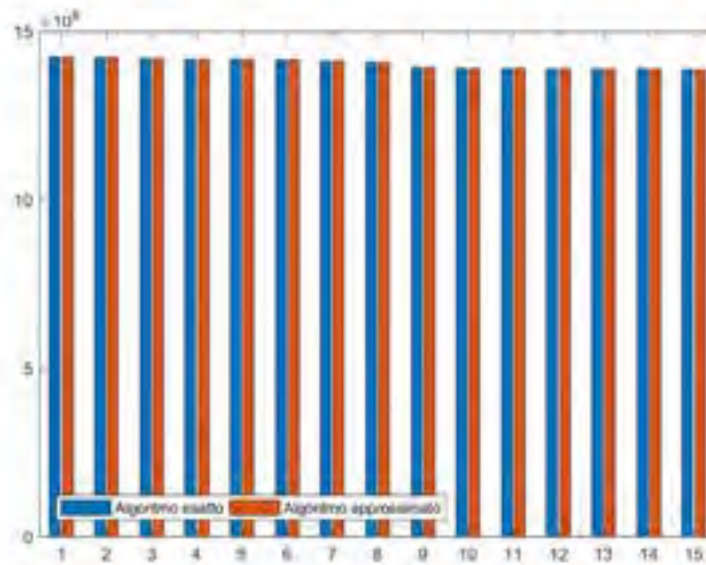


Figura 12: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 9

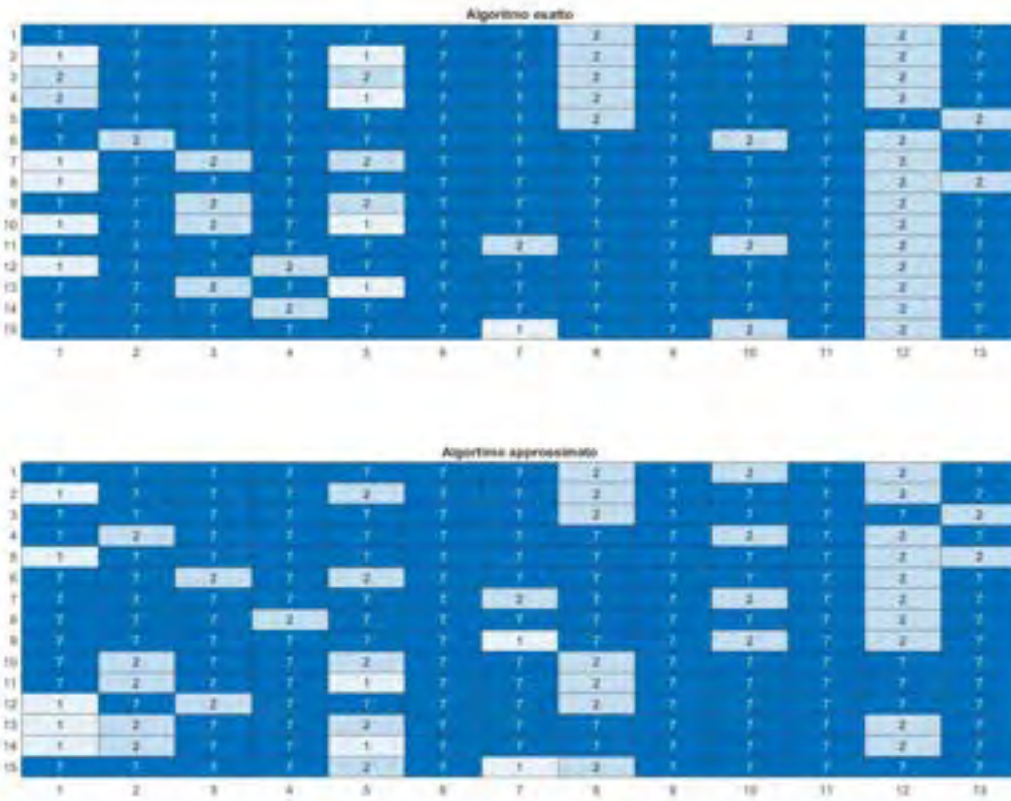


Figura 19: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

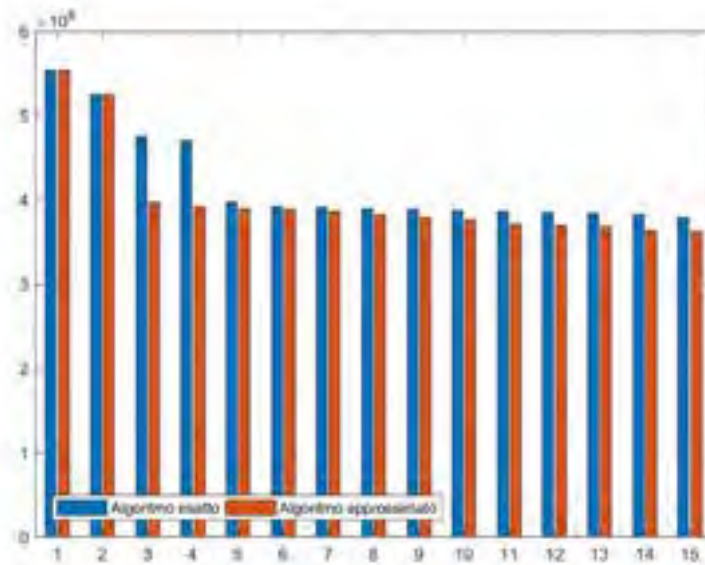


Figura 20: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 10

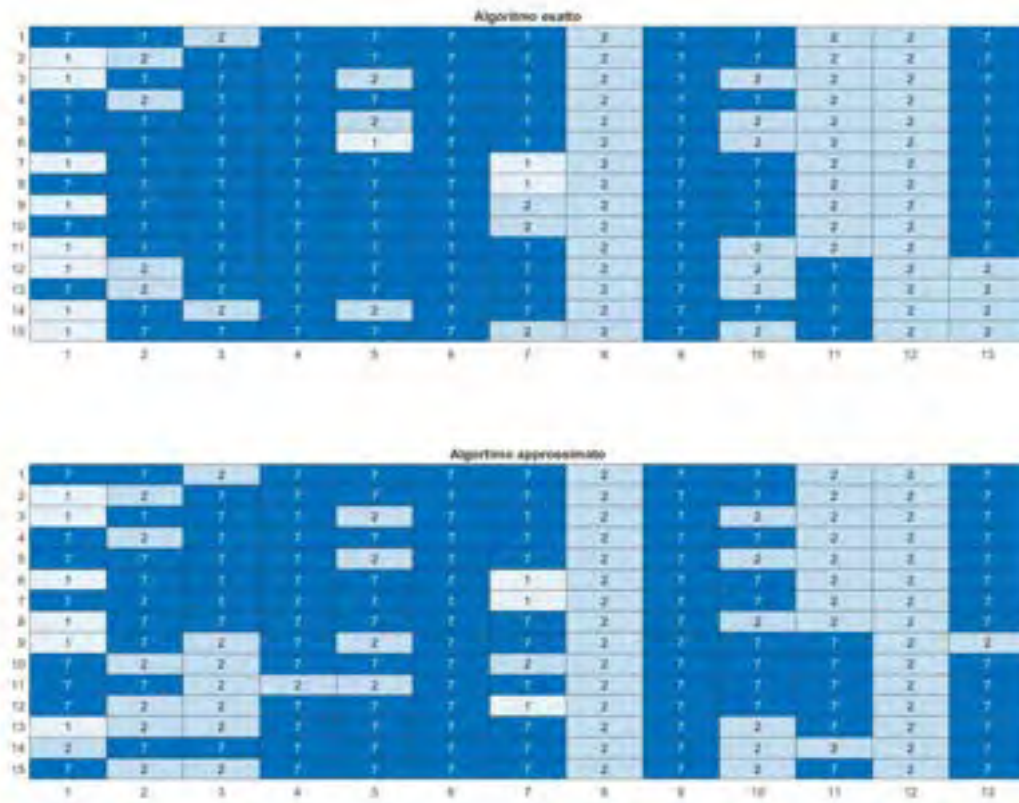


Figura 21: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

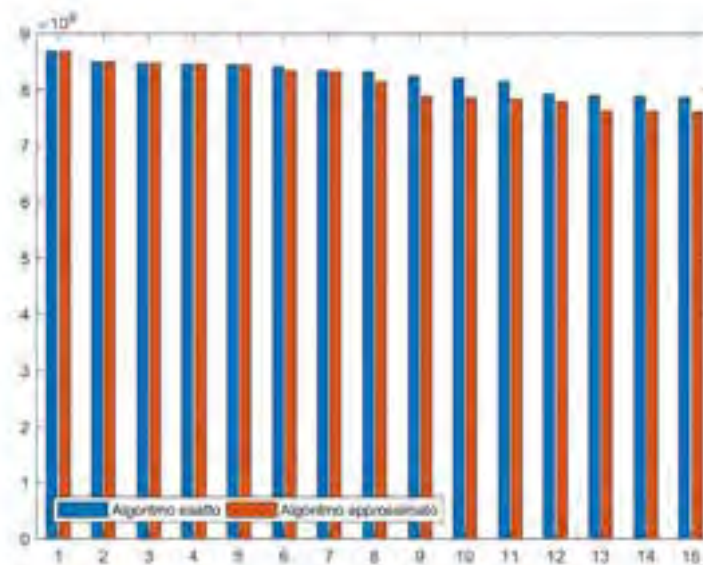


Figura 22: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 13

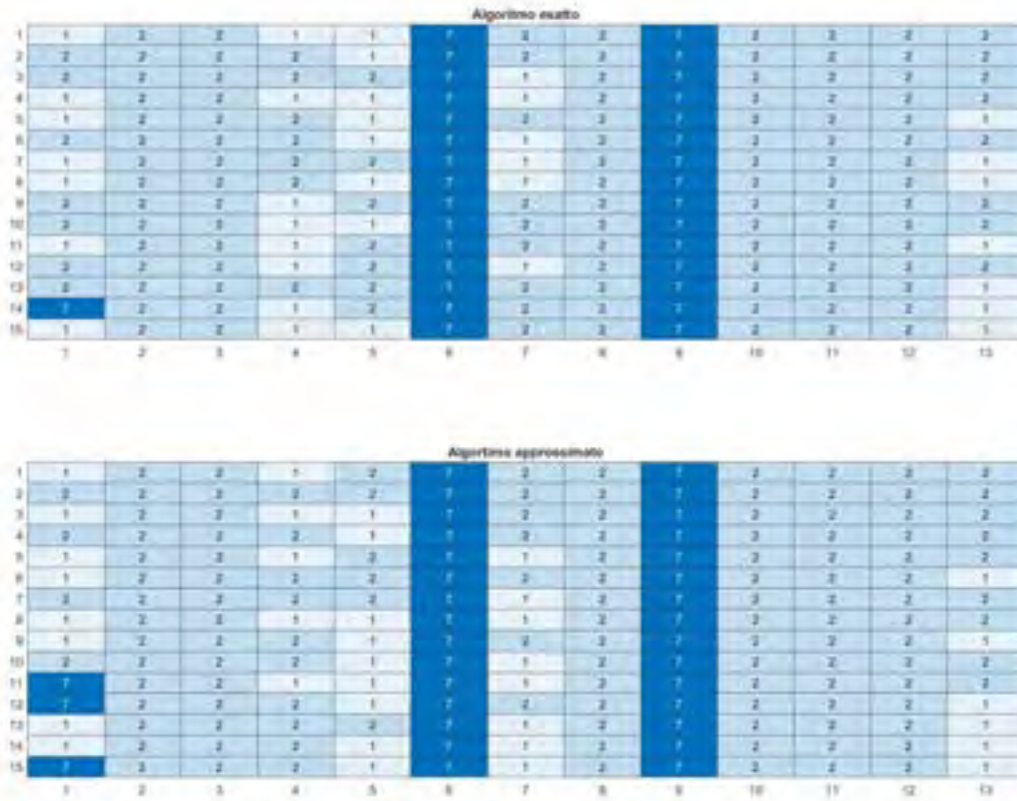


Figura 23: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

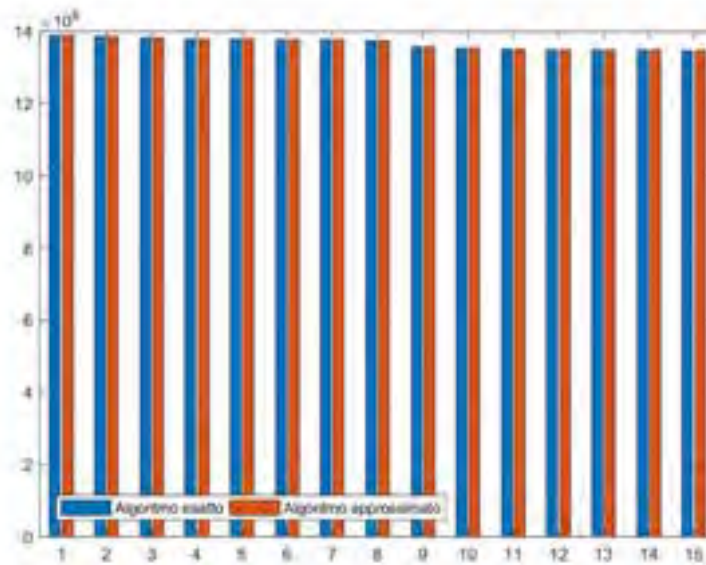


Figura 24: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 17

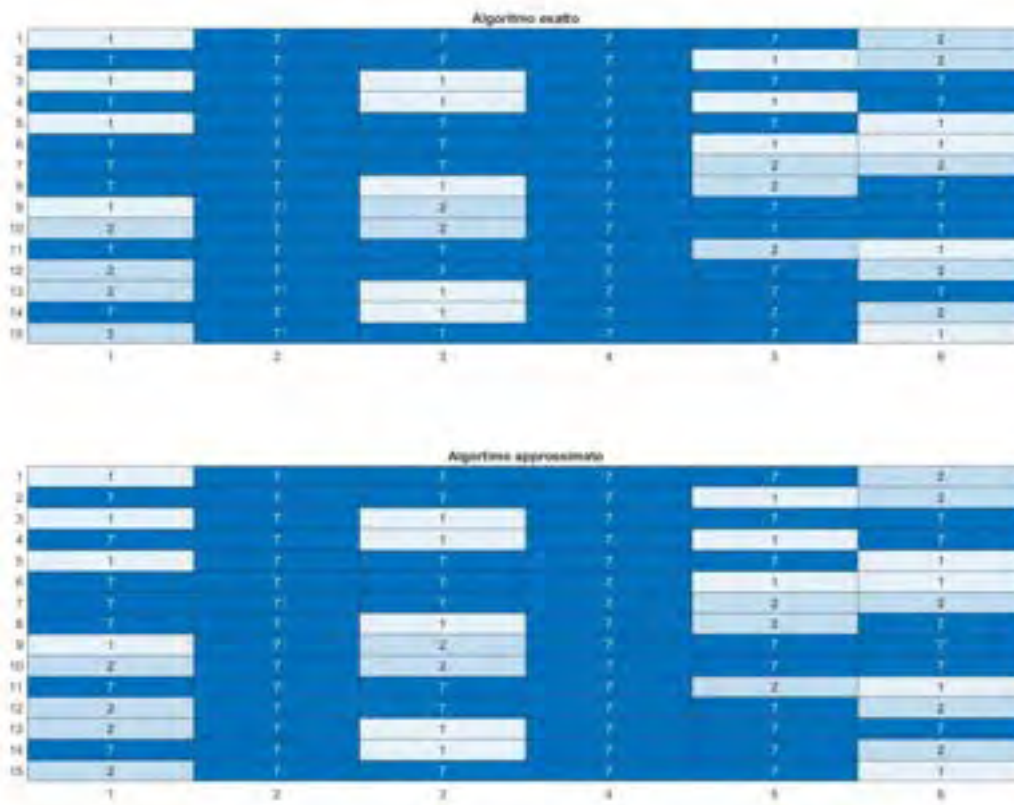


Figura 25: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

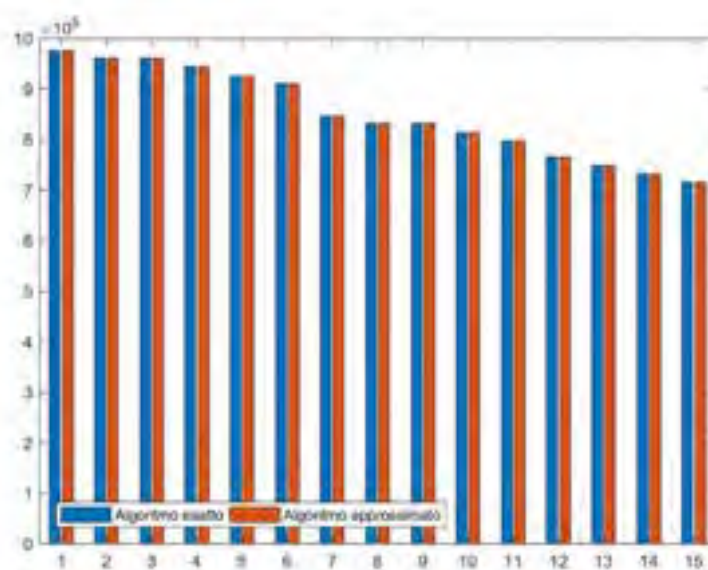


Figura 26: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 18

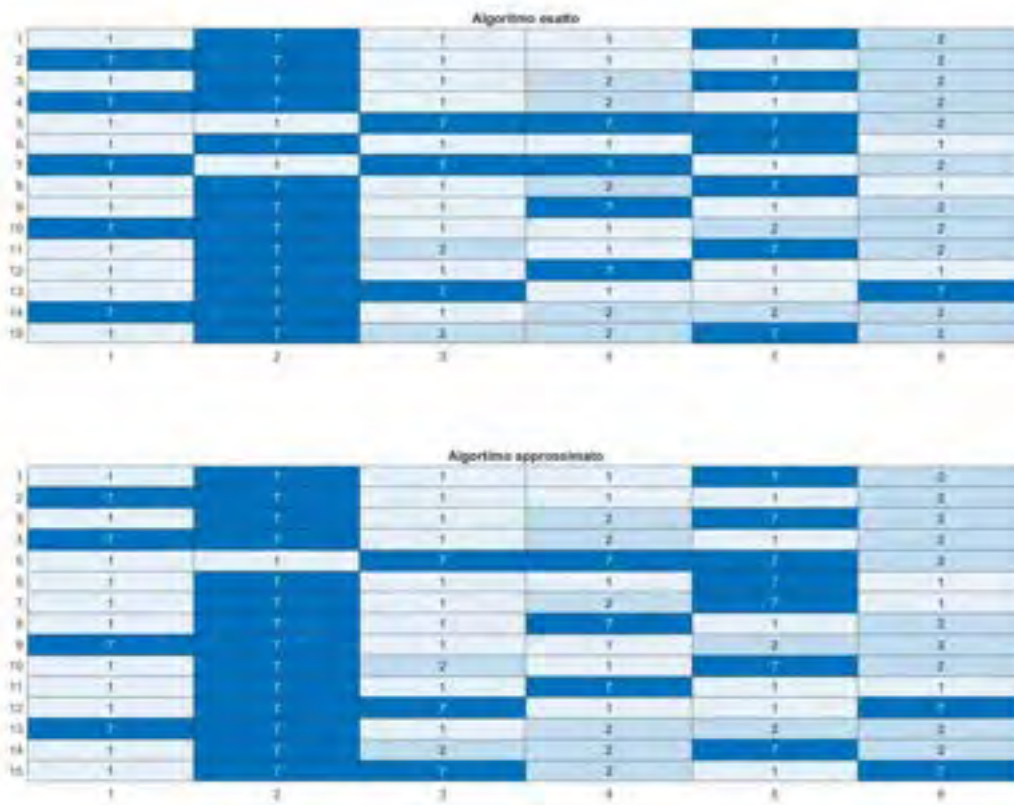


Figura 23: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata – C, 7 – Nessuna tecnologia )

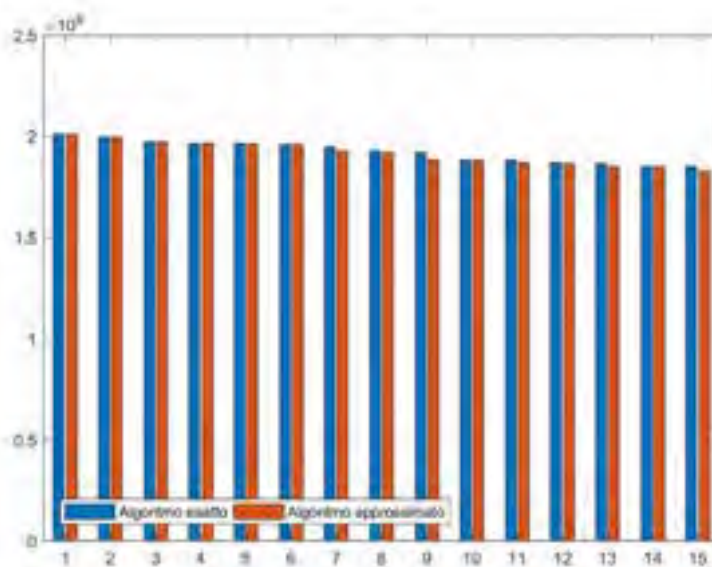


Figura 24: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

Istanza 25

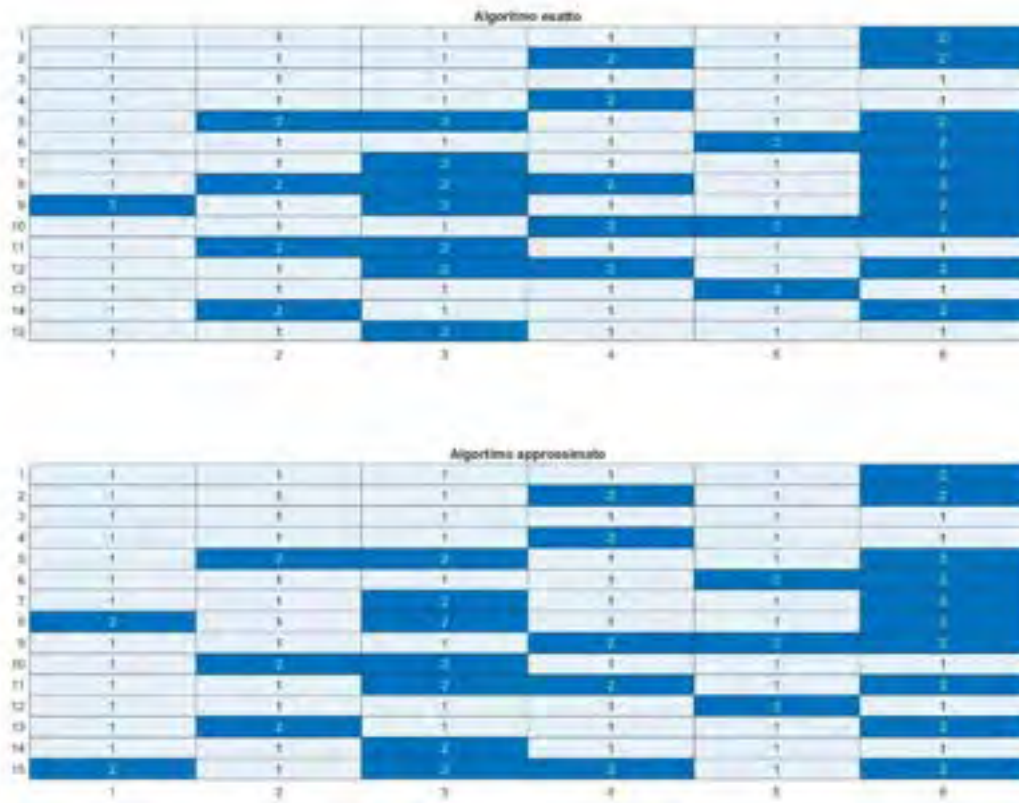


Figura 29: Analisi dell'istanza confrontando le tecnologie delle prime soluzioni trovate (1= Ricarica al deposito - A, 2 = Ricarica al capolinea - B, 3 = Ricarica alla fermata - C, 7 - Nessuna tecnologia )

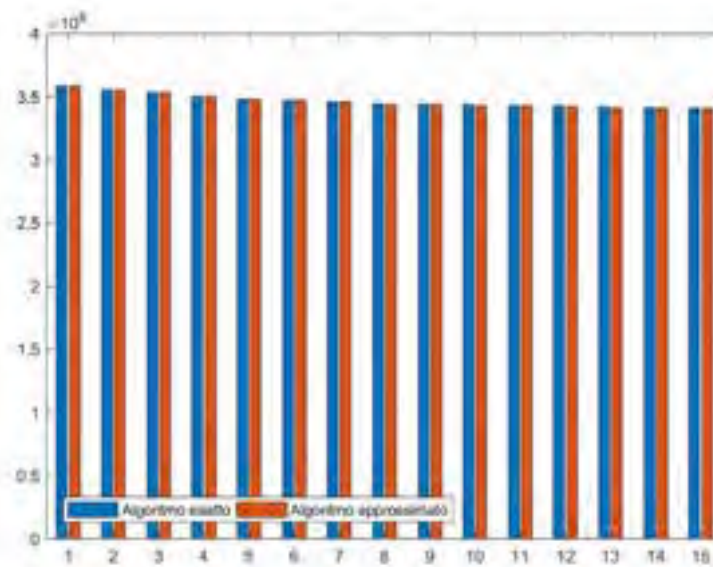


Figura 30: Confronto tra le funzioni obiettivo delle soluzione trovate in ordine di FO decrescente

### 3 Riferimenti bibliografici

1. European Commission, White paper, Roadmap to a Single European transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system, COM(2011) 144 final, Brussels, 28.3.2011.
2. G. Brusaglino, R. Gava, M. Leon, F. Porcel, “TECMEHV–Training & Development of European Competences on Maintenance of Electric and Hybrid Vehicles”, International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium Barcelona, Spain, November 17-20, 2013.
3. A. Heidi, R. Sampsa, O. Juha, T. Anu, A. Toni “Process to support strategic decision-making: Transition to electromobility”, International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium Barcelona, Spain, November 17-20, 2013.
4. T. Coosemans, I. Keseru, C. Macharis, J. Van Mierlo, B. Muller G. Meyer, “Societal Drivers for the Future Transport System in Europe: the Mobility4EU Project”, International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium Montréal, Québec, Canada, June 19-22, 2016.
5. T. Soylu, J.E. Anderson, N. Böttcher, C. Weiß, B. Chlonda, T. Kuhnimhof, “Building Up Demand-Oriented Charging Infrastructure for Electric Vehicles in Germany”, Transportation Research Procedia, 19 ( 2016 ), pp. 187-198, Elsevier.
6. A. Talantsev, “Who gains and who loses in the shift to electric vehicles: impact assessment through multicriteria multi-stakeholder analysis”, Procedia Environmental Sciences, 37 (2017), pp. 257-268, Elsevier.
7. S. Carley, R.M. Krause, B.W. Lane, J.D. Graham, “Intent to purchase a plug-in electric vehicle: A survey of early impressions in large US cities”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 18 (2013), pp. 39-45. Elsevier.
8. H. Gong, M. Wang, and H. Wang, “New energy vehicles in China: policies, demonstration, and progress”, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 18 (2013), pp. 207-228.
9. K. Yabe, Y. Shinoda, T. Seki, H. Tanaka, and A. Akisawa, “Market penetration speed and effects on CO2 reduction of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles in Japan”. Energy Policy, 45 (2012), pp. 529-540.
10. G. Crouch, “Volvo to STOP making petrol and diesel cars from 2019 in favour of electric or hybrid models”, The Sun (6<sup>th</sup> July 2017), Available from: [www.thesun.co.uk/motors/3957485/volvo-announces-it-will-stop-making-petrol-and-diesel-cars/](http://www.thesun.co.uk/motors/3957485/volvo-announces-it-will-stop-making-petrol-and-diesel-cars/)
11. A. Chrisafis and A. Vaughan, “France to ban sales of petrol and diesel cars by 2040”, The Guardian (6<sup>th</sup> July 2017), Available from: [www.theguardian.com/business/2017/jul/06/france-ban-petrol-diesel-cars-2040-emmanuel-macron-volvo](http://www.theguardian.com/business/2017/jul/06/france-ban-petrol-diesel-cars-2040-emmanuel-macron-volvo)
12. J. Staufenberg, “Norway to completely ban petrol powered cars by 2025”, The Independent (4<sup>th</sup> June 2016), Available from: <http://www.independent.co.uk/environment/climate-change/norway-to-ban-the-sale-of-all-fossil-fuel-based-cars-by-2025-and-replace-with-electric-vehicles-a7065616.html>
13. Bloomberg, “Electric Vehicle Outlook 2017”, (2017). Bloomberg Finance L.P.2017.
14. P. Toth, S. Martello, “Algorithms for Knapsack Problems”, In Silvano Martello, Gilbert Laporte, Michel Minoux, Celso Ribeiro (editors), “Surveys in Combinatorial Optimization”, North-Holland Mathematics Studies, North-Holland, Volume 132, (1987), pp. 213-257, ISSN 0304-0208, ISBN 9780444701367.
15. B. Codenotti, G. Manzini, L. Margara, G. Resta, “Perturbation: An efficient technique for the solution of very large instances of the euclidean TSP”, INFORMS Journal on Computing, 8 (1996), pp. 125-133.
16. T. Stützle, “Iterated local search for the quadratic assignment problem”, European Journal of Operational Research, 174 (2006), pp. 1519-1539.
17. Fred Glover, "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", Computers and Operations Research, 13 (1986), pp. 533–549.

## 4 Abbreviazioni ed acronimi

ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
DI-RM3	Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre
PLI	Programmazione Lineare a numeri Interi
ILS	Iterated Local Search
IKP	Integer Knapsack Problem
FO	Funzione Obiettivo
KP	Knapsack Problem
KTS	Nome dell'algoritmo usato
TS	Tabu Search
UB	Upper Bound
LB	Lower Bound

## Appendice 1. Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

### 4.1 Prof. Dario Pacciarelli

Dario Pacciarelli è professore ordinario di *Ricerca Operativa* presso l'Università degli Studi Roma Tre, nella quale è entrato come ricercatore nel 1996. Presso questo ateneo, dal 2010 è responsabile del s.s.d. Mat/09 Ricerca Operativa e dirige il *Laboratorio di Automazione e Organizzazione Industriale*, istituito presso il *Dipartimento di Ingegneria*. Dal 2016 è Coordinatore del Collegio Didattico di Ingegneria Informatica.

#### **Didattica**

Presso l'università Roma Tre è titolare degli insegnamenti *Ricerca Operativa I (Laurea in Ingegneria Informatica)* dal 1999; *Ottimizzazione della Logistica (Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale e dell'Automazione)* dal 2004; *Ricerca Operativa (Laurea Magistrale in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e Trasporti)* dal 2004.

#### **Ricerca**

E' autore o co-autore di oltre cento pubblicazioni, circa metà delle quali su riviste internazionali indicizzate con valutazione. Gli interessi di ricerca riguardano lo sviluppo di soluzioni informatiche per il supporto alle decisioni manageriali, principalmente basati su metodi di ottimizzazione. Ha lavorato alla riconfigurazione di sistemi di produzione, pianificazione della produzione industriale, nuovi modelli per lo scheduling, ottimizzazione e coordinamento dei sistemi di trasporto, supply chain scheduling. I contributi teorici di ricerca vertono sul progetto di modelli e algoritmi per la soluzione di problemi di ottimizzazione combinatoria, e sull'analisi della complessità computazionale di algoritmi e problemi. I settori applicativi riguardano la produzione industriale, la logistica e i trasporti pubblici. In particolare, l'ottimizzazione dei trasporti pubblici è stato il principale dominio applicativo studiato negli ultimi 15 anni. In occasione della procedura di valutazione della qualità della ricerca VQR 2011-2014, il gruppo di Ricerca Operativa coordinato dal Prof. Pacciarelli è risultato primo in graduatoria in Italia nel s.s.d. Mat/09 Ricerca Operativa.

#### **Coordinamento di progetti**

Dal 1999 ad oggi è stato responsabile scientifico per l'Università Roma Tre e/o coordinatore nazionale di progetti di ricerca e/o di trasferimento tecnologico, prevalentemente sui temi dello sviluppo di soluzioni informatiche per l'automazione o per il supporto alle decisioni, finanziati dalla Commissione Europea, dal M.I.U.R., dal Mi.S.E., dal C.N.R. e da grandi gruppi industriali (DaimlerChrysler, Bombardier Transportation, Alstom Ferroviaria).

#### **Comitati scientifici**

E' stato membro di diversi comitati di programma di congressi internazionali ed è membro permanente del board della *International Association of Railway Operations Research* e dell'International Scientific Committee della *Conference on Advanced Systems for Public Transport*. E' membro del Consiglio Direttivo dell'Associazione Italiana di Ricerca Operativa.

### 4.2 Phd. Ing. Andrea Gemma

Conduce attività di ricerca presso l'Università di Roma Tre ed esercita, contemporaneamente, l'attività di Ingegnere Informatico collaborando con diverse società private e pubbliche. Il know-how conseguito durante le esperienze lavorative si è incentrato principalmente nell'ambito dell'ingegneria dei sistemi di trasporto, dell'infomobilità, degli ITS (Intelligent Transport Transportation Systems), dei sistemi GIS, applicazioni sui BIG DATA e dell'algoritmica in generale.

Ha conseguito il dottorato in Ingegneria Informatica e dell'Automazione, nell'ambito della "Ricerca Operativa" applicata ai trasporti presso l'Università di "Roma Tre" sullo sviluppo di algoritmi euristici di ottimizzazione della sincronizzazione semaforica.

### **Attività svolte**

2017 - Assegno di ricerca: Valutazione del livello di servizio del trasporto pubblico per mezzo dell'analisi dei Big-Data provenienti dal tracciamento GPS dei veicoli. (DR 148/2016).

2016 - Assegno di ricerca: Ingegneria dei trasporti per la mobilità sostenibile nel settore dei beni culturali (DR 85/2015).

2013 - Assegno di ricerca: Sviluppo di algoritmi per il tracciamento dei veicoli sonda, per l'analisi delle reti stradali e per la valutazione dei tempi di sosta DR 1708/2013.

2012 - Assegno di ricerca: Modelli per stima delle emissioni inquinanti nelle reti di trasporto congestionate DR 908/2012.

2011 - Assegno di ricerca: Progettazione e sviluppo di algoritmi di simulazione dinamica del traffico. Capacità di ricerca nel settore.

Dal 2007 Ingegnere Libero professionista iscritto all'albo con decine di attività nell'ambito dell'ingegneria informatica applicata agli strumenti ITS, GIS e analisi dati per l'ingegneria del traffico e dei trasporti.

### **Formazione**

2011 – Dottorato di ricerca in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

2006 – Laurea V.O. in Ingegneria Informatica e dell'Automazione con votazione 105/110