



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione dell'elettrificazione di una rete di Trasporto Pubblico Locale, impostazione del problema e caso di test

Maria Pia Valentini, Valentina Conti

OTTIMIZZAZIONE DELL'ELETTRIFICAZIONE DI UNA RETE DI TRASPORTO PUBBLICO LOCALE, IMPOSTAZIONE
DEL PROBLEMA E CASO DI TEST

Maria Pia Valentini, Valentina Conti (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica negli usi finali elettrici e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori elettrici

Progetto: D.7 "Mobilità elettrica sostenibile"

Obiettivo: Scenari mobilità elettrica, sub-obiettivo a.1 Strumenti di supporto TPL

Responsabile del Progetto: ing. Antonino Genovese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 ENUNCIATO E COMPLESSITÀ DEL PROBLEMA DI OTTIMO	6
2.1 INDICAZIONI SULLE DIMENSIONI DELLO SPAZIO DELLE SOLUZIONI	9
3 FORMULAZIONE MATEMATICA DEL PROBLEMA	11
3.1 DEFINIZIONI	11
3.2 FUNZIONE OBIETTIVO	11
3.3 FUNZIONI DI VINCOLO	14
3.4 FUNZIONI DI DIMENSIONAMENTO AL NODO	17
3.5 CONSIDERAZIONI.....	17
4 ESPLORAZIONE DELLO SPAZIO DELLE SOLUZIONI	18
4.1 APPROCCIO GENERALE.....	18
4.2 SEMPLIFICAZIONI DELL'ANALISI.....	20
4.2.1 Utilizzazione del software BEST per l'analisi di linea	22
4.3 PROCEDURA RISOLUTIVA OPERATIVA	23
5 DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI RICARICA.....	25
5.1 DIMENSIONAMENTO DELLA INFRASTRUTTURA DI RICARICA AI DEPOSITI.....	25
5.2 DIMENSIONAMENTO DELLA INFRASTRUTTURA DI RICARICA AI CAPOLINEA.....	26
5.3 DIMENSIONAMENTO DELLA INFRASTRUTTURA DI RICARICA ALLE FERMATE	31
5.4 DATI DI PROGETTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLA RICARICA NEI NODI.....	31
6 FORMULAZIONE APPROSSIMATA	33
6.1 APPROCCIO GENERALE.....	33
6.2 FORMA DEI COEFFICIENTI K.....	34
6.3 STUDIO DEI COEFFICIENTI DI RIDUZIONE DEI COSTI DI NODO CAPOLINEA PER LINEE DI ARCHITETTURA B.....	35
7 CASO DI STUDIO.....	40
7.1 ANALISI DELLA RETE	40
7.2 RISULTATI DELL'ANALISI PER LINEA	41
8 CONCLUSIONI.....	43
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	44

Sommario

L'attività, svolta interamente da personale ENEA, si è concentrata sulla formulazione e l'analisi di un problema di ottimo vincolato da sottoporre alle Università co-beneficiarie di Roma Tre (Dipartimento di Informatica-DI) e di Tor Vergata (Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ingegneria Informatica -DICII) per lo sviluppo contestuale di algoritmi risolutivi di varia concezione.

Il problema riguardava l'individuazione del sottoinsieme di linee di una rete di Trasporto Pubblico Locale su Gomma a cui dare priorità di elettrificazione in presenza di un vincolo di budget e secondo criteri di massima economicità sul ciclo di vita dei fattori di produzione del servizio di trasporto.

Tale problema presenta una notevole complessità dovuta all'elevato numero di combinazioni da dover analizzare anche per reti di medie dimensioni ed in relazione alla possibilità di selezionare più di una soluzione tecnologica per l'elettrificazione di una linea; inoltre il problema non è lineare per la possibilità che si verifichino economie di scala in funzione della sottorete selezionata.

A partire da esempi concreti di reti di TPL su gomma, acquisiti dal Web in modalità open, è stata esaminata la variabilità delle situazioni, specie rispetto all'utilizzo di più percorsi e più nodi capolinea per la stessa linea. Lo stesso è stato fatto in relazione alle possibili soluzioni tecnologiche dei veicoli a batteria e delle relative stazioni di ricarica. A conclusione della suddetta analisi sono stati stabiliti i perimetri del problema da formulare matematicamente.

Il problema è stato quindi classificato in base alla sua complessità e sono stati suggeriti possibili approcci risolutivi attraverso un'opportuna segmentazione in fasi successive, comprendenti l'impiego del modello software già sviluppato da ENEA nello scorso anno di Ricerca per l'analisi tecnico-economica dell'elettrificazione di singole linee, e messo a punto e validato nell'anno in corso.

Sono state altresì suggerite possibili semplificazioni della funzione obiettivo e del funzione di calcolo degli investimenti soggetti a vincolo di budget, accettando adeguate approssimazioni; tali semplificazioni sono state discusse con le Università co-beneficiarie, che le hanno fatte proprie nello sviluppo degli algoritmi risolutivi del problema.

Infine è stato predisposto un caso di studio per il testing degli algoritmi; la scelta, concordata con le Università co-beneficiarie, è caduta sulla rete di Firenze.

Per il presente anno di attività, al fine di testare i tempi di calcolo su un sottoproblema meno complesso, le semplificazioni sono state definite specificatamente per un'analisi che escludesse la possibilità di elettrificazione con ricarica flash alle fermate (Architettura C), la quale comporta un livello di scelta ulteriore (localizzazione delle ricariche lungo linea) rispetto alla soluzione con ricarica ai soli capolinea. Nel successivo anno di ricerca si prevede quindi di esaminare il problema nella sua completezza, valutando anche l'opportunità di rimuovere le approssimazioni di calcolo, almeno per istanze di piccole dimensioni.

1 Introduzione

L'attività descritta nel presente Report, a carico di ENEA, si inquadra all'interno dell'obiettivo di definire ed informatizzare modelli in grado di affrontare il tema dell'ottimizzazione del sistema di ricarica rapida e ultrarapida all'interno di una rete di Trasporto Pubblico Locale, tenendo conto di possibili economie di scala che si possono verificare negli investimenti per le installazioni di ricarica grazie all'incidenza di più linee nei nodi. Tale eventualità, tutt'altro che remota, è potenzialmente in grado di sovvertire i risultati dell'analisi effettuata per singole linee, - affrontata nello scorso anno di ricerca ed approfondita in quello attuale (vedi Report RdS/PAR2016/226)- nel definire la convenienza di certe soluzioni di elettrificazione del servizio di Trasporto Pubblico Locale rispetto alle alimentazioni convenzionali e rispetto ad altre possibili soluzioni di elettrificazione, con particolare riferimento alla ricarica notturna al deposito.

Il tema è stato affrontato in termini più operativi possibile, per come verosimilmente si può porre agli Operatori del settore del TPL che intendessero affrontare un processo di elettrificazione del loro sistema. In quest'ottica è stato espresso il problema di stabilire le priorità di investimento per elettrificazione all'interno di risorse economiche limitate, temporalmente e come consistenza.

La soluzione di tale problema comporta la necessità di affrontare il sistema delle linee di trasporto nella sua globalità, aumentando in misura esponenziale la complessità dell'algoritmo di verifica ed i tempi di elaborazione rispetto all'analisi per singola linea.

L'attività di ENEA si è concentrata su:

- la definizione precisa del problema;
- l'analisi della sua complessità;
- la sua formulazione matematica;
- il possibile approccio per conseguire la soluzione in tempi di calcolo ragionevoli anche per casi di una certa dimensione.

Inoltre è stato selezionato un caso di test significativo, da fornire alle due Università chiamate a collaborare alla ricerca, RomaTre con il Dipartimento di Informatica e Tor Vergata con il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ingegneria Informatica.

Alle due Università è stato affidato il compito di sviluppare algoritmi risolutivi di ben distinte caratteristiche: euristico nel caso di RomaTre, utilizzando strumenti di calcolo ordinari e per tempi di risoluzione contenuti; rigoroso nel caso di TorVergata, utilizzando strumenti di calcolo di elevatissima potenzialità e limiti di tempo molto meno stringenti. Lo sviluppo parallelo di due metodologie di soluzione del medesimo problema garantisce la validazione di entrambe.

I risultati dell'attività delle due Università costituiscono complemento essenziale dell'attività ENEA descritta nel presente Report.

2 Enunciato e complessità del problema di ottimo

Enunciato: Per una certa rete di trasporto pubblico urbano, dato un budget di spesa destinato al rinnovo della flotta in elettrico e all'installazione dei relativi sistemi di approvvigionamento energetico, disponibile all'anno zero, stabilire quale sia l'insieme di linee a cui dare priorità di investimento. L'obiettivo che si intende perseguire è la massimizzazione del risparmio monetario, in termini di Valore Attuale Netto (VAN), nell'arco di un prefissato periodo di tempo a partire dall'anno zero (sino ad un massimo di 15 anni), sui costi di investimento e di esercizio che si dovrebbero sostenere se il rinnovo della flotta, anziché mediante veicoli elettrici, fosse effettuato con veicoli di tipo convenzionale (diesel). Si assume che tutte le linee si trovino nella stessa condizione di obsolescenza della flotta, tale da richiedere il rinnovo in ogni caso.

Il problema, nella versione affrontata nel seguito, si configura come problema di ottimo plurivincolato di classe NP-hard come riduzione del problema dello zaino (Knapsack Problem).

Definizioni e specificazioni

Sia R la rete di trasporto pubblico su gomma in esame, costituita da un insieme di linee adibite al servizio programmato di trasporto passeggeri mediante autobus e di nodi adibiti al ricovero notturno dei mezzi (depositi), all'attestamento dei veicoli a fine corsa (capolinea) ed alla salita e discesa dei passeggeri (fermate intermedie).

Una linea di trasporto passeggeri è un'entità che si caratterizza in base al tipo di veicolo utilizzato per il trasporto (può aversi anche un mix di tipologie veicolari, variabili in relazione a dimensioni/capacità di trasporto ed alle caratteristiche del sistema di trazione/alimentazione) ed ai luoghi ed agli orari in cui permette la salita e la discesa dei passeggeri (programma di servizio). Il programma di servizio di una linea è generalmente definito in un arco di 24 ore e può essere variabile in relazione al periodo dell'anno (stagionale e settimanale); esso è composto dall'insieme delle corse previste nelle 24 ore esaminate.

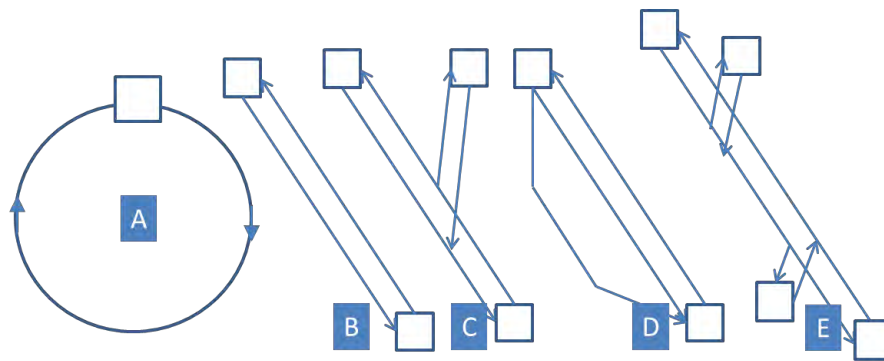
Chiamiamo corsa il servizio effettuato da un veicolo fra un capolinea iniziale ed un capolinea finale, eventualmente coincidente con quello iniziale (corsa circolare), lungo un predefinito percorso lungo il quale sono previste fermate per la salita/discesa dei passeggeri. La corsa è una grandezza che possiede:

- una dimensione spaziale (percorso e localizzazione dei nodi capolinea e fermata)
- una dimensione temporale, data dagli orari di partenza ed arrivo nei nodi del servizio (capolinea e fermate intermedie)

Chiamiamo percorso l'instradamento da inizio a fine corsa del veicolo in servizio su una linea; ai fini della presente analisi, un percorso è definito dalla sequenza dei nodi capolinea e fermata, ordinata in funzione del tempo orologio di partenza/arrivo del veicolo secondo il programma di servizio per una qualsiasi corsa lungo il percorso stesso. Il percorso è di fatto la "dimensione spaziale" di una corsa.

Ad ogni percorso sono associate una o più corse aventi andamento orario differente ma stesso andamento spaziale. All'interno di una certa fascia oraria, il numero di corse effettuate lungo un percorso determina la frequenza media del servizio associata al percorso in quella fascia oraria. Tipicamente una giornata è suddivisa in fasce orarie della durata di 60' a partire dallo scoccare delle ore orologio.

Per ogni linea possono darsi uno o più percorsi. Una linea con un solo percorso è di tipo circolare e prevede un solo capolinea. Una linea con due percorsi fra due capolinea, uno in andata ed uno in ritorno, è la condizione più usuale ma possono aversi anche casi in cui una linea preveda più di un percorso per direzione ed, eventualmente, più capolinea. La figura seguente riassume alcuni casi possibili; la variabilità è più ampia rispetto a quella esposta e se ne discuterà quando sarà presentato il caso di studio (vedi Cap. 7).



LEGENDA

A circolare **B** «normale» **C** a Y **D** con deviazioni **E** a X

Figura 1: variabilità dei percorsi di una linea, casistica non esaustiva

Si assume che i veicoli in esercizio su una certa linea facciano capo tutti al medesimo deposito, indipendentemente dal percorso effettuato e, quindi, dal capolinea della prima corsa della giornata e da quello dell'ultima corsa.

Le linee si classificano in diurne e notturne in funzione dell'arco temporale intragiornaliero in cui si svolge il loro programma di esercizio (effettuazione delle corse). Chiamiamo diurne le linee che effettuano corse nelle ore mattutine, pomeridiane e serali, generalmente fra le 5/6 a.m. e le 12 p.m.. Chiamiamo notturne le altre linee.

Chiamiamo sottorete S ogni possibile sottoinsieme di linee appartenenti ad R ; per quanto appena definito, una sottorete S possiede una dimensione spaziale (insieme dei percorsi delle linee $\in S$) e una dimensione temporale (programma delle corse lungo i percorsi). La dimensione temporale fa sì che S per cogliere le caratteristiche di S si debba specificare il periodo che si vuole considerare per S .

Per la presente analisi si è scelto di analizzare il programma di servizio del giorno feriale invernale delle linee diurne.

Chiamiamo Architettura di ricarica α di una generica linea l la modalità di ricarica prescelta fra le seguenti tre opzioni, mutuamente escludentesi:

- Architettura A: solo ricarica notturna al deposito con modalità lenta;
- Architettura B: ricarica veloce al capolinea e ricarica notturna al deposito;
- Architettura C: ricarica ultrarapida alle fermate, veloce al capolinea, lenta al deposito.

Per ciascuno schema di rifornimento energetico è univocamente stabilita la tipologia di accumulo di bordo ritenuta più idonea; specificatamente per la ricarica lenta al deposito e per quella rapida al capolinea la scelta è caduta sulle batterie agli ioni di litio mentre la ricarica ultrarapida è stata associata ad un accumulo a supercondensatori, affiancato da un accumulo di supporto agli ioni di litio che garantisce i trasferimenti a/da deposito (generalmente più onerosi dei percorsi fra due ricariche consecutive in corrispondenza delle fermate) ed assicura l'operatività della linea anche in caso di defaillance di qualche impianto di ricarica.

Con S^* indichiamo la sottorete S in cui per ciascuna linea sia indicata l'Architettura di ricarica selezionata per l'elettrificazione.

Chiamiamo Layout di Ricarica (LR) l'insieme dei nodi (depositi, capolinea e fermate) nei quali si prevedono installazioni di ricarica; LR* indica invece una configurazione degli impianti di ricarica relativa a LR, ovvero la specificazione del numero e delle caratteristiche delle stazioni di ricarica installate in ciascun nodo di LR.

La generica soluzione del problema precedentemente enunciato è data dalla coppia (S^* , LR*), la cui selezione comporta tre livelli di scelta:

- la sottorete S
- l'architettura di ricarica per ogni linea di S
- la selezione dei nodi fermata dove installare la ricarica per le linee di architettura C

Si assume invece che tutti i nodi capolinea di attestamento di linee di architettura B e C siano attrezzati per la ricarica rapida durante le soste fra una corsa e l'altra.

A valle di tali scelte bisogna operare il dimensionamento delle stazioni di ricarica in termini di numerosità e potenza, utilizzando criteri di necessità e sufficienza.

Gli impianti di ricarica di tipo "opportunity"¹ possono essere fruiti indifferentemente dai veicoli di tutte le linee transitanti nei nodi stessi. E' atteso che la condivisione degli impianti per la ricarica di tipo "opportunity" produca economie di scala nei costi di investimento e operativi relativi ai nodi capolinea e di fermata intermedia, quando la coppia (S^* , LR*) sia opportunamente configurata.

I valori di costo da considerare per il calcolo della funzione obiettivo della generica soluzione (S^* ,LR*) riguardano l'acquisto e l'esercizio della flotta necessaria e sufficiente per S^* , l'acquisto e l'esercizio delle stazioni di ricarica LR*.

Poiché l'obiettivo è posto in termini di massimizzazione del risparmio rispetto alla soluzione convenzionale diesel, come peraltro già fatto nel caso dell'analisi per singola linea affrontata nel precedente anno di ricerca, sono prese in esame solo le voci di costo che comportano una differenza nei due casi e cioè:

- investimenti iniziali per l'acquisto di veicoli e l'acquisto e l'installazione degli impianti di ricarica;
- investimenti intermedi per la sostituzione dell'accumulo a bordo dei veicoli elettrici o dei veicoli nella loro interezza e degli impianti di ricarica;
- costi energetici per la realizzazione del servizio;
- costi di manutenzione ordinaria e straordinaria dei veicoli e delle infrastrutture di ricarica;
- valori residui dei fattori di produzione del servizio in corrispondenza della loro sostituzione a fine vita tecnica e/o a conclusione del periodo di analisi.

Gli investimenti iniziali per l'acquisto dei veicoli e delle infrastrutture di ricarica sono vincolati ad attestarsi nell'intorno di un determinato valore di input (budget disponibile), con un margine di tolleranza fissato a piacere

Oltre al vincolo sul budget, una generica soluzione (S^* , LR*) deve rispettare altri criteri, di seguito descritti.

Congruenza fra S^* e LR:

- tutti i nodi di LR devono giacere su S

¹ Si definisce "opportunity charge" la ricarica operata durante il periodo di servizio del mezzo, durante le soste al capolinea fra una corsa e l'altra o durante le fermate per la salita e la discesa dei passeggeri. La ricarica effettuata durante il ricovero notturno al deposito viene detta invece "overnight charge".

- il sistema dei nodi di ricarica LR deve contenere:
 - tutti i depositi di afferenza di tutte le linee $l \in S$, indipendentemente dal tipo di architettura di ricarica prevista per ciascuna linea;
 - tutti i capolinea di tutte le linee di architettura B o C²
 - alcune fermate di ciascuna linea di architettura C
- viceversa:
 - se un deposito $d \in LR$, su di esso deve convergere almeno una linea $l \in S$
 - se un capolinea $c \in LR$, su di esso deve convergere almeno una linea $l \in S$ di architettura B o C
 - se una fermata $f \in LR$, su di essa deve insistere almeno una linea $l \in S$ di architettura C

Vincoli infrastrutturali:

Non tutti i nodi sono adatti ad accogliere impianti di ricarica (attributo booleano Y/N) e per ciascun nodo in cui ciò possa avvenire sussiste un vincolo di capacità sul numero degli impianti installabili per limitatezza degli spazi (attributo espresso con un numero intero) e sulla potenza impegnabile per limitatezza della rete di distribuzione dell'energia elettrica (attributo espresso con un numero reale).

Fattibilità delle architetture di ricarica per le singole linee

Non tutte le architetture di ricarica sono adatte alle caratteristiche di una generica linea l della sottorete S ; in particolare i consumi energetici devono essere compatibile con i limiti massimi di autonomia dei veicoli e di potenzialità di ricarica (potenza massima delle stazioni e tempi di ricarica) stabiliti per ogni architettura (A, B, C).

2.1 Indicazioni sulle dimensioni dello spazio delle soluzioni

N. di sottoreti :

Se L è il numero di linee della rete completa R , il numero di possibili sottoreti sarà dato da tutte le possibili combinazioni di L elementi k a k , dove k varia da 1 a L :

$$\sum_{k=1}^L \binom{L}{k} = 2^L - 1$$

Per esempio:

per $L=100$ il numero di sottoreti sarà 1,27 E30;

per $L=600$ sarà 2,07 E180

A titolo indicativo, la rete di Roma è composta di circa 300 linee

N. di configurazioni S^* di una sottorete S

Immaginando che per tutte le linee l di S siano fattibili tutte e tre le possibili architetture di ricarica A, B e C il numero di possibili configurazioni S^* sarà pari a 3^{L_s} dove L_s rappresenta il numero di linee di S .

Quindi il numero di configurazioni possibili di tutte le possibili sottoreti di R è dato da:

$$\sum_{k=1}^L \binom{L}{k} * 3^k$$

² Per assunzione di progetto, tutti i capolinea delle linee di architettura B o C sono attrezzati per la ricarica

Già solo per L=100, questo dà luogo a un numero di casi dell'ordine di E60.

N. di Layout di ricarica di una sottorete S*

Se N è il numero di nodi della sottorete, il numero limite teorico delle possibili localizzazioni di ricarica LR è dato da

$$\sum_{k=1}^N \binom{N}{k} = 2^N - 1$$

Ad esempio, per una sottorete di 50 linee un numero credibile di nodi è 1.000 (20 fermate circa per linea, fra andata e ritorno), per cui il numero teorico di LR è dato da 5,36 E300.

In realtà in questo caso il valore di k assume un valore minimo generalmente maggiore di 1 che possiamo porre come una percentuale significativa di N, a sua volta legato a L attraverso una legge di proporzionalità. Inoltre le configurazioni di ricarica LR sono vincolate a criteri di congruenza con S*, per cui il numero effettivo di possibili configurazioni LR per una sottorete S* è molto inferiore al limite massimo precedentemente calcolato.

Per ogni nodo di LR, sono poi teoricamente possibili infinite configurazioni impiantistiche, in termini di numero e caratteristiche degli impianti, in grado di soddisfare le esigenze di ricarica nel nodo. Si vedrà successivamente come ridurre questo grado di libertà attraverso la standardizzazione delle soluzioni ingegneristiche possibili nei diversi casi.

3 Formulazione matematica del problema

3.1 Definizioni

Grandezze di rete e relativi insiemi

R : rete

S : sottoinsieme di linee di R (sottorete)

S^* : sottoinsieme di linee di R , ciascuna caratterizzata da un'architettura di ricarica fattibile

l : linea

n : nodo

p : percorso

t : corsa (trip)

d : deposito

k : capolinea

f : fermata

a : architettura di ricarica, con $a \in \{A, B, C\}$

v : veicolo

L : insieme delle linee della rete R

N : insieme dei nodi di R

D : insieme dei depositi di R

K : insieme dei capolinea di R

F : insieme delle fermate di R

P : insieme dei percorsi di R

P_l : insieme dei percorsi della linea l

L_d : insieme delle linee incidenti nel deposito $d \in D$

P_k : insieme dei percorsi incidenti nel capolinea $k \in K$

P_f : insieme dei percorsi incidenti nella fermata $f \in F$

C_p : insieme dei capolinea per il percorso $p \in P$

F_p : insieme delle fermate per il percorso $p \in P$

T_p : insieme delle corse del percorso p

V_{la} : flotta di veicoli della linea $l \in L$ per l'architettura $a \in \{A, B, C\}$

Notazione utilizzata: V_{ij}^A = Variabile o grandezza V dipendente da i e j con attributo A

3.2 Funzione obiettivo

Obiettivo della ricerca è trovare quella soluzione (S^*, LR^*) per la quale sia massimo il risparmio complessivo attualizzato dell'elettrificazione rispetto al tradizionale.

La funzione obiettivo può quindi essere scritta come somma dei risparmi sui costi di investimento e sui costi operativi delle linee elettrificate rispetto a quelli che si avrebbero in caso di non elettrificazione.

In pratica la funzione obiettivo è una somma di differenze di diverse voci di costo attualizzato come di seguito espresso, con le notazioni indicate in precedenza.

$$\max \left[\sum_{a \in \{A, B, C\}} \sum_{l \in L_S} \left((I_l^T + C_l^T) - (I_{la}^E + C_{la}^E) \right) \cdot X_{la} - \sum_{d \in D} (I_d^E + C_d^E) \cdot X_d - \sum_{k \in K} (I_k^E + C_k^E) \cdot X_k - \sum_{f \in F} (I_f^E + C_f^E) \cdot X_f \right]$$

dove:

X_{la} : 1 se elettrifico la linea $l \in L$ con l'architettura $a \in \{A, B, C\}$

X_d : 1 se elettrifico il deposito $d \in D$

X_k : 1 se elettrifico il capolinea $k \in K$

X_f : 1 se elettrifico la fermata $f \in F$

rappresentano le variabili decisionali del problema mentre

I_l^T : investimento iniziale per la linea $l \in L$ in assenza di elettrificazione (acquisto veicoli Tradizionali diesel)

I_{la}^E : investimento iniziale per l'elettrificazione della linea $l \in L$ con l'architettura $a \in \{A, B, C\}$ (acquisto veicoli elettrici)

C_l^T : costo operativo della linea $l \in L$ in assenza di elettrificazione (Tradizionale)

C_{la}^E : costo operativo della linea $l \in L$ per l'architettura $a \in \{A, B, C\}$ in caso di elettrificazione

I_d^E : investimento iniziale per l'elettrificazione del deposito $d \in D$

C_d^E : costo operativo del deposito $d \in D$ in caso di elettrificazione

I_k^E : investimento iniziale per l'elettrificazione del capolinea $k \in K$

C_k^E : costo operativo del capolinea $k \in K$ in caso di elettrificazione

I_f^E : investimento iniziale per l'elettrificazione della fermata $f \in F$

C_f^E : costo operativo della fermata $f \in F$ in caso di elettrificazione

rappresentano le grandezze di costo aggregate.

Il primo termine dell'espressione in parentesi quadra contiene la differenza dei costi dovuti all'acquisto ed esercizio dei veicoli, che per l'alternativa elettrica dipendono dall'architettura di ricarica prescelta; non così per la soluzione tradizionale T. Denominiamo l'insieme dei costi relativi all'acquisto ed all'esercizio dei veicoli "costi di linea".

Gli ultimi tre termini rappresentano invece i "costi di nodo", ovvero i costi legati ad acquisto, installazione e manutenzione delle stazioni di ricarica, caratteristici della soluzione elettrica; mancano i termini relativi all'alternativa tradizionale T in quanto per essa i costi di ricarica sono nulli.

Si osservi che per convenzione specifica, nei costi di esercizio sono inclusi anche gli investimenti intermedi per ricambio flotta e accumulo di bordo.

Entriamo nel merito del calcolo delle diverse grandezze di costo, facendo riferimento anche a quanto analizzato nel precedente anno di ricerca per l'analisi delle singole linee.

Gli investimenti iniziali per le soluzioni tradizionali I_l^T sono dati da:

$$I_l^T = V_l^T * I_v^T$$

dove

V_l^T : numerosità della flotta della linea l non elettrificata

[n. veicoli]

I_v^T : investimento per l'acquisto di un veicolo di tipo tradizionale [€/veicolo]

Il valore di V_l^T è da determinarsi sulla base del programma di esercizio della linea, come descritto nel report del precedente anno di ricerca.

Nel caso di linea elettrificata, l'espressione per il calcolo degli investimenti per l'acquisto dei veicoli assume una forma del tutto analoga, con le dovute notazioni. In questo caso il valore del numero di veicoli V_{la}^E risente del tipo di architettura di ricarica a.

Per gli investimenti iniziali, previsti all'anno 0 dell'analisi, non è necessario applicare alcun coefficiente di attualizzazione.

I costi operativi annuali per le soluzioni tradizionali $C(y)_l^T$ sono dati da:

$$C(y)_l^T = E_l^T * CE^T + KM_l * C_v^T + B(y)_v^T (V_l^T * IN_v^T)$$

dove:

E_l^T : consumo annuale di gasolio della linea l

[l]

CE^T : costo unitario del gasolio

[€/l]

KM_l : percorrenza annuale sulla linea l

[km]

C_v^T : costo unitario di manutenzione per veicoli di tipo tradizionale

[€/km]

$B(y)_v^T$: variabile booleana che indica se nello specifico anno y sia prevista la sostituzione della flotta

IN_v^T : investimento netto per la sostituzione di un veicolo tradizionale, scontato l'eventuale valore residuo a fine vita tecnica del veicolo sostituito.

All'ultimo anno di analisi, dai costi operativi suddetti si sottraggono eventuali valori della quota di vita tecnica non utilizzata dai veicoli.

Tutte le variabili della precedente espressione presuppongono delle precedenti elaborazioni, spesse volte non banali, a partire dai dati di input di base; come nel caso del valore da attribuire a $B(y)_v^T$, funzione della vita utile dei veicoli e della loro utilizzazione media annua.

Nel caso di linea elettrificata, oltre ai costi per il consumo energetico, la manutenzione e l'eventuale sostituzione dei veicoli, nei costi operativi bisogna considerare anche l'eventuale sostituzione dell'accumulo di bordo. L'espressione completa dei costi operativi annuali di una linea assume la forma:

$$C(y)_{la}^E = E_{la}^E * CE^E + KM_l * C_v^E + B(y)_v^E (V_{la}^E * I_{va}^E) + B(y)_b^E (V_{la}^E * I_{ba}^E)$$

dove con il pedice b si è voluto indicare la grandezza "accumulo di bordo" (batteria).

Il costo operativo complessivo della sottorete a fine periodo di analisi sarà dato dalla somma dei valori di costo annuale delle varie linee della sottorete attualizzati all'anno zero secondo il tasso di sconto fissato i, utilizzando la seguente formula di attualizzazione del generico costo C all'anno j-esimo.

$$VA = C \cdot (1 + i)^{-j}$$

Per quanto riguarda i costi di nodo, relativi alla sola opzione elettrica, anche per questi si distingue fra investimenti iniziali I e costi operativi C.

I primi sono dati dalla somma dei costi d'acquisto e installazione delle stazioni di ricarica, secondo la formula:

$$I_n^E = \sum_{s=1}^S (R_s^n \cdot I_s)$$

dove:

R_s^n : n. di stazioni di ricarica di tipo s-esimo nel nodo n [n. stazioni di tipo s]
 I_s : costo unitario per acquisto e installazione delle stazioni di ricarica di tipo s-esimo [€/stazione]
 S : n. di tipologie di stazioni di ricarica [n. di tipi s]

Il numero di stazioni di ricarica R_s^n è un valore derivante dal processo di dimensionamento della soluzione (S^* ,LR), illustrato nel successivo capitolo.

I costi annuali operativi di nodo sono dati invece dalla somma dei costi per la manutenzione delle stazioni di ricarica, per l'impegno di potenza elettrica, per l'allaccio alla rete elettrica.

$$C(y)_n^E = W_n \cdot CW + A_n \cdot CA + \sum_{s=1}^S (R_s^n \cdot C_s)$$

dove:

W_n : potenza impegnata nel nodo [kW]
 CW : costo unitario della potenza impegnata [€/anno/kW]
 A_n : n. di allacci alla rete elettrica nel nodo n
 CA : canone annuo degli allacci [€/anno/allaccio]
 R_s^n : n. di stazioni di ricarica di tipo s-esimo nel nodo n [n. stazioni di tipo s]
 C_s : costo annuale di manutenzione delle stazioni di ricarica di tipo s-esimo [€/anno/stazione]
 S : n. di tipologie di stazioni di ricarica [n. di tipi s]

Come nel caso degli investimenti iniziali, il calcolo dei costi operativi annuali di nodo presuppongono procedure di dimensionamento, specificatamente del sistema di ricarica illustrato successivamente.

Come per i costi di linea, il costo operativo complessivo di nodo della sottorete S sarà dato dalla somma dei valori dei costi operativi annuali di tutti i nodi della sottorete, attualizzati all'anno zero secondo il tasso di sconto fissato i, utilizzando la formula di attualizzazione dei costi precedentemente esposta.

3.3 Funzioni di vincolo

Vincolo di budget

La somma dei costi di investimento iniziali per linee, depositi, capolinea e fermate deve essere minore del massimo budget e maggiore di una sua data percentuale (per esempio 80/90%).

$$K \cdot I^M \leq \sum_{a \in \{A,B,C\}} \sum_{l \in L} I_{la}^E \cdot X_{la} + \sum_{d \in D} I_d^E \cdot X_d + \sum_{k \in K} I_k^E \cdot X_k + \sum_{f \in F} I_f^E \cdot X_f \leq I^M$$

dove

I^M : massimo budget di investimento iniziale

K rappresenta un coefficiente ≤ 1 dato

e le altre variabili di costo e decisionali sono state definite in precedenza.

Vincoli di fattibilità

Una linea può essere elettrificata con un'architettura di tipo a solo se l'architettura è fattibile per la linea:

$$X_{la} \leq F_{la} \forall l \in L, \forall a \in \{A, B, C\}$$

Un capolinea può essere elettrificato solo se sussiste la fattibilità:

$$X_k \leq F_k \quad \forall k \in K$$

Una fermata può essere elettrificata solo se sussiste la fattibilità:

$$X_f \leq F_f \quad \forall f \in F$$

Con le seguenti notazioni:

F_{la} : 1 se la linea $l \in L$ è elettrificabile con l'architettura $a \in \{A, B, C\}$.

F_k : 1 se il capolinea $k \in K$ è elettrificabile

F_f : 1 se la fermata $f \in F$ è elettrificabile

N.B I depositi sono sempre elettrificabili, per assunzione

Vincoli di capacità nei nodi:

Ogni nodo può contenere un numero massimo di stazioni di ricarica

$$R_d \leq R_d^M \quad \forall d \in D$$

$$R_k \leq R_k^M \quad \forall k \in K$$

$$R_f \leq R_f^M \quad \forall f \in F$$

con:

R_d : n° di stazioni di ricarica per il deposito $d \in D$

R_k : n° di stazioni di ricarica per il capolinea $k \in K$

R_f : n° di stazioni di ricarica per la fermata $f \in F$

R_d^M : n° massimo di stazioni di ricarica per il capolinea $d \in D$

R_c^M : n° massimo di stazioni di ricarica per il capolinea $c \in C$

R_f^M : n° massimo di stazioni di ricarica per la fermata $f \in F$

Vincoli di congruenza

Una linea può essere elettrificata solo con un'architettura:

$$X_{Al} + X_{Bl} + X_{Cl} \leq 1 \quad \forall l \in L$$

Tutti i percorsi di una linea elettrificata devono essere elettrificati con la medesima architettura scelta per la linea:

$$X_{pa} = X_{la} \quad \forall p \in P_l, \forall l \in L$$

con i seguenti significati:

X_{la} : 1 se elettrifico la linea $l \in L$ con l'architettura $a \in \{A, B, C\}$

X_{pa} : 1 se elettrifico il percorso $p \in P$ con l'architettura $a \in \{A, B, C\}$

Un deposito può essere elettrificato solo se esiste almeno una linea in esso incidente elettrificata con una qualsiasi architettura

$$\sum_{l \in L_d} (X_{lA} + X_{lB} + X_{lC}) \geq X_d, \quad \forall d \in D$$

Un capolinea può essere elettrificato solo se esiste almeno un percorso incidente elettrificato con architettura B o C

$$\sum_{p \in P_c} (X_{pB} + X_{pC}) \geq X_c, \forall c \in C$$

Una fermata può essere elettrificata solo se esiste almeno un percorso incidente elettrificato con architettura C

$$\sum_{p \in P_s} X_{pC} \geq X_s \quad \forall s \in S$$

Per i percorsi elettrificati in B deve essere elettrificato un numero sufficiente di capolinea

$$\sum_{c \in C_p} X_{cp} \geq NC_p^B \cdot X_{pB}, \forall p \in P$$

Per i percorsi elettrificati in C deve essere elettrificato un numero sufficiente di capolinea

$$\sum_{c \in C_p} X_{cp} \geq NC_p^C \cdot X_{pC}, \forall p \in P$$

Per i percorsi elettrificati in C deve essere elettrificato un numero sufficiente di fermate

$$\sum_{s \in S_p} X_{sp} \geq NS_p^C \cdot X_{pC}, \forall p \in P$$

NC_p^B : numero di capolinea da elettrificare per il percorso $p \in P$ se elettrificato con B [2, assunz. di progetto]

NC_p^C : numero di capolinea da elettrificare per il percorso $p \in P$ se elettrificato con C [2, assunz. di progetto]

NS_p^C : numero di fermate da elettrificare per il percorso $p \in P$ se elettrificato con C [output dell'analisi di linea]

Vincoli sui consumi energetici

Per le linee di architettura B, l'energia consumata in un percorso fra due capolinea con stazioni di ricarica deve essere minore del massimo consumo di progetto per B.

$$X_{lB} \cdot EC_p^{BM} \leq CP^{BM} \quad \forall p \in P_l, \forall l \in L$$

dove:

EC_p^{BM} : massima energia consumata fra due ricariche consecutive al capolinea (anche se posizionate al medesimo capolinea, in caso di linee circolari) lungo un percorso p per l'architettura di tipo B

CP^B : massimo consumo di progetto per l'architettura di tipo B

Il massimo consumo di progetto per l'architettura B è un attributo dell'architettura, fornito in input

Per le linee di architettura C, l'energia consumata tra due fermate consecutive elettrificate deve essere minore del massimo consumo di progetto per C.

$$X_{lC} \cdot ES_p^{CM} \leq CP^{CM} \quad \forall p \in P_l, \forall l \in L$$

dove:

ES_p^{CM} : massima energia consumata tra due fermate elettrificate consecutive lungo un percorso p per l'architettura di tipo C

CP^C : massimo consumo di progetto per l'architettura di tipo C, invariante con la linea

Il consumo di progetto per l'architettura C è un attributo dell'architettura, fornito in input

3.4 Funzioni di dimensionamento al nodo

Sono funzioni che per ogni tipologia di nodo dimensionano il numero di stazioni di ricarica per tipologia e calcolano i costi realizzativi e operativi del nodo. Dipendono dal numero di autobus incidenti sul nodo (per il deposito) o dal numero di corse (per capolinea e fermate) e dall'architettura dell'autobus.

Posto che:

- gli autobus di architettura di tipo B e C ricaricano al deposito oltre a quelli di tipo A
- gli autobus di architettura di tipo C ricaricano al capolinea oltre a quelli di tipo B

un deposito viene elettrificato in funzione del numero di veicoli delle linee in esso suddivise per A, B e C.

$$[I_d^E, C_d^E, R_d] = \mathcal{F}^D(V_{lA} \cdot X_{lA}, V_{lB} \cdot X_{lB}, V_{lC} \cdot X_{lC} \quad \forall l: d \in D)$$

Il capolinea viene elettrificato in funzione delle corse degli autobus di tipo B e C che servono i percorsi incidenti sul capolinea.

$$[I_c^E, C_c^E, R_c] = \mathcal{F}^C(T_p \cdot X_{pB}, T_p \cdot X_{pC} \quad \forall p: c \in C_p)$$

E' da scrivere in funzione delle corse, non degli autobus

La fermata viene elettrificato in funzione delle corse degli autobus di tipo C che servono i percorsi incidenti sulla fermata.

$$[I_s^E, C_s^E, R_s] = \mathcal{F}^S(T_p \cdot X_{pC} \quad \forall p: s \in S_p)$$

Nel successivo capitolo si entrerà nel merito delle funzioni di dimensionamento ai nodi.

3.5 Considerazioni

Da quanto esposto nei precedenti paragrafi risulta evidente come il calcolo della funzione obiettivo e la verifica dei vincoli risultino alquanto complessi, richiedendo in input numerosi valori, molti dei quali desumibili solo a valle di onerose procedure.

In sostanza, alla complessità di esplorazione dello spazio delle soluzioni, che "esplode" esponenzialmente al crescere del numero di linee della rete esaminata, bisogna aggiungere l'onerosità del calcolo della funzione obiettivo e della verifica dei vincoli.

4 Esplorazione dello spazio delle soluzioni

4.1 Approccio generale

La modalità utilizzata per “costruire” una generica coppia (S^* ;LR), prescindendo momentaneamente dal dimensionamento della ricarica nei nodi, è in grado di influire sull’onerosità della ricerca dell’ottimo.

In linea di principio, per definire una (S^* ,LR*) si potrebbero fissare a piacere una sottorete S^* e un layout di ricarica LR ed effettuare a posteriori le verifiche di fattibilità e di congruenza fra i due elementi della coppia.

Tuttavia, appare più logico ed efficace utilizzare una procedura tale per cui siano escluse a priori alcune configurazioni non fattibili e la congruenza fra S^* e LR derivi per costruzione, come descritto di seguito.

In pratica, data la rete completa R:

- a. per ogni linea l di R si verifica a priori la fattibilità di ciascuna delle possibili architetture di ricarica (A, B e C) «stand alone»; si escludono dal successivo processo le linee per le quali non sussista possibilità alcuna di elettrificazione
- b. si definisce la sottorete S come combinazione a piacere di linee di R elettrificabili, ciascuna caratterizzata da una certa architettura di ricarica fra quelle per essa fattibili, creando così la grandezza S^* , primo elemento della coppia che definisce una generica soluzione del problema
- c. in funzione di tale selezione si individuano i nodi deputati ad accogliere la ricarica per ogni linea e cioè:
 - tutti i depositi di afferenza delle linee di S, a prescindere dall’attributo “architettura”;
 - tutti i capolinea di afferenza di una o più linee di tipo B o C;
 - alcune fermate – correttamente intervallate fra loro- delle linee di architettura C;

alla fine del processo si determina la grandezza LR, intesa come insieme unione dei nodi precedentemente selezionati, ottenendo una coppia (S^* , LR) sicuramente congruente; in base alla scelta dei nodi fermata è possibile variare l’elemento LR, mantenendo la congruenza; in assenza di linee di tipo C, data S^* , il sistema LR è univocamente determinato

La figura seguente illustra schematicamente un piccolo caso di studio schematico per aiutare la comprensione del processo descritto. Nell’immagine a sinistra la rete data R, in questo caso composta di sole cinque linee (blu, rossa, gialla verde e nera), quattro nodi capolinea, dieci nodi fermata e due depositi; nell’immagine a destra la coppia (S^* , LR*) selezionata fra le diverse possibili, in questo caso composta di due linee (rossa e blu), tre capolinea, sette fermate e due depositi. Una delle due linee selezionate (blu) è configurata per la ricarica opportunity alle fermate (Arch. C) e l’altra (rossa) prevede la ricarica ai soli capolinea (Arch. B). In tutti i capolinea di afferenza delle due linee, tre in tutto, si prevede l’installazione della ricarica mentre solo due delle quattro fermate della linea di arch. C sono attrezzate per la ricarica. I due depositi di afferenza delle linee selezionate sono predisposti per la ricarica notturna. Nel complesso la soluzione prevede l’attrezzaggio di sette nodi per due linee elettrificate.

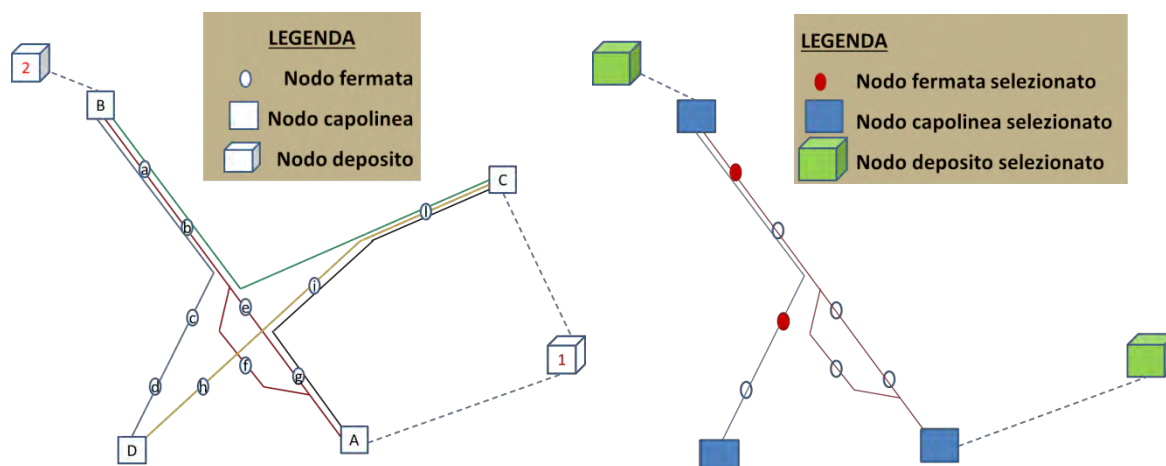


Figura 2: Esempio di selezione di una soluzione (S^* , LR) a partire dalla rete data R

Dopo aver definito la configurazione di (S^* , LR), si procede al dimensionamento del sistema di ricarica secondo criteri di necessità e sufficienza, attraverso l'analisi della convergenza delle linee nei nodi nelle varie fasce orarie della giornata di analisi; a seguito di questa procedura la coppia (S^* , LR) assume la configurazione (S^* , LR*).

Nel caso illustrato in precedenza, il dimensionamento della ricarica nel nodo capolinea comune alle due linee selezionate, tenendo conto delle possibili economie di scala, risulterà probabilmente ridotto rispetto a quello che si sarebbe ottenuto considerando le due linee separatamente

Per la configurazione (S^* , LR*) si verifica la compatibilità degli investimenti iniziali con il budget fissato e si calcola la funzione obiettivo come precedentemente specificato.

Reiterando il processo per tutte le sottoreti di R si arriva a determinare la soluzione ottima in assoluto in relazione ai valori degli obiettivi prefissati (minimizzazione dei costi).

Lo schema seguente riassume tutte le fasi della procedura appena descritta, indicando la natura dei dati di input e di output.

Tabella 1: Fasi della procedura di ricerca della soluzione ottimale a partire dalla rete data

	Descrizione	Input	Output
a.	Analisi per linea	Caratteristiche topologiche e consumi energetici delle linee Caratteristiche di veicoli e sistemi di ricarica sul mercato	Per linea: fattibilità architetture elettriche
b.	Costruzione elemento S^* della coppia (S^* , LR)	Fattibilità architetture elettriche per linea	S^* ammissibile
c.	Costruzione elemento LR della coppia (S^* , LR)	S^* ammissibile, incidenza linee/nodi	LR ammissibile
d.	Dimensionamento ricarica nei nodi della LR	Programma di esercizio e consumi energetici delle linee di S^* ; caratteristiche dei sistemi di ricarica sul mercato	LR* ossia per ciascun nodo di LR: caratteristiche sistema di ricarica (impianti, prese, caricabatterie, potenze, ecc.)
e.	Calcolo e verifica investimenti iniziali per	Caratteristiche flotta e sistema di ricarica	Valore investimenti iniziali e verifica sul budget

	sottorete (S*,LR*)		
f.	Calcolo F.O. di (S*,LR*)	Consumi annuali, n° di ricariche medi annui per classe dimensionale veicoli	Valore della F.O.
g.	Selezione (S*,LR*) ottimale	Valore F.O di tutte le sottoreti fattibili	Sottorete ottimale (prime n. sottoreti ottimali)

Nella fase c. di determinazione del Layout di Ricarica LR congruente con S* appare particolarmente utile utilizzare la matrice di incidenza linee/nodi di seguito riportata per l'esempio precedente, dove sono evidenziate le due linee selezionate e per ciascuna di esse i nodi in cui si prevede di installare stazioni di ricarica.

Tabella 2: Esempio di matrice di incidenza linee/nodi e del suo utilizzo per determinare la coppia (S*,LR)

# linea	# architett.	Depositi		Capolinea				Fermate intermedie									
		1	2	A	B	C	D	a	b	c	d	e	f	g	h	i	l
Rossa	B	X		X	X			X	X			X	X				
Gialla		X				X	X								X	X	X
Verde			X		X	X		X	X								X
Blu	C		X		X		X	X	X	X	X	X					
Nera		X		X		X			X					X		X	X

4.2 Semplificazioni dell'analisi

Da quanto precedentemente esposto in merito alle possibili dimensioni dello spazio delle soluzioni ed alla complessità di calcolo della funzione obiettivo e di vincolo, si intuisce bene che l'esplorazione esaustiva dello spazio delle soluzioni in tempi ragionevoli può richiedere strumenti di calcolo molto potenti (supercalcolo parallelo), non sempre disponibili e, comunque, non sempre sufficienti per istanze particolarmente grandi e complesse.

Adeguati algoritmi di esplorazione sono sì in grado di ridurre considerevolmente il numero di casi da esaminare, a partire dall'esclusione a priori delle soluzioni che evidentemente non rispettano i vincoli del problema (prima di tutto quello sul budget disponibile per gli investimenti iniziali) sino ad arrivare ad escludere soluzioni che, pur rispettando tutti i vincoli, appaiono meno promettenti in base a determinati criteri di "economicità".

Pur tuttavia è quanto mai opportuno introdurre tutte le possibili semplificazioni dell'analisi.

La prima di queste riguarda il pre-processing dei dati GTFS di input della rete di studio, al fine di disporre di grandezze derivate più aggregate e immediatamente utilizzabili per i calcoli previsti nella procedura; per tale argomento si rimanda al report RdS/PAR2016/ redatto dal DI di RomaTre.

La seconda semplificazione consiste nell'introdurre adeguati standard delle infrastrutture di ricarica per facilitare il dimensionamento della ricarica nei nodi; il tema è stato trattato nel Report RdS/PAR2016/226 di ENEA, di cui si riporta per comodità di lettura la seguente tabella.

Tabella 3: Caratteristiche degli impianti standard di ricarica

Tipo impianto	Arch.	Tipo nodo	Potenza impianto [kW]	N. turni di ricarica in al deposito 6 ore	N. veicoli per turno di ricarica
stazione Deposito monoposto con connettore	A	D	50	1	1
stazione Deposito dual con connettore	B	D	20	2	2
stazione Deposito a 4 posti con connettore	B	D	40	2	4
stazione Deposito a 3 posti con connettore	C	D	15	6	3
stazione Deposito a 6 posti con connettore	C	D	30	6	6
stazione Capolinea monoposto con pantografo	B	K	132	n.d.	1
stazione Capolinea dual con pantografo	B	K	264	n.d.	2
stazione Capolinea monoposto con pantografo	C	K	47	n.d.	1
stazione Capolinea dual con pantografo	C	K	93	n.d.	2
stazione Fermate monoposto con pantografo	C	F	600	n.d.	1

In conclusione il sistema di ricarica nei nodi è stato impostato su un numero limitato di valori di potenza per postazione di ricarica, definiti in funzione della tipologia di nodo e di veicolo da dover (eventualmente) ricaricare.

L'esistenza di tipologie di impianto con diverso numero di postazioni di ricarica per la medesima Architettura nella medesima tipologia di nodo permette una certa flessibilità nel dimensionamento della ricarica nei nodi così da aderire il più possibile ai criteri di economia di scala (utilizzo di impianti a numerose postazioni per ammortizzare i costi fissi, in caso sia necessario ricaricare numerosi veicoli contemporaneamente) e di "sufficienza" (utilizzo di impianti a poche postazioni, in caso sia necessario ricaricare pochi veicoli contemporaneamente).

La standardizzazione dei fattori tecnologici non elimina la necessità di localizzare gli impianti nei nodi e di determinarne il numero, eventualmente su base probabilistica, considerando le caratteristiche del servizio (frequenza e tempi di percorrenza delle corse, tempi di sosta/fermata ai capolinea e fermate e classe dimensionale del veicolo di riferimento*) sulle linee afferenti in ciascun nodo. Queste attività fanno capo alle fasi b. e c. della procedura descritta nel precedente paragrafo.

La terza e più importante semplificazione, prevede l'utilizzo degli strumenti già messi a punto nei precedenti periodi di ricerca per l'analisi delle singole linee, secondo quanto di seguito specificato.

4.2.1 Utilizzazione del software BEST per l'analisi di linea

Nella prima fase della procedura per l'individuazione dell'ottimo precedentemente descritta si richiede di determinare, per ogni linea l di R , quali delle tre possibili architetture di ricarica siano fattibili.

A tal proposito viene in soccorso il software BEST messo a punto da ENEA a partire dal precedente anno di ricerca; infatti, data una rete R , BEST stabilisce appunto per ogni singola linea se sia elettrificabile ed eventualmente per quali delle tre architetture previste; in pratica BEST fornisce i valori delle grandezze di fattibilità F_{la} senza che si renda necessario effettuare le verifiche sulla possibilità di installare gli impianti di ricarica nei nodi a ciò destinati ed sulle necessità di consumo.

Va da sé che per l'utilizzazione ai fini della ricerca dell'ottimo di rete, BEST debba essere implementato con gli standard tecnologici illustrati nel precedente paragrafo.

La fattibilità di una linea con B secondo BEST implica che sia certamente verificata la condizione sul massimo consumo di progetto (vincolo sui consumi) di seguito richiamata:

$$X_{lB} \cdot EC_p^{BM} \leq CP^{BM} \quad \forall p \in P_l, \forall l \in L$$

in quanto si assume per default che la ricarica sia installata in tutti i capolinea della linea.

Si ricorda BEST esclude a priori la fattibilità di B per linee con più di tre capolinea.

La fattibilità con C secondo BEST, invece, garantisce solo che esista un numero sufficiente di fermate in grado di accogliere la ricarica e che fra due qualsiasi di tali nodi il consumo energetico non superi quello massimo; non viene data alcuna indicazione in merito alla localizzazione precisa delle fermate con ricarica e quindi, nella fase di costruzione del lay-out di ricarica LR si richiede la verifica della condizione sul massimo consumo di progetto richiamata di seguito:

$$X_{lC} \cdot ES_p^{CM} \leq CP^{CM} \quad \forall p \in P_l, \forall l \in L$$

Si ricorda che BEST esclude dalla fattibilità con C tutte le linee con più di un percorso per direzione.

Oltre alle indicazioni sulla fattibilità delle varie soluzioni di elettrificazione, BEST fornisce per ogni linea i valori di costo opportunamente disaggregati ed aggiornati sul periodo di analisi considerato, sia per tutte le architetture elettriche fattibili sia per la soluzione convenzionale; tali risultati possono aiutare nella fase di verifica sul budget e nel calcolo della F.O.

Infine l'output di BEST relativo alle dimensioni della flotta, al numero di postazioni di ricarica al capolinea per l'architettura B e al numero minimo di fermate da attrezzare per la ricarica nell'Architettura C sono indicazioni molto utili nella fase di lay-out e dimensionamento del sistema di ricarica.

La seguente tabella riassume le grandezze di risultato del software BEST e il loro possibile utilizzo all'interno della procedura di determinazione dell'ottimo di rete.

Tabella 4: OUTPUT del software BEST utilizzati nella procedura di ricerca dell'ottimo

OUTPUT di BEST	UM	Impiego nella procedura di ricerca dell'ottimo di rete
Fattibilità architetture elettriche	Y/N	Selezione sottorete S*
Investimento iniziale per acquisto flotta	€	Verifica sul budget e per calcolo F.O. (investimenti iniziali di linea). Eventuali ulteriori investimenti per sostituzione della flotta in anni intermedi sono inseriti nella voce manutenzione bus
Valore attualizzato dei costi di manutenzione della flotta nel periodo di analisi	€	Calcolo F.O. (costi operativi di linea) Comprende manutenzione ordinaria e straordinaria bus, sostituzione e valori residui bus e accumuli di bordo
Valore attualizzato dei costi sostenuti per l'acquisto di energia elettrica nel periodo di analisi	€	Per calcolo F.O. (costi operativi di linea) E' dato dalla somma dei valori attualizzati dei costi sostenuti annualmente per acquistare l'energia necessaria per la trazione, non comprende la quota di potenza e di allacci, considerate fra i costi operativi di nodo.
Investimento iniziale per acquisto e installazione degli impianti di ricarica necessari per la linea, considerata singolarmente. Suddivisi in funzione della tipologia di nodo (depositi, capolinea e fermate)	€	Per calcolo F.O. semplificata (investimenti iniziali di nodo) Assumendo un valore massimo del periodo di analisi pari a 20 anni, non vi sono altri investimenti per impianti di ricarica ma solo costi di manutenzione
Valore attualizzato dei costi per manutenzione degli impianti di ricarica e di eventuali valori residui a fine periodo	€	Per calcolo F.O. semplificata (costi operativi di nodo)
Valore attualizzato dei costi sostenuti per gli allacci alla rete nel periodo di analisi. Suddivisi in funzione della tipologia di nodo (depositi, capolinea e fermate)	€	Per calcolo F.O. (costi operativi di nodo) E' dato dalla somma dei valori attualizzati dei costi sostenuti annualmente per gli allacci alla rete elettrica in MT.
Valore attualizzato dei costi sostenuti per l'impegno di potenza nel periodo di analisi. Suddivisi in funzione della tipologia di nodo (depositi, capolinea e fermate)	€	Per calcolo F.O. semplificata (costi operativi di nodo) E' dato dalla somma dei valori attualizzati dei costi sostenuti annualmente per l'impegno di potenza elettrica in MT.
Numerosità della flotta per le varie soluzioni di elettrificazione	n. veicoli	Per dimensionamento ricarica nei nodi deposito
N. minimo fermate da elettrificare per Arch. C	n. fermate	Per layout ricarica alle fermate per C

4.3 Procedura risolutiva operativa

In base a quanto sin qui descritto, la procedura per la ricerca dell'ottimo prevede il percorso operativo "semplificato" illustrato nella seguente figura.

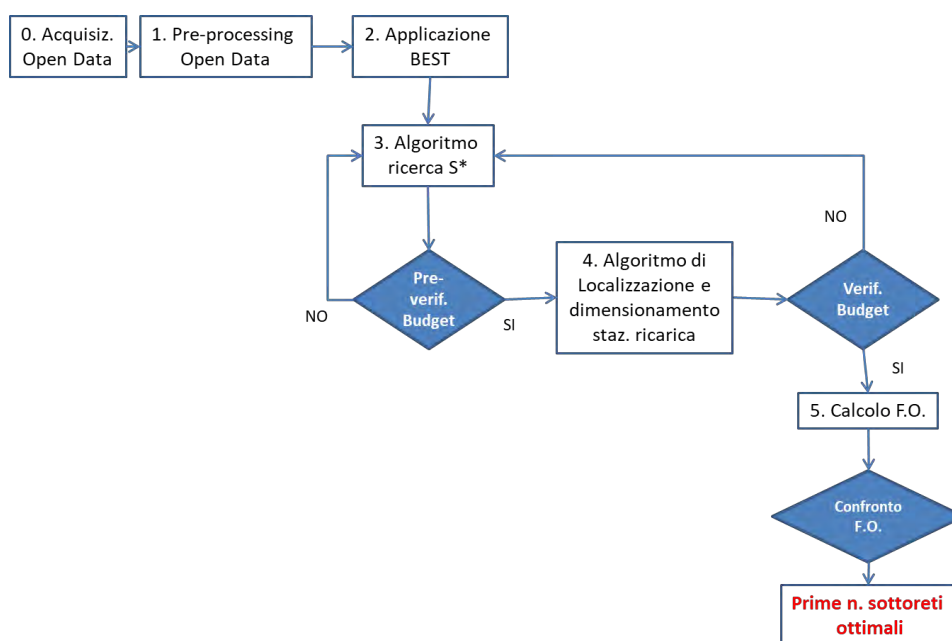


Figura 3: Procedura operativa generale per la risoluzione del problema

Nonostante le semplificazioni sin qui introdotte, permangono alcuni elementi di criticità. Le fasi più critiche della procedura schematizzata sono la #3 e la #4.

La fase 3. richiede un algoritmo in grado di combinare efficientemente le linee della rete R per determinare tutte le sottoreti fattibili (escludendo, eventualmente, quelle meno promettenti). Tali algoritmi sono oggetto di analisi da parte delle Università collaboranti e per ciò si rimanda ai loro elaborati.

La fase 4. richiede un algoritmo per localizzare gli impianti di ricarica alle fermate per le linee di Architettura C (quelli ai depositi ed ai capolinea derivano per costruzione, come precedentemente rilevato) e di dimensionare il sistema della ricarica nei diversi nodi del layout LR (depositi, capolinea e fermate) tenendo conto delle esigenze di ricarica delle diverse linee in essi convergenti. Il primo problema sarà affrontato nel prossimo anno di ricerca sempre con la collaborazione delle Università mentre per le procedure di dimensionamento della ricarica nei nodi si rinvia al successivo capitolo.

La struttura dei dati di input della procedura è organizzata nei file tematici elencati di seguito e descritti all'interno del report ENEA RdS/PAR2016/226 per quanto riguarda gli input del modulo BEST e dal Report RdS/PAR2016/230 di Roma Tre in relazione agli input dell'algoritmo per la ricerca della sottorete ottimale.

- dati_generali.csv
- arch_a.csv
- arch_b.csv
- arch_c.csv
- linee.csv
- nodi.csv
- impianti_standard.csv
- percorsi.csv
- percorsi_fermate.csv

5 Dimensionamento del sistema di ricarica

Il dimensionamento del sistema di ricarica nei nodi a ciò preposti ha come fine ultimo il calcolo dei relativi costi di investimento e di manutenzione, da utilizzarsi, insieme ad altre voci di costo, per la verifica sul budget di spesa iniziale e per il calcolo della funzione obiettivo.

Per ogni nodo in cui si preveda la ricarica si vuole determinare quale sia il numero di impianti necessario e sufficiente per ogni tipologia di impianto fra quelle previste per la tipologia di nodo (vedi par. 4.2?).

Gli impianti di ricarica, come visto in precedenza, sono differenziati in funzione dell'Architettura del veicolo da ricaricare ma non della sua classe dimensionale; in pratica tutti i veicoli di una certa architettura sono ricaricati con impianti dedicati, senza tuttavia distinguere in relazione alla classe dimensionale. In base a questo criterio progettuale, il dimensionamento degli impianti è realizzato considerando le variabili di progetto per Architettura.

Le variabili di progetto fondamentali sono:

- il tempo di ricarica di ogni veicolo, funzione delle caratteristiche del veicolo (potenza media di ricarica) e dell'energia da dover incamerare nel nodo
- il numero di veicoli da ricaricare nel nodo durante il periodo di progetto assumendo:
 - 6 ore notturne per il deposito (invariante)
 - 1 ora per capolinea e fermate, da intendersi come orario di punta per il nodo in esame (differente di caso in caso).

Per ogni nodo, tali variabili dipendono dalla soluzione (S^* , LR) in esame.

Nel caso del deposito il calcolo è deterministico, nel caso di capolinea e fermate è invece in linea di principio probabilistico, basato sull'applicazione della teoria delle code.

5.1 Dimensionamento della infrastruttura di ricarica ai depositi

Si introduce la variabile ausiliaria P_a^k , valore reale positivo che assume il significato di n° di postazioni di ricarica sufficienti per la data situazione. Da non confondersi con il numero di impianti di diversa tipologia, valori interi positivi derivati dal numero di postazioni.

Per i veicoli di Architettura A, per i quali si prevede una durata di ricarica pari all'intero periodo di progetto (6 h), il numero di postazioni di ricarica sarà semplicemente pari al numero dei veicoli stessi, a prescindere dalla loro dimensione.

Per i veicoli di Architettura B, per i quali si prevede una durata di ricarica pari a 3 h, ovvero alla metà dell'intero periodo di progetto, il numero di postazioni di ricarica sarà pari alla metà del numero dei veicoli, a prescindere dalla loro dimensione; in caso di presenza di veicoli articolati, per i quali il tempo massimo di ricarica è di 3,5 h, si accetta lo sfioramento del periodo di ricarica ovvero di utilizzare i margini di tempo prevedibili in considerazione del fatto che in molti casi l'energia da dover ricaricare è inferiore a quella massima consentita (massimo consumo di progetto).

Per i veicoli di Architettura C valgono ragionamenti analoghi a quelli fatti per l'Architettura B, salvo il fatto che la durata di ricarica prevista è di solo un'ora e quindi il numero di postazioni necessarie sarà pari a 1/6 del numero di veicoli. Si osservi che i veicoli di Architettura C sono solo di due classi dimensionali, full e articulated, e che non sussiste differenziazione dei tempi di ricarica al deposito per essi, in quanto si tratta di rifornire la batteria di riserva, di ridotte e simili dimensioni nei due casi.

Assumendo che tutte le linee convergano su un unico deposito, detto P_a^D il numero di postazioni per una generica architettura $a \in \{A, B, C\}$, si può generalizzare la formula dei calcoli precedentemente descritti con l'espressione:

$$P_a^D = V_a \cdot 6 / H_a^D$$

dove:

- P_a^D : n. di postazioni di ricarica al deposito per i veicoli delle linee di architettura $a \in \{A, B, C\}$
- V_a : flotta veicolare complessiva delle linee di architettura $a \in \{A, B, C\}$
- H_a^D durata in ore della ricarica al deposito per tutti veicoli di Arch. $a \in \{A, B, C\}$ [costante di progetto]

La flotta è così determinata:

$$V_a = \sum_l \sum_a x_{la} \cdot V_{la}$$

dove:

- V_a : flotta di veicoli per l'architettura $a \in \{A, B, C\}$ [incognita]
- V_{la} : flotta di veicoli della linea $l \in L$ per l'architettura $a \in \{A, B, C\}$ [input]
- x_{la} : 1 se elettrico $l \in L$ con $a \in \{A, B, C\}$ [variabile decisionale]

Una volta determinato il numero di postazioni, il numero di impianti di diversa capienza sarà determinato in funzione del valore del rapporto fra n. di postazioni e n. massimo di postazioni per impianto, come già visto nel caso delle singole linee (vedi Report RdS/2016/226).

$$Rmax_a^D = arr.dif(P_a^D / Nmax_a^D; 0)$$

$$Rmin_a^D = arr.ecc(P_a^D - Rmax_a^D \cdot Nmax_a^D; 0)$$

$Rmax_a^D$: n° impianti con massimo numero di postaz. per arch. $a \in \{A, B, C\}$

$Rmin_a^D$: n° impianti con minimo numero di postaz. per arch. $a \in \{A, B, C\}$

$Nmax_a^D$: n° massimo di postazioni degli impianti per arch. $a \in \{A, B, C\}$

Si osservi che la forma della seconda espressione è tale in quanto, per assunzione di progetto, il massimo numero di stalli degli impianti di ricarica di una certa architettura è sempre un multiplo in base 2 del numero minimo. Le costanti di calcolo sono reperibili nella tabella 9 del report RdS/2016/226

5.2 Dimensionamento della infrastruttura di ricarica ai capolinea

Anche in questo caso si introduce la variabile ausiliaria P_a^k , valore reale positivo che assume il significato di n° di postazioni di ricarica sufficienti per la data situazione.

Il calcolo di P_a^k deriva concettualmente dalla teoria delle code; si pone la questione di quale forma di distribuzione degli arrivi convenga utilizzare.

Nel caso di una sola linea, gli arrivi sono sulla carta un evento regolare programmato, anche se nella realtà esso risente degli imprevisti legati alla circolazione dei veicoli. Ciononostante appare troppo penalizzante assumere per questo fenomeno una distribuzione esponenziale, legata a fenomeni puramente stocastici; la soluzione più opportuna per una sola linea sembra dunque quella di assumere una distribuzione degli arrivi deterministica costante, data dalla frequenza media delle corse della linea nell'ora di punta, introducendo un coefficiente di sicurezza opportuno per tener conto di una certa aleatorietà.

Anche per più linee si tratta di arrivi programmati, ma in questo caso la distribuzione non è più regolare, e può diventare sempre più irregolare al crescere del numero di linee considerate. Questa irregolarità potrebbe ostacolare l'utilizzazione degli stessi impianti di ricarica da parte di più linee, riducendo le potenzialità dell'"effetto rete" cercato. Si può però supporre che, trattandosi appunto di fenomeni programmabili, sia possibile imporre una certa regolarità anche agli arrivi di più linee.

Ciò posto, siano:

NC_a^k = n° di corse di architettura $a \in \{B, C\}$ in arrivo nel nodo k-esimo nell'ora critica

I_a^k = intertempo medio degli arrivi (costante) = $1/NC_a^k$

TO_a^k = il tempo medio di occupazione della stazione di ricarica di un veicolo di architettura $a \in \{B, C\}$, dato dalla somma del tempo netto medio di ricarica TM_a^k e dei perditempo per connessione/disconnessione a/da la stazione PK.

TS_a^k = tempo medio di sosta di un veicolo di architettura $a \in \{B, C\}$ al capolinea k-esimo (da programma di esercizio), con $TS_a^k \geq TO_a^k$

TA_a^k = tempo medio di attesa di un veicolo di architettura $a \in \{B, C\}$ per accedere alla stazione di ricarica dopo il suo arrivo nel capolinea k-esimo

TR_a^k = tempo complessivo di occupazione della ricarica di tutti i veicoli di architettura $a \in \{B, C\}$ in arrivo nel nodo k-esimo nell'ora di massimo afflusso

P_a^k = n. di postazioni di ricarica da rendere disponibili (incognita).

La condizione di stabilità della coda (n. arrivi = n. partenze, nell'unità di tempo) vuole che il tempo complessivo di utilizzazione di ogni postazione ricarica nell'ora di punta non superi 1h (per un tasso massimo di utilizzazione pari al 100%); analogamente il tempo di utilizzazione di P postazioni sarà al massimo pari a P [h]. Dovrà quindi essere, per la condizione di stabilità:

$$TR_a^k \leq P_a^k$$

Poiché è anche:

$$TR_a^k = NC_a^k \cdot TO_a^k = TO_a^k / I_a^k$$

dovrà essere:

$$P_a^k \geq TO_a^k / I_a^k$$

Si impone poi che il tempo di attesa per accedere alla stazione di ricarica sia tale per cui nel complesso la somma di attesa e ricarica non superi il tempo di sosta previsto dal programma di esercizio:

$$TA_a^k + TO_a^k \leq TS_a^k$$

e cioè che il veicolo non sia costretto a soste più lunghe quelle previste dal programma di esercizio. Da cui:

$$TA_a^k \leq TS_a^k - TO_a^k$$

ovvero dovrà essere:

$$TA_a^k \max = TS_a^k - TO_a^k$$

Avendo imposto che il tempo di sosta programmato sia sempre maggiore o tutt'al più uguale al tempo di ricarica, sarà $TA_a^k \max \geq 0$ sempre.

Si verifica che in una condizione in cui $TO > I$, per un criterio di servizio di tipo FIFO, il tempo di attesa del veicolo n-esimo a partire dall'istante 0 è dato da:

$$TA(n) = (n - 1) * (TO - P * I)$$

Se, per la condizione di stabilità, come abbiamo visto, $P \geq TO/I$, allora $P * I \geq TO$ e quindi il secondo fattore del secondo membro della precedente espressione risulta sempre negativo, per cui la condizione sul valore massimo di tempo d'attesa è sicuramente verificata, essendo:

$$TA(n) \leq 0 \leq T_{Amax}, \quad \forall n$$

Si verifica anche che per $I \geq TO$, $TA = 0$ e quindi la condizione sul valore massimo del tempo di attesa è sicuramente verificata anche in questo caso.

In pratica, in un'ipotesi di arrivi regolari, la condizione di stabilità implica anche la condizione sul massimo tempo di attesa, per qualsiasi valore di TS (purché maggiore di TO).

Allora il calcolo del numero di postazioni di ricarica è dato dal semplice algoritmo:

$$P_a^k = TR_a^k$$

Volendo tener conto di una certa aleatorietà dei tempi di arrivo programmati si può introdurre un coefficiente di sicurezza sul tasso medio di utilizzazione delle stazioni di ricarica, ponendo un limite massimo $U_{max} < 100\%$. In questo caso la condizione di stabilità sarà data da:

$$U_{max} * P_a^k \geq TR_a^k$$

che implica comunque la condizione sul tempo massimo di attesa, come si verifica facilmente essendo $U_{max} * P > P$.

L'algoritmo di dimensionamento prende allora la forma:

$$P_a^k = TR_a^k / U_{max}$$

Dal numero minimo di postazioni di ricarica (valore reale positivo) si passa al numero (intero positivo) di stazioni di diversa tipologia con passaggi del tutto analoghi a quelli visti nel caso del deposito.

Nel caso, invece, in cui si accettasse una distribuzione degli arrivi di tipo esponenziale, per la teoria delle code l'algoritmo di dimensionamento del numero di postazioni di ricarica prenderebbe la forma:

$$P = NC \cdot \frac{TS}{\frac{TS}{TO} - 1}$$

Dove

P è il numero di postazioni cercato

NC è il numero di corse in arrivo nell'ora critica

TO è il tempo medio di occupazione di una postazione di ricarica nell'ora critica

TS è il tempo massimo di servizio imposto nell'ora critica

Qualunque sia la distribuzione ipotizzata per gli arrivi, per il calcolo del numero minimo di postazioni di ricarica per un insieme di linee è necessario determinare preventivamente i valori delle grandezze di input relativi all'ora più critica.

Definiamo ora critica h_a^{k*} di un capolinea k -esimo per una certa architettura $a \in \{B, C\}$ quella fascia oraria nella quale, per un certo sottoinsieme S^* di linee l si verifica il maggior tempo complessivo di occupazione degli impianti di ricarica. Non è detto che, data S^* , la fascia oraria critica sia la stessa per tutti i nodi e per tutte le architetture; quindi per ciascuna coppia (k, a) , con $a \in \{B, C\}$, data la sottorete S^* , questa grandezza va opportunamente individuata, per confronto su tutte le fasce orarie.

Il tempo complessivo di occupazione delle ricariche in una certa fascia oraria h per una certa architettura a sarà dato da:

$$TR_{ah}^k = x_k \cdot \sum_l x_{la} \cdot \left(\frac{E_{lah}^k}{W_{la}} + PK \right)$$

dove:

TR_{ah}^k : tempo complessivo di ricarica al capolinea $k \in K$ dei veicoli di architettura $a \in \{B, C\}$ nell'ora $h \in [1 \div FH]$, FH : n. di fasce orarie nella giornata [incognita]

E_{lah}^k : energia da ricaricare nella fascia oraria $h \in [1 \div FH]$ nel capolinea $k \in K$ dai veicoli delle linee $l \in L$ elettrificata con $a \in \{B, C\}$ [input da preprocessing]

W_{la} : potenza media di ricarica della classe veicolare di l in architettura $a \in \{B, C\}$ [costante di progetto]

PK : perditempo di connessione/disconnessione nei nodi capolinea [costante di progetto]

x_k : 1 se elettrifico $k \in K$ [variabile decisionale]

x_{la} : 1 se elettrifico $l \in L$ con $a \in \{B, C\}$ [variabile decisionale]

Poniamo:

$$h = h^* \leftrightarrow TR_{ah}^k = (Max)_h =: TR_a^{k*}$$

$$h = h^* \leftrightarrow \sum_l E_{lah}^k = (Max)_h =: E_a^{k*}$$

L'energia E_a^{k*} che i veicoli devono ricaricare complessivamente al capolinea è pari al consumo previsto per effettuare i percorsi dalle precedenti ricariche.

Nel caso dell'architettura B, la ricarica precedente è effettuata ad un capolinea, che può essere o il capolinea di partenza della corsa oppure lo stesso capolinea di arrivo, se si tratta di una linea circolare oppure se si prevede di effettuare una sola ricarica per ogni ciclo A/R; quest'ultima eventualità incide pesantemente sul valore di energia richiesta e diventa un elemento di complessità di calcolo (nuova variabile decisionale). Assumendo però di effettuare la ricarica alla fine di ogni corsa, si elimina l'incertezza ed il calcolo si semplifica; inoltre la ricarica ad ogni corsa rappresenta una maggiore garanzia di affidabilità nell'esercizio. Anche con tale assunzione, tuttavia, si commetterebbe un'approssimazione eccessiva se si assumesse di dover ricaricare un quantitativo di energia pari al massimo consumo di progetto ammesso per l'architettura B e quindi si ritiene opportuno quantificare il valore di E_B^{k*} in relazione agli effettivi consumi delle linee convergenti in k .

I valori di E_{lB}^{k*} sono facilmente ricavabili da un pre-processing dei dati di input del problema, che comprendono i valori di consumo delle varie corse di una generica linea $l \in L$ da fermata a fermata (vedi Report RdS/PAR2016/230 del DI-RomaTre). Attraverso semplici operazioni di somma è possibile ricavare i consumi a partire dal capolinea opposto delle diverse corse in arrivo nel capolinea k -esimo nelle diverse

fasce orarie ed applicare così le formule viste per il calcolo del tempo complessivo di ricarica TR_B^{k*} e poi, del numero minimo di postazioni di ricarica P_B^k richieste per i veicoli di architettura B nel nodo k-esimo.

Nel caso dell'architettura C, invece, la ricarica precedente è effettuata ad una fermata intermedia; pur se non si conosce l'ubicazione di tale impianto, e quindi quale sia l'energia da dover effettivamente ricaricare, date le modeste quantità in gioco, non si compie un'approssimazione eccessiva (e comunque si agisce in sicurezza) se si ipotizza di dover rifornire un quantitativo di energia pari al massimo consumo di progetto ammesso per la classe veicolare attribuito della linea in esame³; ciò comporta che la durata di ogni ricarica possa essere posta pari al valore massimo di progetto (costante, in funzione della classe veicolare). In questo caso, quindi, il tempo totale di occupazione di una postazione di ricarica al capolinea è dato da una semplice somma di prodotti, in formule:

$$TR_{hC}^k = x_k \cdot \sum_l x_{lC} \cdot NC_{lh}^k \cdot TO_{lC}^k$$

dove:

TR_{hC}^k : tempo totale di occupazione delle ricariche da parte di veicoli di architettura C nel capolinea k-esimo nell'ora $h \in [1 \div FH]$, FH : n. di fasce orarie nella giornata [incognita]

NC_{lh}^k : n. di corse della linea $l \in L$ in arrivo al capolinea $k \in K$ nella fascia oraria $h \in [1 \div FH]$ [input da preprocessing]

TO_{lC}^k : tempo di occupazione di una ricarica al capolinea per veicoli delle linea $l \in L$ [costante di progetto funzione della classe veicolare attribuito di l]

$$h = h^* \leftrightarrow TR_{hC}^k = (Max)_h = TR_C^{k*}$$

Si rammentano i valori fissati per le costanti TO_{lC}^k : 5' per veicoli di classe dimensionale full e 6' per veicoli di classe dimensionale maxi.

Nel caso di arrivi deterministici costanti, dal valore di TR_a^{k*} , comunque determinato, discende quello del numero di postazioni P_a^{k*} e poi quello del numero di stazioni di diversa tipologia.

Nel caso di arrivi stocastici, invece, bisogna determinare il valore delle grandezze: numero totale di corse NC, tempo medio di occupazione TO.

Il numero complessivo di corse di data architettura $a \in \{B, C\}$ in attestamento nel nodo capolinea k-esimo nell'ora di punta può essere determinato secondo il seguente algoritmo:

$$NC_a^{k*} = x_k \cdot \sum_l x_{al} \cdot NC_l^{k*}$$

dove:

NC_a^{k*} : n° di corse di architettura $a \in \{B, C\}$ in arrivo nel capolinea $k \in K$ nell'ora di punta [incognita]

NC_l^{k*} : n° di corse della linea $l \in L$ in arrivo nel capolinea $k \in K$ nell'ora di punta nell'ora di punta

[input da preprocessing]

x_k : 1 se elettrico $k \in K$

[variabile decisionale]

x_{la} : 1 se elettrico $l \in L$ con $a \in \{B, C\}$

[variabile decisionale]

Il tempo medio di occupazione di una postazione di ricarica TO, invece, è dato dalla somma del tempo netto medio di ricarica TM e dei perditempo PK.

³ L'ipotesi è giustificata anche dal fatto che si tende a collocare le stazioni di ricarica in modo da soddisfare il criterio di equidistanza per il massimo valore di distanza ammissibile

$$TO_a^{k*} = TM_a^{k*} + PK$$

dove:

TO_a^{k*} : tempo medio di occupazione di una postazione di ricarica di un veicolo di architettura $a \in \{B, C\}$ nel capolinea $k \in K$ nell'ora di massimo afflusso h^*

TM_a^{k*} : tempo medio netto di ricarica di un veicolo di architettura $a \in \{B, C\}$ nel capolinea k -esimo nell'ora di massimo afflusso h^*

PK : perditempo di connessione/disconnessione nei nodi capolinea (costante di progetto)

Il tempo medio netto di ricarica TM di un determinato insieme di veicoli in un determinato periodo è, per definizione, dato dal rapporto fra tempo complessivo di ricarica TR e n° di veicoli da dover ricaricare, pari al n° delle corse in arrivo.

$$TM_a^{k*} = TR_a^{k*} / NC_a^{k*}$$

Per applicare la formula del dimensionamento delle postazioni di ricarica, è necessario fissare il valore del massimo tempo di servizio TS ; tale valore può essere stabilito sulla base dei tempi di sosta stabiliti da programma di esercizio.

5.3 Dimensionamento della infrastruttura di ricarica alle fermate

Anche in questo caso il dimensionamento delle stazioni di ricarica alle fermate per le quali sia ipotizzata l'appartenenza al sistema dei nodi di ricarica LR ($x_f = 1$) è da effettuarsi in relazione all'ora critica, ovvero all'ora in cui si verifica il maggiore numero di transiti dal nodo fermata delle linee elettrificate con C nel sistema S^* .

Assumendo ancora un tempo fisso di ricarica per tutti i veicoli, variabile solo in funzione della classe dimensionale e non del consumo effettivo, il tempo complessivo di occupazione sarà dato da:

$$TR_{hc}^f = x_f \cdot \sum_l x_{lc} \cdot NC_{hl}^f \cdot TO_{lc}^f$$

$$h = h^* \leftrightarrow TR_{hc}^f = (Max)_h = TR_C^{f*}$$

con simbologia analoga a quella vista precedentemente.

In questo caso il TO_{lc}^f assume i seguenti valori: 15'' per veicoli di dimensioni full e 20'' per veicoli di dimensioni maxi.

Si osservi che, nel dimensionamento finale degli impianti, poiché esiste una sola tipologia di impianto con un numero di stalli pari a 1, non è necessario distinguere per R_{max} e R_{min} , per cui il numero di impianti alla generica fermata f -esima sarà dato semplicemente da:

$$R^f = P_a^f = TR_C^{f*} / U_{max}$$

dove U_{max} assume ancora una volta il significato del massimo tasso di utilizzazione imposto, in termini di percentuale in tempo.

5.4 Dati di progetto per il dimensionamento della ricarica nei nodi

Capolinea

E_{lBh}^k : energia da ricaricare nella fascia oraria $h \in [1 \div FH]$ nel capolinea $k \in K$ dai veicoli della linea $l \in L$ elettrificata con B [input da preprocessing]

W_{lB} : potenza media di ricarica di un veicolo di l di architettura B
[costante di progetto funzione della classe veicolare attributo di l]

PK : perditempo di connessione/disconnessione nei nodi capolinea [costante di progetto]

$Nmax_B^K$: n° massimo di postazioni degli impianti al capolinea per arch. B [costante di progetto]

NC_{hl}^k : n. di corse della linea $l \in L$ elettrificata con C in arrivo al capolinea $k \in K$ nella fascia oraria $h \in [1 \div FH]$
[input da preprocessing]

TO_{lC}^k : tempo di occupazione di una ricarica al capolinea per veicoli di architettura C
[costante di progetto funzione della classe veicolare attributo di l]

$Nmax_C^K$: n° massimo di postazioni degli impianti al capolinea per arch. C [costante di progetto]

Fermate

NC_{hl}^f : n. di corse della linea $l \in L$ elettrificata con C in arrivo alla fermata $f \in F$ nella fascia oraria $h \in [1 \div FH]$
[input da preprocessing]

TO_{lC}^f : tempo di occupazione di una ricarica alla fermata per veicoli di architettura C
[costante di progetto funzione della classe veicolare attributo di l]

6 Formulazione approssimata

6.1 Approccio generale

In considerazione della complessità di elaborazione del dimensionamento puntuale della ricarica ai nodi capolinea ed ai nodi fermate, esaminata nel precedente capitolo, si è cercato un modo per bypassare il processo “esatto” sfruttando l’opportunità di disporre degli output del software BEST sui costi disaggregati stimati per singola linea di linea, indicati di seguito.

$$[IL_l^T, IL_{la}^E, CL_l^T, CL_{la}^E, IN_{la}^{nE}, CN_{la}^{nE}] = BEST_a(l) \forall l \in L, \forall a \in \{A, B, C\}, \forall n \in \{D, C, F\}$$

dove L indica un costo di linea e N un costo di nodo e quindi:

IL_l^T : investimento per l’acquisto dei veicoli per la linea $l \in L$ in assenza di elettrificazione

IL_{la}^E : investimento per l’acquisto di veicoli, accumulo di bordo, stazioni di ricarica) con elettrificazione della linea $l \in L$ per l’architettura $a \in \{A, B, C\}$

CL_l^T : costo operativo della linea $l \in L$ in assenza di elettrificazione

CL_{la}^E : costo operativo della linea $l \in L$ per l’architettura $a \in \{A, B, C\}$ in caso di elettrificazione

IN_{la}^{nE} : investimento per il nodo di tipo $n \in \{D, C, S\}$ in caso di elettrificazione della linea l con architettura $a \in \{A, B, C\}$

CN_{la}^{nE} : costo operativo del nodo di tipo $n \in \{D, C, S\}$ in caso di elettrificazione della linea l con architettura $a \in \{A, B, C\}$.

Sono soggetti a vincolo di budget tutti i costi di investimento.

I costi di linea IL e CL, assumendo di dimensionare le flotte in relazione alle necessità delle singole linee, senza considerare possibilità di intercambiabilità dei veicoli fra linee, se non per circostanze particolari, non risentono delle economie di scala che possono prodursi dall’aggregazione di più linee. Di conseguenza nel calcolo del budget e della F.O. i “costi di linea” possono essere forniti direttamente dal modulo BEST per tutte le architetture {A, B, C} e per tutte le tipologie di nodo {D, C, F}, senza ulteriori elaborazioni.

Per i costi di nodo, invece, nell’analisi di rete sono attese riduzioni in considerazione di economie di scala e quindi, in linea di principio, per utilizzare gli output di Best, si possono applicare dei coefficienti K^{na} di riduzione dei costi di nodo, variabili in funzione della tipologia di nodo per tipologia di nodo $n \in \{C, S\}$ e per tipologia di architettura $a \in \{B, C\}$.

Fatte queste considerazioni la funzione obiettivo si modifica come di seguito riportato:

$$\begin{aligned} \max \sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A, B, C\}} & \left((IL_l^T + CL_l^T) - (IL_{la}^E + CL_{la}^E) - (IN_{la}^{DE} + CN_{la}^{DE}) \right) \cdot X_{la} \\ & - \sum_{l \in L} \sum_{n \in \{C, S\}} \sum_{a \in \{B, C\}} K^{na} \cdot (IN_{la}^{nE} + CN_{la}^{nE}) \cdot X_{la} \end{aligned}$$

Analogamente il vincolo di budget si modifica come segue:

$$K \cdot I^M \leq \sum_{l \in L} \sum_{a \in \{A, B, C\}} (IL_{la}^E + IN_{la}^{DE}) \cdot X_{al} + \sum_{l \in L} \sum_{n \in \{C, S\}} \sum_{a \in \{B, C\}} K^{na} \cdot IN_{la}^{nE} \cdot X_{al} \leq I^M$$

6.2 Forma dei Coefficienti K

I coefficienti precedentemente introdotti sono dipendenti dalla Sottorete $\bar{S}^*$ in esame e, più specificatamente, dalla misura in cui le varie linee della sottorete convergano nei diversi nodi capolinea e nei diversi nodi fermata.

Si può pensare di scrivere i K^{na} , che chiameremo “di rete”, come combinazioni lineari di costanti k^{na} , che chiameremo “di nodo”, come di seguito specificato.

Per esempio, il coefficiente relativo ai costi di nodo nei capolinea per una generica architettura a sarà dato da:

$$\bar{K}^{Ca} = \sum_{La=1}^{\bar{La}} \frac{\bar{C}_{La}}{\bar{C}} * k_{La}^C$$

Dove:

a è la generica architettura di ricarica, con $a \in \{B, C\}$

$\bar{K}^{Ca}$ è il coefficiente ≤ 1 da applicare al totale dei costi di nodo capolinea per architettura a , per la sottorete $\bar{S}^*$

$\bar{C}$ è il numero totale di capolinea nella sottorete $\bar{S}$

$\bar{La}$ è il numero massimo di linee di architettura a convergenti in un qualsiasi capolinea della Sottorete $\bar{S}^*$ in una qualsiasi fascia oraria della giornata

L_a è il numero di linee di architettura a convergenti in un generico capolinea della sottorete $\bar{S}$, nell'ora più critica, con $L_a = \lceil 1 \div \bar{La} \rceil$

$\bar{C}_{La}$ è il numero di capolinea su cui, nell'ora più critica, convergono L_a linee di architettura a della sottorete $\bar{S}^*$

k_{La}^C è il coefficiente di proporzionalità dei costi nodo capolinea per un numero di corse di architettura a pari a L_a .

Nella formula precedente il rapporto $\frac{\bar{C}_{La}}{\bar{C}}$ rappresenta il peso da dare al valore di k_{La}^C per la sottorete $\bar{S}^*$.

Si può pensare anche di legare il $\bar{K}^{Ca}$ alla convergenza delle corse, piuttosto che delle linee; in questo caso la funzione assumerebbe la seguente forma:

$$\bar{K}^{Ca} = \sum_{Ta=1}^{\bar{Ta}} \frac{\bar{C}_{Ta}}{\bar{C}} * k_{Ta}^C$$

Dove:

$\bar{Ta}$ è il numero massimo di corse di architettura a convergenti in un qualsiasi capolinea della Sottorete data in una qualsiasi fascia oraria della giornata

T_a è il numero di corse di architettura a convergenti in un generico capolinea della sottorete $\bar{S}$, nell'ora più critica, con $T_a = \lceil 1 \div \bar{Ta} \rceil$

$\bar{C}_{Ta}$ è il numero di capolinea su cui, nell'ora più critica, convergono T_a corse di architettura a nella sottorete $\bar{S}^*$

k_{Ta}^C è il coefficiente di proporzionalità dei costi nodo capolinea per un numero di corse di architettura a pari a T_a .

Il rapporto $\frac{\bar{C}_{Ta}}{\bar{C}}$ rappresenta il peso da dare al valore di k_{Ta}^C per la sottorete $\bar{S}^*$.

I k_{La}^C e k_{Ta}^C a loro volta sono determinati a valle di un'analisi *una tantum* dei costi di nodo che stimi il rapporto fra i costi di nodo calcolati considerando le linee singolarmente prese e i costi di nodo calcolati considerando l'insieme delle linee o delle corse.

L'analisi studierà una sufficiente casistica dei parametri La e Ta sino a determinare i valori di k_{La}^C e di k_{Ta}^C e il loro intervallo di confidenza. Si esclude per il momento l'analisi relativa alle fermate, che si rimanda al successivo anno di ricerca.

L'analisi comporta il calcolo, per più linee prese singolarmente e per lo stesso insieme di linee considerate nel loro complesso, dei costi di nodo, intesi come somma degli investimenti necessari all'installazione delle stazioni di ricarica e dei costi operativi annuali, dati a loro volta dalla somma dei costi per impegno di potenza, per allacci alla rete elettrica e per manutenzione. Per semplicità, nella stima dei k di nodo, sono stati considerati solo i costi d'investimento, tenuto conto di una certa proporzionalità fra investimenti e costi operativi.

Come evidenziato a proposito delle procedure di dimensionamento della ricarica nei nodi (vedi capitolo precedente), si pone il problema di quale distribuzione degli arrivi sia corretto adottare nei due casi di singola linea e più linee.

Nel primo caso, è abbastanza scontato assumere, all'interno di una fascia oraria omogenea, una distribuzione regolare e deterministica, in quanto il fenomeno è, almeno sulla carta, programmato. Per ovviare ad una certa aleatorietà del fenomeno, si introduce un coefficiente di sicurezza.

Per più linee è stato analizzato l'andamento dei costi di nodo sia ipotizzando una distribuzione regolare e deterministica degli arrivi sia ipotizzando una distribuzione esponenziale, relativa a fenomeni poissoniani.

6.3 Studio dei coefficienti di riduzione dei costi di nodo capolinea per linee di architettura B

Per la determinazione dei valori dei k_{La}^C e k_{Ta}^C di nodo capolinea sono stati utilizzati i dati relativi alla rete di Firenze, che rappresenta, come specificato nel successivo capitolo, il caso di studio su cui si è scelto di effettuare la validazione degli algoritmi di ricerca della soluzione ottimale, affidati alle Università co-beneficiarie.

Per fare questo, è stato realizzata preventivamente un'analisi sulla convergenza delle linee nei diversi nodi capolinea nell'ora di punta della rete del TPL urbano di Firenze [07:00-08:00], da cui è emerso, come in parte era atteso, che la maggior parte dei nodi capolinea (poco più del 50%) non sono condivisi da più linee mentre il 22% sono condivisi da solo due linee. All'aumentare del numero di linee condivise scende la percentuale dei nodi capolinea sul totale, come mostrato nella Figura 4 seguente. A Firenze un solo nodo condivide 11 linee, gli altri al massimo 5.

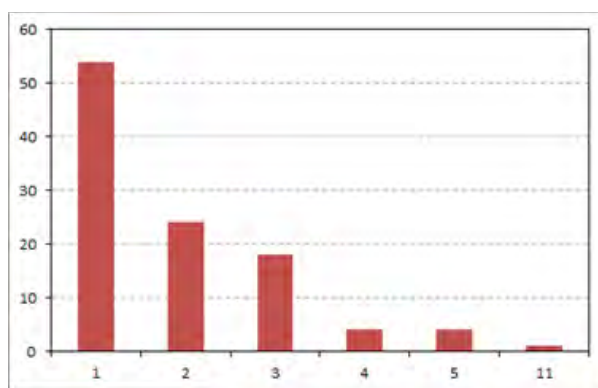


Figura 4: Indice di convergenza nei nodi capolinea a Firenze

Per lo studio del k di nodo appare naturale cominciare ad analizzare cosa accade nei nodi a maggiore convergenza, modificando a piacere il numero e la composizione delle linee in essi convergenti.

Per esempio considerando il nodo su cui convergono 11 linee (Id 2369), si dispone di 2036 possibili combinazioni, distribuite come di seguito specificato in funzione della classe di numerosità delle linee considerate, ottenendo una casistica piuttosto significativa per il calcolo del k di nodo, specie per bassi valori del numero di linee convergenti.

Tabella 5: N. di combinazioni possibili in funzione della numerosità degli elementi

Classe di Numerosità delle linee	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Totale
Numero di combinaz.	55	165	330	462	462	330	165	55	11	1	2036

Le undici linee del nodo 2369 possiedono le seguenti caratteristiche rilevanti per il calcolo dei k di nodo.

Tabella 6: Caratteristiche delle linee convergenti nel capolinea 2369 di Firenze

#linea	n. percorsi	n. corse ora di punta	intertempo medio fra arrivi	tempo medio corsa	tempo medio di ricarica	perditempo medio di connessione	tempo medio occupazione postazione ricarica
		n. corse	h	minuti/corsa	h/veicolo	h/veicolo	h/veicolo
1	1	4	0,250	35,25	0,080	0,033	0,113
2	1	3	0,333	37,35	0,083	0,033	0,117
3	1	4	0,250	29,55	0,063	0,033	0,096
4	1	5	0,200	39,92	0,092	0,033	0,125
5	1	5	0,200	19,85	0,046	0,033	0,079
6	1	5	0,200	55,19	0,121	0,033	0,155
7	1	4	0,250	33,75	0,078	0,033	0,111
8	1	12	0,083	26,34	0,059	0,033	0,093
9	1	4	0,250	27,38	0,058	0,033	0,091
10	1	6	0,167	25,70	0,060	0,033	0,093
11	2	10	0,100	19,74	0,045	0,033	0,078

Applicando l'algoritmo di calcolo precedentemente illustrato si ottengono i seguenti valori di dimensionamento del sistema di ricarica per le singole linee; il numero minimo di postazioni corrisponde

all'accettazione di un valore massimo del tasso medio di utilizzazione U_{max} pari a 1 mentre il numero più elevato corrisponde ad un valore di U_{max} pari a 0,7.

Tabella 7: Postazioni di ricarica necessarie per le singole linee del capolinea 2369 di Firenze

#linea	N. postazioni per $U_{max}=1$	T.U. postazioni per $U_{max}=1$	N. postazioni per $U_{max}=0,7$	T.U. postazioni per $U_{max}=0,7$	N. Impianti dual	N. Impianti mono
1	1	0,45	1	0,45	0	1
2	1	0,35	1	0,35	0	1
3	1	0,38	1	0,38	0	1
4	1	0,63	1	0,63	0	1
5	1	0,40	1	0,40	0	1
6	1	0,77	2	0,39	1	0
7	1	0,44	1	0,44	0	1
8	2	0,56	2	0,56	1	0
9	1	0,36	1	0,36	0	1
10	1	0,56	1	0,56	0	1
11	1	0,78	2	0,39	1	0

Si osservi che, per un U_{max} pari a 1, solo una linea richiede più di una postazione di ricarica e per altre due linee il T.U. medio è superiore a 0,7. Ponendo quindi il limite di U_{max} a 0,7 il numero di linee con più postazioni necessarie sale a 3.

Anche con una sola postazione di ricarica, il tasso medio di utilizzazione è molto spesso al di sotto del 50% (6 volte su 8); nel complesso, per un $U_{max}=0,7$, il tasso medio di utilizzazione è 8 volte su 11 al di sotto del 50%, per un valore medio sull'insieme delle linee pari a 45%, che lascia spazio a ricariche di altre linee, come atteso.

Dal numero di postazioni richieste, con i passaggi illustrati in precedenza, si passa al numero di impianti di tipo mono e dual e da questi al costo di nodo (investimento).

Nell'ipotesi di distribuzione deterministica regolare degli arrivi ed accettando un U_{max} di 0,7 anche per gli insiemi di linee convergenti nel nodo (variabili per numerosità e composizione) si ottengono gli andamenti del k di nodo illustrati di seguito, in funzione del n. di linee e del n. di corse dell'ora di punta del nodo.

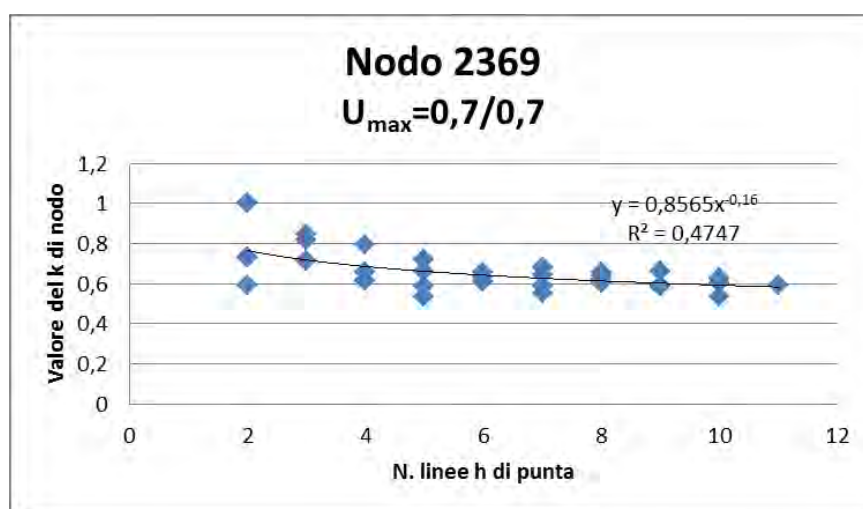


Figura 5: k di nodo capolinea in funzione del n° di linee convergenti per un $U_{max} = 0,7$ sia per linea che insieme di linee

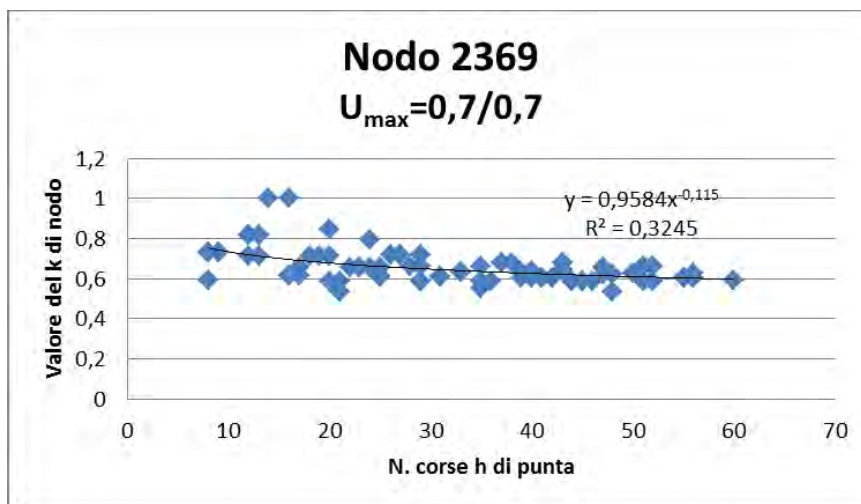


Figura 6: k di nodo capolinea in funzione del n° di corse convergenti per un $U_{max} = 0,7$ sia per linea che insieme di linee

La forma funzionale esponenziale sembra adattarsi abbastanza bene all'andamento generale, con un R^2 più elevato nel caso della correlazione del k col numero di linee piuttosto che col numero di corse.

Il k di nodo capolinea si attesta attorno al valore di 0,7 già per due linee, adagiandosi lentamente sul valore asintotico di 0,6. Il k quindi non risente di una grande variabilità al variare del numero di linee all'interno di intervalli usuali e dimostra che già per due linee ci si può attendere una riduzione del 30% dei costi di nodo rispetto alla stima effettuata sulla somma delle singole linee.

Si è voluto esaminare l'andamento della funzione riducendo il limite U_{max} nell'analisi sull'insieme delle linee (lasciandolo a 0,7 per l'analisi sulle singole linee), con l'intento di tenere in considerazione che gli arrivi di più linee possono risentire di una maggiore irregolarità rispetto a quelli di singole linee. Si sono ottenuti i risultati illustrati di seguito.

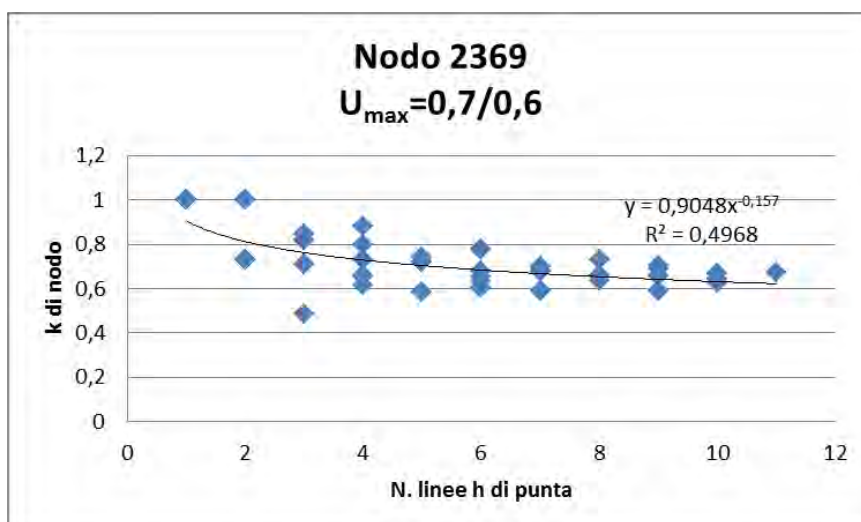


Figura 7: k di nodo capolinea in funzione del n° di linee convergenti per un $U_{max} = 0,7$ per linea e $U_{max}=0,6$ per insieme di linee

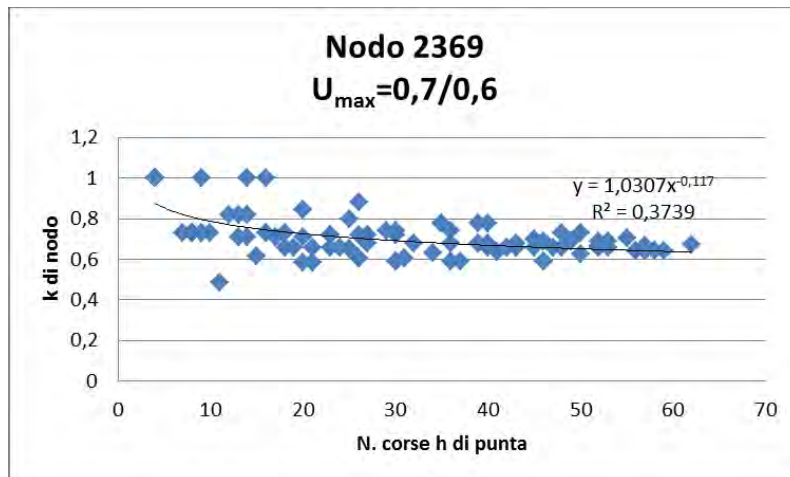


Figura 8: k di nodo capolinea in funzione del n° di corse convergenti per un $U_{max} = 0,7$ per linea e $U_{max}=0,6$ per insieme di linee

Si verificano valori di R^2 leggermente superiori che nel caso precedente e, soprattutto, un andamento delle funzione meno “piatto” e, naturalmente, spostato verso valori più alti.

Cosa succederebbe, infine, se ferme restando le ipotesi sull’analisi per linea, si supponesse una distribuzione poissoniana degli arrivi di più linee?

La risposta è nei grafici seguenti, da cui si evince che si verificherebbe il paradosso per cui anziché economie di scala si otterrebbero diseconomie, almeno al di sotto di un certo numero di linee (sei).

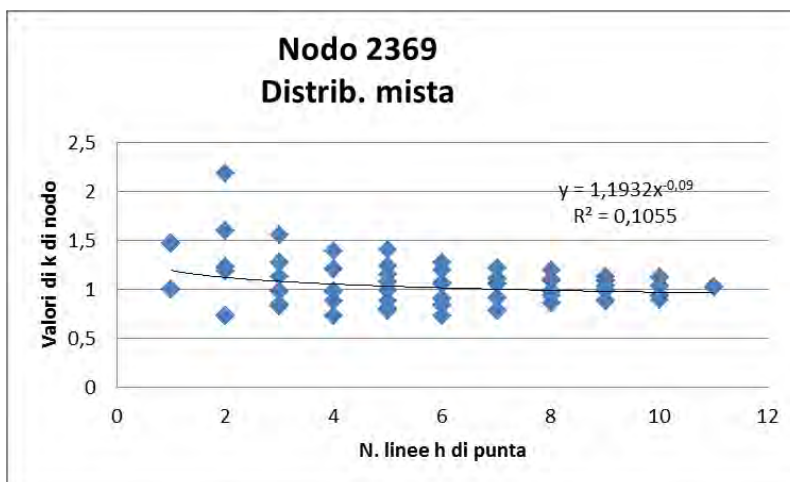


Figura 9: k di nodo capolinea in funzione del n° di linee convergenti per una distribuzione deterministica regolare degli arrivi delle singole linee e una distribuzione esponenziale per insiemi di più linee

Tale ipotesi è ovviamente da scartare e serve solo a dimostrare l’importanza di coordinare opportunamente gli arrivi di più linee nel nodo affinché si producano economie di scala effettive.

Stante la difficoltà operativa di effettuare tale coordinamento, sembra invece opportuna l’ipotesi di considerare un coefficiente di sicurezza maggiore sul tasso di utilizzazione delle postazioni nel caso di più linee, come per l’analisi precedente; questo è tanto più vero quanto più elevato è il numero di linee.

La questione richiede un approfondimento mediante simulazione di numerosi casi reali che tenga conto degli orari programmati di arrivo delle corse e consideri per ciascuno di essi una curva di probabilità in relazione ai fattori esogeni di impedimento al rispetto della programmazione. Tale approfondimento sarà oggetto delle attività del prossimo anno di ricerca.

7 Caso di Studio

Per la verifica degli algoritmi di ricerca dell'ottimo di rete vincolato è stato prescelto il caso di Firenze, su cui è stato applicato il modulo BEST aggiornato (vedi Report RdS/PAR2016/226), per l'analisi di linea.

Di seguito le caratteristiche del caso di studio ed i risultati dell'analisi per linea salienti per gli algoritmi di ricerca dell'ottimo

7.1 Analisi della rete

La rete del TPL su gomma di Firenze è composta da 83 linee e 94 capolinea. L'ora di punta della giornata, in base al numero delle corse effettuate, risulta essere dalle 7 alle 7:59.

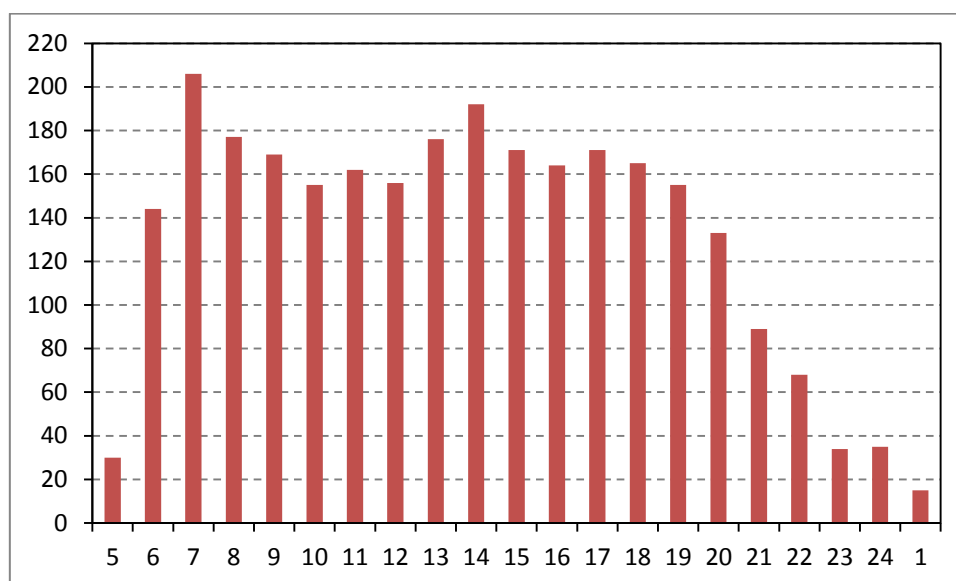


Figura 10: Andamento del numero di corse orarie nell'arco della giornata

Il numero di percorsi per ogni linea della rete è molto variabile (Figura 11). La maggior parte delle linee (circa il 40%) presenta due percorsi, uno in andata e l'altro in ritorno, un ulteriore 8% si compone di tre percorsi, il restante 52% di più di 4 percorsi. Presenti diversi casi con più di sette percorsi, sino ad arrivare ad un valore massimo di venti percorsi.

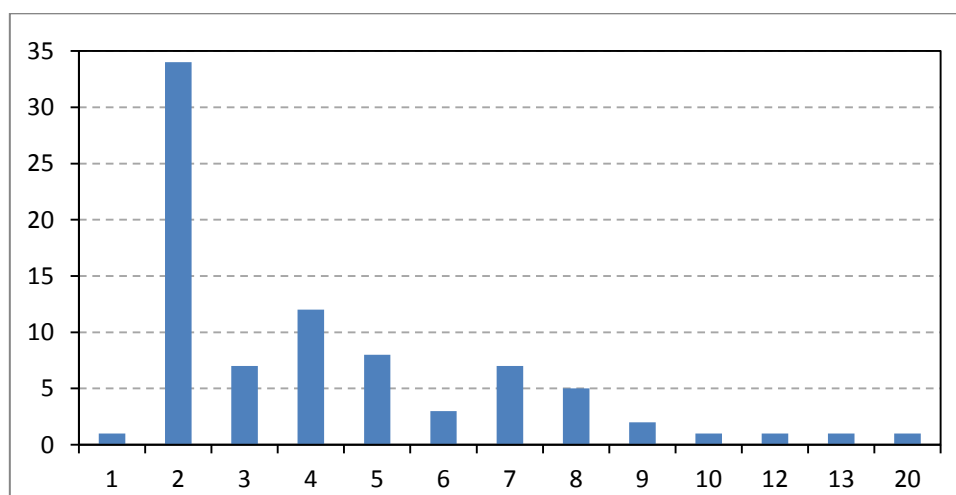


Figura 11: Numero percorsi per linea

Il numero di capolinea per linea varia da 1 a 6. La maggior parte delle linee hanno 4 capolinea. In BEST per l'architettura B non vengono analizzati i casi con più di 3 capolinea, quindi per il 23% delle linee di Firenze non si esamina questo tipo di architettura.

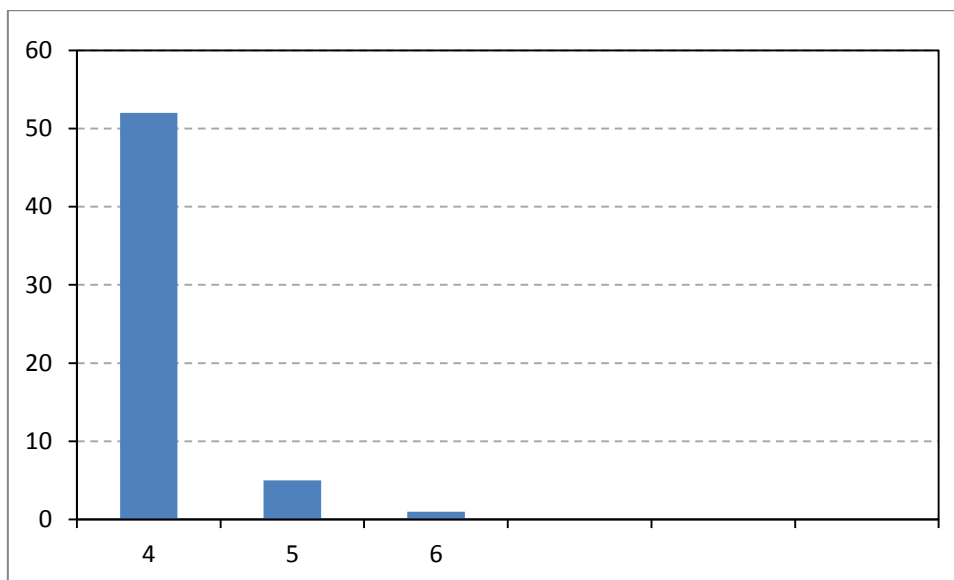


Figura 12: Numero capolinea per linea

7.2 Risultati dell'analisi per linea

Dall'analisi dei risultati di Best emerge che 81 linee risultano elettrificabili. La tabella mostra che sono elettrificabili con l'architettura B in totale 64 linee, 69 con la A mentre con la C sono elettrificabili soltanto 30 linee.

Tabella 8: N. di linee elettrificabili per tipologia architettura

Arch. A, B, C	Arch. B, C	Arch. A, B	Arch. A	Arch. B
26	4	26	17	8

Focalizziamo l'analisi sulle linee elettrificabili con B, per le quali vogliamo verificare il possibile "effetto rete" in quest'anno di ricerca.

Delle 64 linee elettrificabili con B, 8 sono convenienti in assoluto, con scarti di costo rispetto al diesel e all'architettura A (dove fattibile) illustrati nella seguente Tabella 9.

Tabella 9: Linee in cui B è fattibile e conveniente su A e Diesel

Scarto Costi	B vs Diesel	B vs A
-0÷10%	7	5
-10÷20%	1	

Dei 58 casi in cui l'architettura B, pur essendo fattibile, non è conveniente almeno rispetto ad una delle altre possibili alternative, lo scarto di costo è quello riassunto nella seguente Tabella 10, che mostra una grande variabilità di situazioni.

Tabella 10: Linee in cui B è fattibile ma non conveniente vs A e Diesel

Scarto Costi	B vs Diesel	B vs A
>50%	23	18
50÷40%	4	2
40÷30%	4	4
30÷20%	4	4
20÷10	7	4
10÷0%	13	14

Per le 20 linee il cui scarto di costo più basso non supera il 20%, è lecito attendersi che le economie di scala eventualmente determinate dalla condivisione delle stazioni di ricarica nei capolinea possano renderle convenienti. Analizzando la condivisione dei capolinea, si verifica che 6 delle 20 linee suddette non condividono nessun capolinea, 8 ne condividono uno e 6 ne condividono 2. In sostanza le linee che potrebbero trarre beneficio dall'effetto rete sono 14.

Si osservi però che nell'analisi effettuata con BEST è stata esclusa l'elettrificazione con B per le linee con più di 3 capolinea, ma in un'ottica di rete sarebbe opportuno considerare l'elettrificazione con l'architettura B anche con più capolinea.

8 Conclusioni

L'attività ha conseguito l'obiettivo prefissato, avendo messo le Università co-beneficiarie nelle condizioni di acquisire le specifiche del problema di ottimo da affrontare informaticamente e di condividere un approccio risolutivo generale e alcune possibili approssimazioni di calcolo.

La procedura proposta, comprendente un pre-processing dei dati di base e l'impiego del modulo BEST per "anticipare" alcuni calcoli altrimenti eccessivamente onerosi all'interno di algoritmi non lineari, è risultata determinante per il buon esito delle attività di sviluppo algoritmico e informatico.

Lo stesso può dirsi in merito alla formulazione approssimata della funzione obiettivo e della funzione per il calcolo del budget sottoposto a vincolo, che peraltro ha richiesto lo studio di coefficienti parametrici da applicare nelle funzioni stesse.

Considerata la notevole complessità del problema affrontato, per il presente anno di ricerca l'analisi è stata limitata a soluzioni di elettrificazione con ricarica a deposito e a capolinea, riservandosi di affrontare il problema nella sua complessità, comprendendo quindi anche la possibilità di ricarica alle fermate lungo linea, nel prossimo anno di ricerca.

Riguardo al caso di studio proposto, la rete di Firenze, l'analisi ne ha rivelato alcune specificità non sempre adatte al test degli algoritmi di ricerca dell'ottimo, con particolare riferimento alla molteplicità dei percorsi di numerose linee e all'esistenza di diversi capolinea per la medesima linea. Ciononostante si è potuto verificare la possibilità di elettrificare un congruo numero di linee, sufficiente a testare l'efficacia degli algoritmi. Ci si riserva tuttavia di considerare altre realtà nel prossimo anno di ricerca.

9 Riferimenti bibliografici

1. Ilia Negri, “Appunti del corso di Modelli stocastici e analisi del dato”, 15 Marzo 2010
2. Raffaele Pesenti, dispense di “Teoria delle code o file d’attesa”.
3. Giovanna Serratore, relatore Mauro Gamberi. Tesi di Laurea “Teoria delle code per il dimensionamento del buffer”, Università degli studi di Padova, 2014
4. M. De Marco, “Corso di Fondamenti di Rete di telecomunicazioni, esercizi di teoria delle code”, anno 2006/2007
5. Alessandro Orlandi, “Elementi di Teoria delle file d’attesa con applicazione ai trasporti” Pitagora editrice Bologna.
6. Università di Roma “La Sapienza”, Corso di Laurea in Ingegneria Informatica, “Appunti dalle lezioni di Ricerca Operativa”, Anno Accademico 2003-2004
7. G. Fusco, A. Alessandrini, C. Colombaroni, F. Giubilei, “Deliverable 1: Scenari di elettrificazione della rete di trasporto pubblico a Roma – Il fabbisogno energetico”, Report Ricerca di Sistema Elettrico, 2013 (report Rds/2012/131)
8. G. Fusco, A. Alessandrini, C. Colombaroni, and M. P. Valentini, “A model for transit design with choice of electric charging system,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 87, 2012.
9. A. Kunith, R., Mendelevitch, A., Kuschmierz, D., Göhlich “Optimization of fast charging infrastructure for electric bus systems – Electrification of a city bus network”, EVS29 International Electric Vehicle Symposium, Montreal, 2016