



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi delle interdipendenze in infrastrutture elettriche e dei trasporti per il supporto alle decisioni

S. Guarino, M. Papi, G. Oliva, R. Setola, F. Smarrazzo, L. Vollero



Analisi delle interdipendenze in infrastrutture elettriche e dei trasporti per il supporto alle decisioni

S. Guarino, M. Papi, G. Oliva, R. Setola, F. Smarrazzo, L. Vollero

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: *LA1.42 - Servizi Urbani Energivori: Analisi delle interdipendenze in infrastrutture elettriche e dei trasporti per il supporto alle decisioni*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Facoltà Dipartimentale di Ingegneria, Università Campus Bio-Medico di Roma per una attività di ricerca dal titolo: "Analisi delle interdipendenze in infrastrutture elettriche e dei trasporti per il supporto alle decisioni"

Responsabile scientifico ENEA: Antonio Di Pietro

Responsabile scientifico Università Campus Bio Medico di Roma: Gabriele Oliva

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 OBIETTIVO DEL PRESENTE DOCUMENTO.....	5
1.2 CONTRIBUTO RISPETTO LO STATO DELL'ARTE	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	9
2.1 NOTAZIONE	9
2.2 ELEMENTI DI TEORIA DI GRAFI.....	9
2.3 PROBLEMA DI ASSEGNAZIONE A COSTO MINIMO.....	10
2.3.1 <i>Fase di matching</i>	11
2.3.2 <i>Zero creation phase</i>	12
2.4 INCOMPLETE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS	13
2.4.1 <i>Approccio ILLS ad AHP</i>	14
2.4.2 <i>Molteplici opinioni a fattor comune</i>	15
2.5 PROBLEMA DI ASSEGNAZIONE DEL COSTO MINIMO BASATO SU CRITERI MULTIPLI.....	16
2.6 CIPCAST DECISION SUPPORT SYSTEM.....	17
2.6.1 <i>Repair assignment module</i>	19
2.7 USE CASE	21
3 VALIDAZIONE DELL'APPROCCIO PROPOSTO	23
4 CONCLUSIONI	34
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	35
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	38
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	39

Sommario

Nel presente documento presentiamo una nuova metodologia di supporto alle decisioni al fine di prioritizzare gli interventi di riparazione sulle reti elettriche. Nello specifico, consideriamo uno scenario in cui gli interventi tecnici devono essere realizzati in luoghi diversi e devono essere assegnati equipaggi diversi per eseguirli. La strategia proposta combina il processo decisionale multi-criterio e l'assegnazione dei compiti. Nel dettaglio, consideriamo diverse metriche contrastanti che caratterizzano il “costo” dell'assegnazione di un equipaggio a una posizione e le combiniamo in un indice olistico di costo. Quest'ultimo indice è costituito da una somma ponderata, dove i pesi sono elicitati da esperti utilizzando la metodologia incompleta del processo di gerarchia analitica. In particolare, l'approccio proposto combina l'opinione di diversi esperti e decisori, cercando un compromesso tra gli esperti. La strategia proposta è implementata come modulo nel sistema di supporto alle decisioni CIPCast; i risultati sono rappresentati su una piattaforma web GIS che fornisce servizi operativi per il monitoraggio e l'analisi dei rischi delle Infrastrutture Critiche, consentendo di fornire informazioni su diverse misure rilevanti per stimare le strategie di intervento sulle reti di distribuzione di energia in caso di guasti di rete.

L'efficacia dell'approccio proposto è stata validata attraverso un caso di studio realistico sulla rete di distribuzione elettrica della Città di Roma.

1 Introduzione

Le infrastrutture critiche (CI) sono sistemi essenziali per l'efficienza, la sicurezza e il corretto funzionamento di una nazione [1]. Esempi di CI includono reti per la trasmissione e distribuzione di acqua ed energia, reti di telecomunicazioni e sistemi viari come strade e ferrovie. Tali sistemi, interagendo tra loro, sono in grado di generare servizi di alto livello, come servizi sanitari, finanziari ecc. Una gestione efficiente di tali infrastrutture è fondamentale per garantire la continuità e la qualità dei servizi erogati. Ritardi o cattive strategie di ripristino dopo guasti o disastri potrebbero portare a gravi inefficienze con perdite insostenibili di tempo, denaro e risorse, oltre a gravi conseguenze per i cittadini. Sulla base di tali premesse, piattaforme complesse che fungono da *Decision Support System* (DSS) possono svolgere un ruolo cruciale nell'aiutare gli operatori ad adottare le migliori strategie di ripristino nel più breve tempo possibile. L'efficacia di tali DSS è stata ampiamente dimostrata dalla letteratura scientifica. Ad esempio, in [2] R. Sharda e co-autori hanno esaminato l'efficacia di decisori assistiti da DSS rispetto al caso di decisioni prese senza il supporto di un DSS per un periodo di otto settimane. I risultati hanno mostrato come il gruppo supportato dal DSS abbia assunto decisioni significativamente più efficaci in un gioco di simulazione aziendale rispetto agli avversari che non avevano a disposizione un DSS. I DSS sono ampiamente utilizzati per supportare le decisioni umane in molti campi decisionali critici come i trasporti [3], la diagnosi clinica [4] e la gestione delle infrastrutture [5]. In [3], gli autori hanno proposto un sistema DSS basato su una piattaforma Geographic Information Systems (GIS) per la pianificazione delle policy di trasporto urbano nell'area di Atene in Grecia. In [4], gli autori hanno sviluppato un DSS clinico che utilizza le conoscenze di esperti medici per la diagnosi precoce delle malattie cardiache sulla base di metodi di diagnosi assistita da computer. In [5], gli autori hanno applicato un DSS alle infrastrutture stradali al fine di identificare i migliori progetti di ripristino degli asset sulla base di dati riguardanti la condizione esistente, il rischio del suo utilizzo, i costi del ciclo di vita e l'età.

1.1 Obiettivo del presente documento

L'obiettivo di questo documento è quello di presentare le attività svolte nell'ambito della Linea di Attività LA1.42 "Servizi Urbani Energivori: Analisi delle interdipendenze in infrastrutture elettriche e dei trasporti per il supporto alle decisioni", svolta nel contesto dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021. Nello specifico, l'attività, svolta dalla Facoltà Dipartimentale di Ingegneria dell'Università

Campus Biomedico di Roma, mirava a migliorare le strategie di riconfigurazione della rete elettrica di distribuzione e della rete viaria della città di interesse in funzione di previsioni di eventi naturali attraverso l'utilizzo di tecniche di ottimizzazione e di analisi dei grafi. In particolare, l'attività aveva i seguenti obiettivi:

- Analisi del grafo stradale in funzione delle tratte eventualmente interrotte/congestionate a causa di eventi naturali (e.g., sismici, meteorologici) per la ricerca di isole o aree isolate contenenti importanti Punti di Interesse (PI) della città;
- Pianificazione ottima dei percorsi di squadre di emergenza (SE) per il raggiungimento di PI strategici della città (e.g. prefettura, ospedali);
- Analisi delle interdipendenze tra una rete elettrica di distribuzione e la rete viaria al fine di migliorare (i) le strategie di riconfigurazione della rete elettrica in funzione dello stato della rete viaria e (ii) stimare l'effetto di disservizio degli impianti semaforici in aree critiche.

Per quanto riguarda l'ultimo punto, in particolare sono state implementate delle strategie ottime di *dispatching* e *routing* delle squadre di intervento della rete elettrica (SIRE) attraverso la relativa stima dei tempi di percorrenza in funzione dello stato della rete elettrica. Al fine di svolgere tale task, ci si è avvalsi dell'utilizzo di opportuni servizi di stima del tempo di percorrenza tra sorgente e destinazione.

Per quanto riguarda la rete elettrica, ci si è avvalsi di un modello di rete a media tensione. Nello specifico, ogni linea di media tensione è stata modellata come un albero (ovvero, una rete priva di cicli), avente come radice la Cabina Primaria (CP nel seguito). Le CP rappresentano i punti di interfaccia tra la rete di distribuzione elettrica e la rete di trasmissione. La linea di media tensione collega le diverse Cabine Secondarie (CS) che, come mostrato in Figura 1, si dividono in diverse categorie:

- Cabine Secondarie Normali;
- Cabine Secondarie Telecontrollate. Queste cabine secondarie possono essere controllate da remoto dall'operatore utilizzando il sistema SCADA (Controllo Supervisore e Acquisizione dati);

- Cabine Automatizzate. Queste cabine sono in grado di reagire automaticamente a guasti (*failure*) che avvengono nella rete sottostante.
- Cabine Frontiera. Queste sono le cabine che possono essere utilizzate dall'operatore per alimentare porzioni di una linea con un'altra linea in caso di emergenza. Le cabine frontiera non devono essere necessariamente le foglie dell'albero che rappresenta una linea MT.

Per quel che riguarda la rete viaria, si è considerata una modellazione, propria del location provider adottato, basata sulla teoria dei grafi, caratterizzando la rete tramite nodi (ovvero snodi o incroci) ed archi (collegamenti tra nodi, che schematizzano le strade). Nello specifico, si sono considerati grafi diretti, in cui l'orientamento degli archi rappresenti il senso di marcia. La stima dei tempi di percorrenza considera aspetti quali la posizione spaziale degli incroci, la presenza o meno di lanterne semaforiche, la lunghezza chilometrica dei tratti viari che collegano gli snodi, il tempo nominale di percorrenza e la capacità delle tratte viarie. Inoltre, il tempo effettivo di percorrenza è caratterizzato sulla base del traffico, considerando scenari realistici di vario tipo (ad. es: ora di punta, incidente, etc.). Sulla base di tali reti, è stata sviluppata una nuova metodologia, integrata nel DSS chiamato CIPCast (progettato e realizzato da ENEA per il monitoraggio e l'analisi del rischio delle Infrastrutture Critiche) finalizzata alla prioritizzazione degli interventi di riparazione sulle reti di distribuzione di energia elettrica [6], [7].

Si consideri un *problem setting* relativo all'allocazione di più equipaggi tecnici per la riparazione di elementi guasti nella rete di distribuzione elettrica dislocata in diverse aree urbane. La strategia proposta nella presente LA combina il processo decisionale multi-criterio ed il *task assignment*. In dettaglio, consideriamo diversi criteri come metriche di costo che assegnano un equipaggio a un luogo in cui deve essere eseguito l'intervento e li combiniamo in un indice di costo olistico. Questo è il risultato di una combinazione lineare ponderata, in cui i pesi sono stimati sulla base delle opinioni di esperti attraverso la metodologia *Incomplete Analytic Hierarchy Process*. In particolare, l'approccio proposto combina l'opinione di diversi esperti e decisori, cercando un compromesso tra di loro. A valle dell'identificazione di tale compromesso, la fase di task assignment della metodologia proposta mira ad assegnare le squadre di riparazione alle località di intervento, minimizzando l'indice di costo olistico, sulla base del cosiddetto Algoritmo Ungherese. Il DSS proposto si compone di due moduli: il CIPCast

DSS, una piattaforma GIS capace di fornire informazioni sulla condizione di funzionamento delle cabine che compongono la rete elettrica e un web server che restituisce l'allocazione ottimale delle squadre di riparazione ai luoghi di intervento. L'efficacia dell'approccio proposto è stata validata attraverso un caso studio basato sull'analisi dei guasti della rete di distribuzione elettrica della città di Roma, gestita da Areti S.p.a.

1.2 *Contributo rispetto lo stato dell'arte*

Numerosi lavori hanno affrontato la definizione delle priorità di manutenzione degli elementi della rete elettrica, tenendo conto di molteplici indicatori di possibili contrasti. In [8], viene considerato un problema multi-obiettivo che mira a bilanciare la manutenzione preventiva e correttiva nelle reti di distribuzione di energia. In [9], [10], gli autori introducono un indice per dare priorità agli interventi in una rete elettrica come combinazione ponderata di indici (ad esempio, la frequenza e la durata di un guasto); l'approccio in [9] non discute come calcolare i pesi, mentre in [10] vengono scelti per normalizzare gli indici da sommare. In [11] viene considerato un approccio decisionale multi-criterio per dare priorità alla manutenzione in cui le criticità dei diversi componenti di una rete elettrica vengono valutate sulla base di diversi indici, messi a fattor comune tramite la metodologia *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*.

Si noti come gli approcci di cui sopra si concentrino sulla manutenzione predittiva; tuttavia, tali metodologie non tengono conto del tempo effettivo necessario per l'intervento di emergenza, né del problema di assegnare un luogo di intervento a una squadra di manutenzione. Questi aspetti, considerati nella metodologia proposta in questa LA, rappresentano dunque un importante avanzamento dello stato dell'arte. Ciò è testimoniato anche dal fatto che la metodologia proposta è stata condensata in un articolo scientifico a rivista:

Simone Guarino, Gabriele Oliva, Antonio Di Pietro, Maurizio Pollino and Vittorio Rosato, "A Decision Support System for Prioritizing Repair Interventions on Power Networks", Land, Submitted.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Notazione

Indichiamo i vettori tramite lettere in grassetto, mentre le matrici con lettere maiuscole. Usiamo A_{ij} per indicare la (i, j) -esima voce della matrice A e x_i per la i -esima voce del vettore \mathbf{x} . Inoltre, scriviamo $\mathbf{1}_n$ e $\mathbf{0}_n$ per indicare vettori con n componenti tutte uguali, rispettivamente a uno e zero; allo stesso modo, usiamo $\mathbf{1}_{n \times m}$ e $\mathbf{0}_{n \times m}$ per indicare matrici $n \times m$ con componenti tutte uguali, rispettivamente a 1 e 0. Indichiamo con I_n la matrice di identità $n \times n$. Infine, esprimiamo con $\exp(\mathbf{x})$ e $\ln(\mathbf{x})$ l'esponenziale e logaritmo delle componenti del vettore \mathbf{x} , cioè un vettore tale che $\exp(\mathbf{x})_i = e^{x_i}$ e $\ln(\mathbf{x})_i = \ln(x_i)$.

2.2 Elementi di teoria di grafi

Sia $G = \{V, E\}$ un grafo con n nodi $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ e e archi

$$E \subseteq V \times V \setminus \{(v_i, v_i) \mid v_i \in V\},$$

dove $(v_i, v_j) \in E$ descrive il collegamento dal nodo v_i al nodo v_j . Un grafo si dice *indiretto* se $(v_i, v_j) \in E$ e $(v_j, v_i) \in E$, altrimenti si dice *diretto*. Nel seguito, tratteremo grafi indiretti rappresentando gli archi usando coppie non ordinate $\{v_i, v_j\}$ al posto di due archi diretti $(v_i, v_j), (v_j, v_i)$. Un grafo è connesso se, per ogni coppia di nodi v_i, v_j , esiste un cammino su G che li collega. Sia il vicinato \mathcal{N}_i di un nodo v_i in un grafo indiretto G l'insieme dei nodi v_j che sono collegati a v_i tramite un arco $\{v_i, v_j\}$ in E . Il grado d_i di un nodo v_i in un grafo indiretto G è il numero dei suoi archi entranti, cioè $d_i = |\mathcal{N}_i|$. La matrice dei gradi D di un grafo indiretto G è la matrice diagonale $n \times n$ tale che $D_{ii} = d_i$. La matrice di adiacenza Adj di un grafo diretto o indiretto $G = \{V, E\}$ con n nodi è la matrice $n \times n$ tale che $\text{Adj}_{ij} = 1$ se $(v_i, v_j) \in E$ e $\text{Adj}_{ij} = 0$, altrimenti. La *matrice Laplaciana* associata ad un grafo non orientato G è la matrice L $n \times n$, avente la seguente struttura:

$$L_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{if } \{v_i, v_j\} \in E, \\ d_i, & \text{if } i = j, \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

È noto che L ha un autovalore uguale a zero, e che, nel caso di grafi indiretti, la molteplicità di tale autovalore corrisponde al numero di componenti connesse di G [12], [13]. Pertanto, l'autovalore zero ha molteplicità uno se e solo se il grafo è connesso.

Sia $G_{st} = \{V_s \cup V_t, E_{st}\}$ un grafo bipartito indiretto completo, dove $|V_s| = |V_t| = n$ e l'insieme E_{st} contiene tutti gli archi (s_i, t_j) tali che $s_i \in V_s$ e $t_j \in V_t$. Sia un matching su G_{st} un insieme di archi $E_m \subseteq E_{st}$ senza vertici comuni, mentre un *perfect matching* è un match E_m con esattamente n link. Un nodo del grafo G è coperto dal matching se è l'estremità di un arco nel *matchnig*, ed è libero altrimenti.

2.3 Problema di assegnazione a costo minimo

Consideriamo un grafo bipartito non orientato completo $G_{st} = \{V_s \cup V_t, E_{st}\}$ con $|V_s| = n$, $|V_t| = m$, e sia c_{ij} il costo associato a un arco $(s_i, t_j) \in E_{st}$. Il costo di un matching $\mathcal{M} \subset E_{st}$ è la somma dei costi C_{ij} associati agli archi $(s_i, t_j) \in \mathcal{M}$. Il Problema di Assegnazione consiste nel trovare un *perfect matching* su G_{st} con il minimo costo associato. Questo problema può essere risolto in modo ottimale tramite l'Hungarian Algorithm o Algoritmo Ungherese [14], un algoritmo di ottimizzazione combinatoria che esegue il compito in tempo polinomiale e, in particolare, con una complessità computazionale compresa tra $O(\max\{n, m\}^3)$ e $O(\max\{n, m\}^4)$, a seconda della particolare implementazione. L'algoritmo è stato originariamente concepito per assegnare n attività a n lavoratori riducendo al minimo il costo totale dell'assegnazione. Il costo di assegnazione è rappresentato dalla $n \times m$ matrice di costo C , dove c_{ij} è il costo associato all'assegnazione del i -esimo lavoratore al j -esimo compito.

L'idea principale dell'algoritmo è che, nel caso in cui alcuni costi siano tali che $c_{ij} = 0$, allora l'assegnazione della sorgente i alla destinazione j non aumenta il costo della funzione obiettivo. Se riusciamo a trovare un matching massimo che coinvolge solo archi con $c_{ij} = 0$, possiamo concludere che la soluzione è ottima.

L'algoritmo alterna dunque una fase di matching, in cui viene ricercato un matching massimo che coinvolga solo collegamenti con costo uguale a zero e una fase di *zero creation*, in cui il problema viene convertito in un problema simile in cui un costo fisso è rimosso e aggiunto ai collegamenti selezionati. Durante la fase di *zero creation* vengono generate più voci di costo $c_{ij} = 0$, semplificando la ricerca di un *perfect matching*. Se si trova un matching perfetto con una matrice di costo modificata,

la soluzione trovata è ottimale anche per il problema originario. La procedura viene iterata fino ad ottenere un *perfect matching* a costo zero; il costo dell'incarico prescelto è dato dalla somma dei costi degli archi secondo la matrice di costo originaria. Lo pseudocodice dell'algoritmo ungherese è riportato in Algoritmo 1.

Algorithm 1 Hungarian Algorithm

```

1:  $c_{ij} = c_{ij} - \min_k \{c_{ik}\}, \quad \forall i = 1, \dots, n;$ 
2:  $c_{ij} = c_{ij} - \min_k \{c_{kj}\}, \quad \forall j = 1, \dots, m;$ 
3:  $M = \emptyset;$ 
4: while  $|M| < n$  do
5:    $M = \text{maximum-zero-matching}(C);$ 
6:   Mark rows  $i$  s.t. source  $v_i$  not in  $M$ 
7:   exit-condition = 0;
8:   while exit-condition == 0 do
9:     Mark columns  $j$  s.t.  $c_{ij} = 0$  and  $i$ -th row marked
10:    Mark rows  $i$  s.t.  $c_{ij} = 0$  and  $v_j$  is in  $M$ 
11:    if no new column or row is marked then
12:      exit-condition = 1;
13:    end if
14:  end while
15:   $H_i = \{i : i\text{-th row is marked}\};$ 
16:   $H_j = \{j : j\text{-th column is marked}\};$ 
17:   $\delta = \min_{\{i \in H_i, j \notin H_j\}} \{c_{ij}\};$ 
18:   $c_{ij} = c_{ij} + \delta, \quad \forall i \notin H_i \text{ and } j \in H_j;$ 
19:   $c_{ij} = c_{ij} - \delta, \quad \forall i \in H_i \text{ and } j \notin H_j;$ 
20: end while
    return  $M;$ 

```

2.3.1 Fase di matching

In questa fase viene risolto un problema di massimo matching tenendo conto solo dei link (s_i, t_j) tali che $c_{ij} = 0$. Sono possibili diversi modi per risolvere questo problema in modo ottimale. In seguito, esaminiamo l'algoritmo Hopcroft-Karp [15], che ha una complessità $O(\max\{n, m\}^{\frac{5}{2}})$.

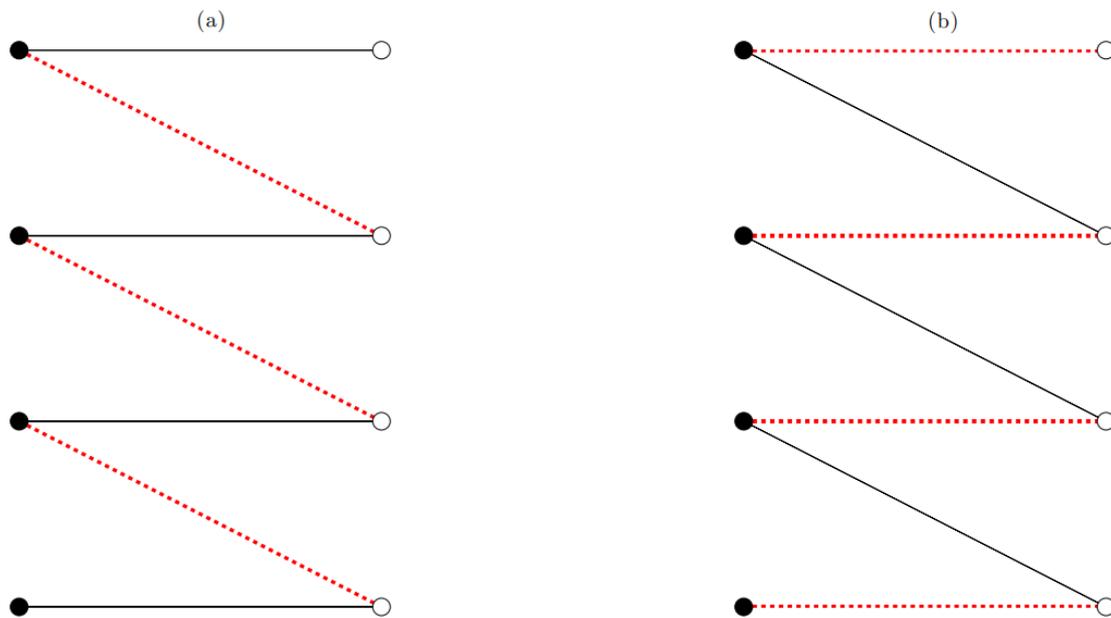


Figura 1 Esempio di applicazione dell’algoritmo di Hopcroft-Karp (Hopcroft and Karp 1973) per il calcolo del massimo matching su un grafo bipartito. Il matching nella figura (a) (cioè gli archi tratteggiati in rosso) non è perfetto e c’è un percorso crescente che coinvolge tutti i collegamenti, quindi la differenza tra gli archi nel percorso crescente e l’abbinamento produce un abbinamento maggiore come mostrato in figura (b) (cioè gli archi tratteggiati in rosso).

L’idea principale dell’algoritmo Hopcroft-Karp è che, dato un matching parziale come quello in Figura 1.(a) (le linee tratteggiate rappresentano gli archi nel matching), se c’è un cammino crescente, cioè un cammino connesso che alterna tra un arco non appartenente al matching ed un arco nel matching e che inizia e finisce con nodi non presenti nel matching, allora l’insieme differenza tra il cammino aumentante e il matching è un matching con cardinalità superiore. Ad esempio nel caso della Figura 1.(a) c’è un percorso aumentante composto da tutti i collegamenti del grafo, e l’algoritmo di Hopcroft-Karp produce il matching nella Figura 1.(b). L’algoritmo termina quando non è possibile trovare alcun cammino aumentante, e in questo caso possiamo concludere che il matching ottenuto ha cardinalità massima, come dimostrato in [16].

2.3.2 Zero creation phase

Durante questa fase, l’algoritmo ungherese mira a modificare la matrice dei costi C in modo da ottenere una nuova matrice dei costi con più voci pari a zero, in modo che la successiva

esecuzione della fase di matching abbia maggiori possibilità di trovare una soluzione. In [14] si dimostra che, se si adotta la seguente procedura per modificare la matrice C , allora un matching perfetto sulla nuova matrice C è ottimo anche per il problema originale.

La fase di *zero creation* inizia contrassegnando tutte le righe di C corrispondenti ai nodi di origine che non sono stati assegnati durante la fase di matching.

Quindi si alterna tra un passaggio di marcatura di colonna e un passaggio di marcatura di riga, finché non è possibile contrassegnare più righe o colonne. Durante la fase di marcatura delle colonne, una colonna j viene contrassegnata se ha una voce $c_{ij} = 0$ in corrispondenza di una colonna contrassegnata j . Durante la fase di marcatura delle righe, viene contrassegnata una riga i se ha una voce $c_{ij} = 0$ in corrispondenza di una colonna contrassegnata j tale che j sia assegnato nella corrispondenza.

2.4 Incomplete Analytic Hierarchy Process

Questa sottosezione mira ad esaminare la metodologia *Analytic Hierarchy Process* quando le informazioni disponibili sono incomplete.

L'obiettivo è calcolare una stima delle utilità incognite di un insieme di alternative, sulla base di informazioni sulle preferenze relative su coppie di alternative. A tal fine, si consideri un insieme di n alternative e si supponga che ciascuna alternativa sia caratterizzata da un'utilità o valore sconosciuto $w_i > 0$. Nel caso di informazione incompleta, ci viene assegnato un valore $\mathcal{A}_{ij} = \epsilon_{ij} w_i / w_j$ per coppie selezionate di alternative i, j ; tale informazione corrisponde ad una stima del rapporto w_i / w_j , dove $\epsilon_{ij} > 0$ è una perturbazione moltiplicativa che rappresenta l'errore di stima. Inoltre, per tutte le voci disponibili \mathcal{A}_{ij} , assumiamo che $\mathcal{A}_{ji} = \mathcal{A}_{ij}^{-1} = \epsilon_{ij}^{-1} w_j / w_i$, ovvero i termini disponibili \mathcal{A}_{ij} e \mathcal{A}_{ji} sono sempre coerenti e soddisfano $\mathcal{A}_{ij} \mathcal{A}_{ji} = 1$. Segnaliamo che, mentre i tradizionali approcci AHP [17], [18], [19] richiedono la conoscenza di ogni coppia di alternative, nell'impostazione delle informazioni parziali siamo in grado di stimare il vettore $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_n]^T$ delle utilità, conoscendo solo un sottoinsieme dei rapporti perturbati. Nello specifico, consideriamo un grafo $G = \{V, E\}$ con $|V| = n$ nodi; in quest'ottica, ogni alternativa i è associata ad un nodo $v_i \in V$, mentre la conoscenza di w_{ij} corrisponde ad un arco $(v_i, v_j) \in E$. Chiaramente, poiché assumiamo di conoscere w_{ji} ogni volta che

conosciamo w_{ij} , il grafo G non è orientato. Assumiamo che \mathcal{A} sia la matrice $n \times n$ contenente i termini \mathcal{A}_{ij} , con $\mathcal{A}_{ij} = 0$ se $(v_i, v_j) \notin E$.

Si noti che, nella letteratura AHP, non esiste un consenso universale su come stimare le utilità in presenza di perturbazioni (si veda ad esempio il dibattito in [20], [21] per il problema originale di AHP). Questo vale anche nel caso di informazioni incomplete, si veda, ad esempio [22], [23], [24]. Mentre il dibattito è ancora aperto, segnaliamo che l'approccio *Logarithmic Least Squares* (LLS) appare particolarmente interessante, poiché si concentra sulla minimizzazione di un concetto di errore.

Per questo motivo, esaminiamo ora il metodo *Incomplete Logarithmic Least Squares* (ILLs) [22], [24], che rappresenta un'estensione del metodo LLS classico, sviluppato in [18], [19] per risolvere il problema AHP nel caso informativo completo.

2.4.1 Approccio ILLS ad AHP

Lo scopo dell'algoritmo ILLS è trovare un'approssimazione logaritmica ai minimi quadrati \mathbf{w}^* del vettore di utilità sconosciuto \mathbf{w} , cioè trovare il vettore che risolve

Equazione 1

$$\mathbf{w}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^n} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left(\ln(\mathcal{A}_{ij}) - \ln\left(\frac{x_i}{x_j}\right) \right)^2 \right\}.$$

Una strategia efficace per risolvere il problema di ottimizzazione di cui sopra consiste nell'operare la sostituzione $\mathbf{y} = \ln(\mathbf{x})$, dove $\ln(\cdot)$ è il vettore che ha come componenti i logaritmi delle componenti del proprio argomento. In questo modo, l'Eq. (1) può essere riorganizzata come

Equazione 2

$$\mathbf{w}^* = \exp \left(\operatorname{argmin}_{\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\ln(\mathcal{A}_{ij}) - y_i + y_j)^2 \right\} \right),$$

dove $\exp(\cdot)$ è il vettore che ha come componenti l'esponenziale delle componenti del proprio argomento. Definiamo

$$\kappa(\mathbf{y}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\ln(\mathcal{A}_{ij}) - y_i + y_j)^2;$$

a causa della sostituzione $\mathbf{y} = \ln(\mathbf{x})$, il problema diventa convesso e non vincolato e il suo minimo globale è nella forma $\mathbf{w}^* = \exp(\mathbf{y}^*)$, dove \mathbf{y}^* soddisfa

$$\frac{\partial \kappa(\mathbf{y})}{\partial y_i} \Big|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}^*} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\ln(\mathcal{A}_{ij}) - y_i^* + y_j^*) = 0, \quad \forall i = 1, \dots, n,$$

cioè, cerchiamo l'argomento della funzione che annulla la derivata. Consideriamo la matrice $n \times n$ P tale che $P_{ij} = \ln(\mathcal{A}_{ij})$ if $\mathcal{A}_{ij} > 0$ and $P_{ij} = 0$, altrimenti; possiamo esprimere le condizioni di cui sopra in una forma compatta come

Equazione 3

$$L\mathbf{y}^* = P\mathbf{1}_n,$$

dove L è la matrice Laplaciana associata al grafo G . Si noti che, poiché per l'ipotesi G è non orientato e connesso, la matrice Laplaciana L ha rango $n - 1$ [12]. Pertanto, un possibile modo per calcolare un vettore \mathbf{y}^* che soddisfi l'equazione precedente è fissare una componente arbitraria di \mathbf{y}^* e quindi risolvere un sistema di dimensioni ridotte semplicemente invertendo il risultante matrice $(n - 1) \times (n - 1)$ [25].

Il vettore \mathbf{y}^* può anche essere scritto come media aritmetica dei vettori calcolati dagli spanning tree del grafico dei confronti, corrispondente alla matrice di confronto a coppie additiva incompleta \mathcal{A} [26]. Infine, vale la pena ricordare che, quando il grafico G è connesso, l'equazione differenziale

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = -L\mathbf{y}(t) + P\mathbf{1}_n$$

converge asintoticamente a \mathbf{y}^* (vedi [27]) e rappresenta ancora un altro modo per calcolarlo. In particolare, quest'ultimo approccio è tipicamente utilizzato dalla comunità dei sistemi di controllo per *formation control* di robot mobili, poiché i calcoli sono facilmente implementati in modo distribuito e possono essere eseguiti in modo cooperativo da diversi robot mobili. Pertanto, un tale approccio appare particolarmente interessante in un ambiente di calcolo distribuito.

2.4.2 Molteplici opinioni a fattor comune

Esaminiamo ora un modo per calcolare un ranking per un gruppo di decisori, ciascuno con la propria matrice di rapporti perturbati $\mathcal{A}^{(u)}$ che non corrisponde necessariamente a un grafo connesso [28]

A tal fine, prendiamo in considerazione m decisori e supponiamo che ogni decisore u fornisca una matrice di rapporti $n \times n$ $\mathcal{A}^{(u)}$ possibilmente perturbata, che abbia la stessa struttura di un grafo eventualmente disconnesso $G^{(u)} = \{V, E^{(u)}\}$. Indichiamo con

$$\widehat{G} = \left\{ V, \bigcup_{u=1}^m E^{(u)} \right\}$$

il grafo corrispondente all'informazione complessiva fornita dai decisori m (ovvero un grafo che rappresenta l'unione degli archi forniti da tutti i decisori, dove sono consentiti archi ripetuti), e consideriamo il problema di ottimizzazione

Equazione 4

$$\mathbf{w}^* = \exp \left(\underset{\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left(\ln(\mathcal{A}_{ij}^{(u)}) - y_i + y_j \right)^2 \right).$$

La soluzione ottima globale al problema di cui sopra \mathbf{y}^* soddisfa

Equazione 5

$$\sum_{u=1}^m L(G^{(u)}) \mathbf{y}^* = \sum_{u=1}^m P^{(u)} \mathbf{1}_n,$$

dove $L(G^{(u)})$ è la matrice Laplaciana associata a $G^{(u)}$ e $P^{(u)}$ è una matrice $n \times n$ che raccoglie il logaritmo delle voci diverse da zero di $\mathcal{A}_{ij}^{(u)}$, mentre $P_{ij}^{(u)} = 0$ quando $\mathcal{A}_{ij}^{(u)} = 0$. Inoltre, $\exp(\mathbf{y}^*)$ è unico a meno di un fattore di scala se e solo se \widehat{G} è connesso. Più nel dettaglio, osserviamo che il problema è un problema di minimizzazione convessa non vincolata; quindi, ponendo a zero la derivata dell'Eq. (4), si ha che la soluzione ottima \mathbf{y}^* soddisfa l'Eq. (5).

2.5 Problema di assegnazione del costo minimo basato su criteri multipli

Questa sottosezione discute una strategia per risolvere il problema di assegnazione di costo minimo considerando, allo stesso tempo, diverse metriche di costo eventualmente in contrasto. In particolare, si consideri n metriche di costo potenzialmente in conflitto e m decisori e sia $\mathbf{w}^* \in \mathbb{R}^n$ il vettore che raccoglie la rilevanza di ciascun criterio, calcolato come discusso nella precedente sottosezione sulla

base delle valutazioni soggettive dei decisori. In particolare, assumiamo che \mathbf{w}^* sia normalizzato in modo che $\mathbf{1}_n^T \mathbf{w}^* = 1$.

A questo punto, consideriamo uno scenario con ℓ sorgenti e ℓ destinazioni, e per ogni coppia (s_i, t_j) , assumiamo che un costo $c_{ij}^{[h]}$ sia disponibile per la h -esima metrica di costo. In particolare, assumiamo che le metriche di costo siano opportunamente normalizzate in modo tale da assumere valori tra zero e uno; ad esempio i costi sono normalizzati in modo che per tutti i $h \in \{1, \dots, n\}$ valga $c_{ij}^{[h]} \in [0,1]$ e $\max_{(s_i, t_j) \in E_{st}} c_{ij}^{[h]} = 1$. Sulla base del vettore \mathbf{w}^* , definiamo il costo olistico complessivo come

$$c_{ij} = \sum_{h=1}^n w_h^* c_{ij}^{[h]}.$$

Il costo c_{ij} può essere considerato un costo olistico che rappresenta un compromesso tra le metriche di costo originali. Sulla base di questo costo olistico, ricorrendo all'Algoritmo Ungherese, è possibile risolvere il problema dell'assegnazione ottima in un modo che rifletta la rilevanza delle diverse metriche di costo.

2.6 CIPCast Decision Support System

CIPCast *Decision Support System* è una piattaforma GIS che fornisce monitoraggio e analisi del rischio in tempo reale di ambienti urbani e naturali, con particolare attenzione all'analisi di interdipendenza delle infrastrutture critiche come quelle relative al dominio elettrico, idrico, delle telecomunicazioni, delle reti stradali e degli edifici strategici soggetti a rischi naturali. Le informazioni geospaziali di base, gli asset considerati, le mappe elaborate e gli scenari possono essere selezionati sia graficamente che spazialmente e sono caratterizzati da relazioni spaziali definite topologicamente o da specifici attributi descrittivi. I livelli GIS vengono caricati tramite lo standard WMS ed elencati direttamente nella sezione laterale sinistra dell'interfaccia Web-GIS (Figura 2).

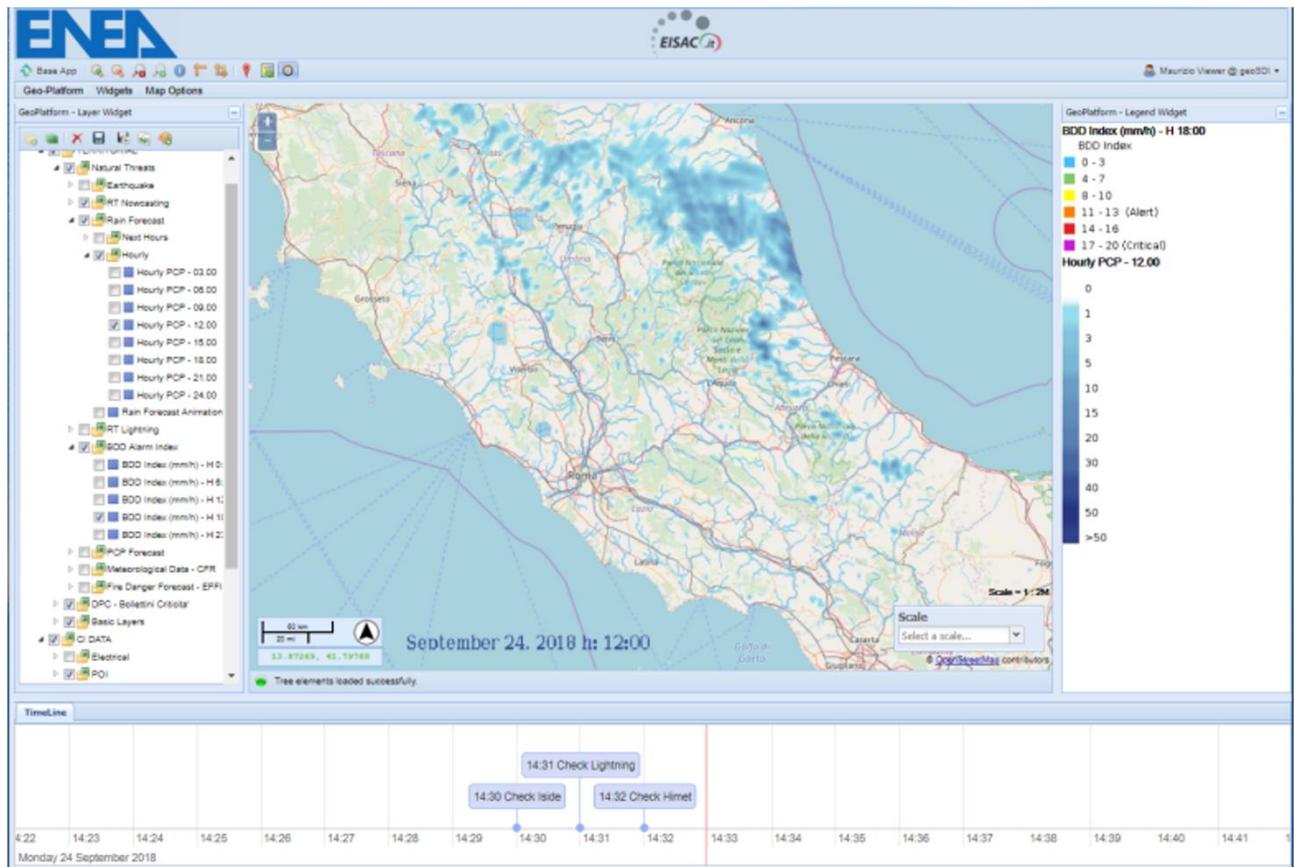


Figura 2 CIPCast Decision Support System Graphical User Interface.

CIPCast è costituito da quattro funzionalità principali (F_i):

- F_1 **Valutazione dei pericoli in tempo reale**: questo servizio permette di valutare la mappa dei pericoli in tempo reale per un evento in corso (es. terremoti, eventi meteorologici);
- F_2 **Valutazione dello scenario di danno fisico**: questo servizio consente la valutazione di scenari di danno per le CI (ad es. interruzione di una sottostazione elettrica a causa di un'alluvione) sulla base dei risultati di valutazione del pericolo e della vulnerabilità delle infrastrutture;
- F_3 **Valutazione dello scenario di impatto**: questo servizio consente di prevedere la degradazione dei servizi offerti dalle CI in base al danno fisico previsto e alle dipendenze tra le CI;

- **F_4 Supporto alle strategie di intervento:** questo servizio permette di supportare l'operatore nel processo decisionale, ovvero di fornire molteplici strategie per gestire gli scenari di crisi.

L'applicazione proposta in questo documento rientra nella funzionalità F_4 , in quanto supporta l'operatore elettrico in scenari di crisi caratterizzati da guasti alle cabine elettriche le quali richiedono l'assegnazione di squadre di intervento per la riparazione e, dunque, per la riduzione dell'estensione geografica e della durata del guasto.

2.6.1 Repair assignment module

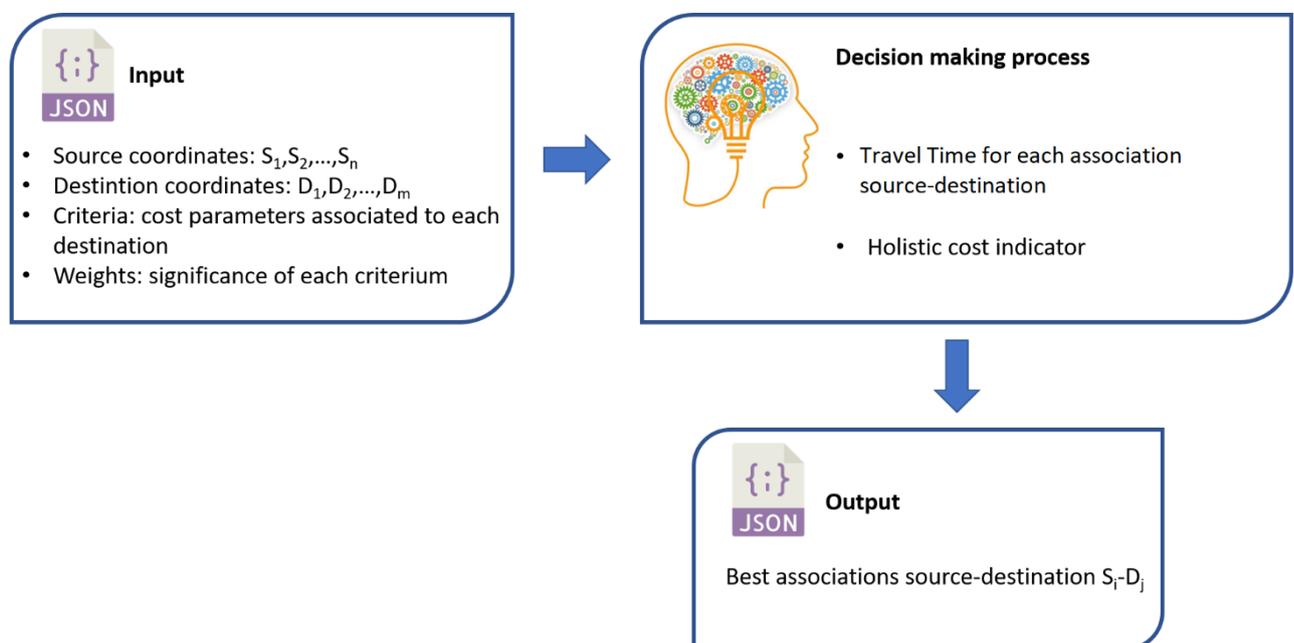


Figura 3 Comportamento ingresso-uscita del repair assignment module.

Il *Repair assignment module* è il modulo incaricato di effettuare l'assegnazione delle squadre di riparazione ai luoghi di intervento, sulla base delle informazioni reperite da CIPCast e sulla base dei tempi di percorrenza, forniti da un provider esterno. In particolare, il modulo è attivato da CIPCast, che fornisce la posizione dei guasti e la posizione delle squadre di intervento, nonché informazioni sulla rilevanza dei luoghi di intervento sulla base di dati sull'infrastruttura elettrica e sui pesi da associare a ciascun criterio. Sulla base di tali dati, integrati con i tempi di percorrenza in tempo reale, il *Repair assignment module* restituisce a CIPCast le migliori

associazioni tra i luoghi che necessitano di riparazioni e le squadre di intervento. Come descritto nella Figura 3, il modulo esegue cinque attività principali:

1. Accettare un file JSON di input contenente tutte le informazioni sulla rete elettrica: coordinate sorgenti, coordinate di destinazione, criteri e pesi;
2. recuperare il tempo di viaggio tra sorgenti e destinazioni da un provider di localizzazione esterno;
3. calcolare l'indice di costo olistico sulla base dei criteri, dei tempi di percorrenza e dei pesi;
4. calcolare l'associazione ottima delle squadre di riparazione ai luoghi di intervento sulla base dell'indice di costo olistico;
5. restituire un file JSON di output contenente le migliori associazioni tra sorgenti e destinazioni.

Questo modulo è stato implementato in un server web HTTP utilizzando la libreria Python HTTPServer¹.

```
from http.server import BaseHTTPRequestHandler, HTTPServer
from hungarian_algorithm import algorithm

class Server ( Base HTTPRequest Handler ): def
    do_POST(self):
        length = int(self.headers.get('Content-Length'))
        message = json.loads(self.rfile.read(length))
        sources = message['destinations']
        destinations = message['destinations']
        criteria = norm ( message [ ' criteria ' ])
        weights = norm(message['weights'])
```

¹ <https://docs.python.org/3/library/http.server.html>

Come descritto nel precedente frammento di codice, quando il server Web viene interrogato con un metodo POST, viene avviato l'algoritmo *Repair assignment module*. Dopo aver recuperato tutte le informazioni sulla rete elettrica dal file json di input, i criteri e i pesi ad essi associati vengono normalizzati in modo da rendere anonime tutte le possibili informazioni sensibili come il numero dei residenti e il numero di Punti di Interesse (POI) in prossimità dei luoghi di intervento. Successivamente, i tempi di viaggio dalle sorgenti alle destinazioni vengono ottenuti grazie a un provider di geolocalizzazione esterno e quindi aggiunti ai criteri come parametri aggiuntivi. Conseguentemente, viene calcolato l'indice di costo olistico come descritto nella Sezione 2.5 e, quindi, fornito come input all'algoritmo ungherese. Ottenute le migliori associazioni, queste vengono infine inserite nel file json di output.

2.7 Use case

La figura 4 riassume l'architettura complessiva. Il sistema CIPCast richiede le migliori associazioni tra i luoghi che necessitano di riparazione e le squadre di intervento al *Repair assignment module*, implementato su un server web HTTP. Tale interrogazione include un file JSON di input che riporta informazioni in termini di posizioni sorgenti, posizioni di destinazione, pesi e criteri. Il server web chiede a un provider di geolocalizzazione esterno i tempi di percorrenza per ciascuna associazione sorgente-destinazione. Dopo aver aggiunto questo nuovo parametro ai criteri preesistenti, viene calcolato l'indice di costo olistico e quindi minimizzato dall'algoritmo ungherese il quale restituisce le migliori associazioni tra sorgenti e destinazioni. In ultimo, tali informazioni vengono inserite in un file JSON e rispedito al modulo CIPCast.

```
{ "sources": [{"latitude": "xx.xx", "longitude": "yy.yy"}, {"latitude": "xx.xx", "longitude": "yy.yy"}], "destinations": [{"latitude": "xx.xx", "longitude": "yy.yy"}, {"latitude": "xx.xx", "longitude": "yy.yy"}], "criteria": [[x.x.v.v.], [x.x.v.
```

Listing 1: json file di input che riporta origini, destinazioni, criteri e pesi

```
{
  "associations": [
    { "source": "s1", "destination": "d4", "source": "s4", "destination": "d2", "source": "s2", "destination": "d1" }
  ]
}
```

1

Listing 2: file di output json che riporta le migliori associazioni tra le posizioni di intervento e le posizioni dell'equipaggio

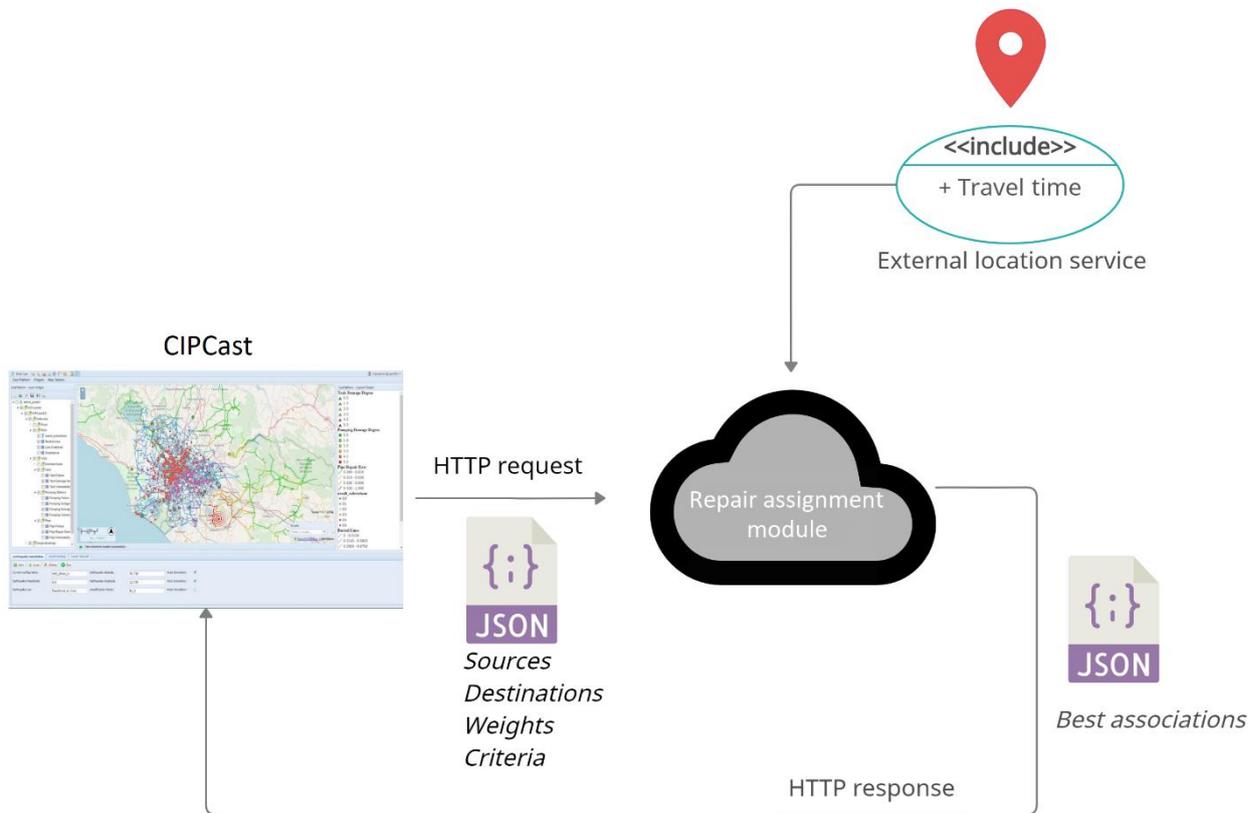


Figura 4 Architettura complessiva del sistema proposto

3 Validazione dell'approccio proposto

In questa sezione mostriamo l'efficacia del DSS proposto applicandolo ad un caso di studio basato su uno scenario realistico relativo alla rete di distribuzione elettrica della città di Roma.

Tabella 1 Tabella riepilogativa delle quattro squadre di manutenzione con tempi di percorrenza per raggiungere le sei località di intervento

	Squadra #1	Squadra #2	Squadra #3	Squadra #4
Tempo di intervento in posizione #1 [s]	489	1615	884	1005
Tempo di intervento in posizione #2 [s]	2012	1342	1607	1625
Tempo di intervento in posizione #3 [s]	1295	1864	1292	2021
Tempo di intervento in posizione #4 [s]	1886	1495	1934	1586
Tempo di intervento in posizione #5 [s]	1892	832	1246	1299
Tempo di intervento in posizione #6 [s]	1977	1199	1317	1998

Tabella 2 Scala dei rapporti di Saaty

Intensità di Importanza	Definizione
1	Uguale importanza
3	Poco più importante
5	Più importante
7	Molto più importante
9	Assolutamente più importante
2,4,6,8	Valori intermedi

In particolare, consideriamo uno scenario in cui, il 18 gennaio 2022 alle ore 12:00, ora locale, sei diverse cabine della rete di distribuzione dell'energia elettrica di Roma necessitano di riparazioni o di attività di manutenzione. Inoltre, assumiamo che siano disponibili quattro squadre di manutenzione, in diversi luoghi della città, e che debbano essere assegnate ciascuna a un sito di intervento. Le Tabelle 1 e 2 riassumono rispettivamente i dettagli sui luoghi di intervento e sui tempi di percorrenza in tempo reale per ognuna delle squadre di manutenzione, mentre la loro posizione sulla mappa è riportata in Figura 5. Si noti che, per motivi di riservatezza, abbiamo deciso di riportare solo valori normalizzati² nella Tabella 1, mentre la Figura 5 riporta le posizioni prive della sottostante mappa dettagliata di Roma.

Tabella 3 Metriche di costo

	Posizione #1	Posizione #2	Posizione #3	Posizione #4	Posizione #5	Posizione #6
Utente elettriche	0.18 e 0.68	1	0.9	0.54	0	
SOE	0	0	1	1	1	0
POI	1	0	1	1	1	0,91
Residenti	0	0.97	1	0.7	0.48	0.43
Sottostazioni telecontrollate	0.67	1	0	0.33	0.33	0

Per assegnare le squadre di manutenzione ai luoghi di intervento, consideriamo le seguenti sei metriche di costo (Tabella 3):

² Per ciascun criterio h , distinguiamo tra criteri in cui valori grezzi maggiori corrispondono a costi maggiori (ad es., un numero maggiore di sottostazioni telecontrollate implica che c'è minore necessità di un intervento fisico) e criteri per i quali valori grezzi maggiori corrispondono ad una maggiore utilità (ad es., è più desiderabile svolgere un intervento in un sito caratterizzato da un gran numero di utenti elettrici rispetto ad un intervento in una zona con pochi utenti). Scaliamo quest'ultimo gruppo di valori grezzi di un fattore -1 , ottenendo così un indice di costo anziché un indice di utilità, e poi normalizziamo i costi $c_{ij}^{[h]}$ per h -esimo (eventualmente in scala) considerando il

$$\text{valore } \frac{c_{ij}^{[h]} - \min_{i,j} \{c_{ij}^{[h]}\}}{\max_{i,j} \{c_{ij}^{[h]}\} - \min_{i,j} \{c_{ij}^{[h]}\}}$$

1. **Numero di utenze elettriche:** numero di utenze elettriche attive nel luogo di intervento. Secondo questa metrica, il costo di assegnazione dipende solo dalla località target ed è inversamente proporzionale al numero di utenze elettriche coinvolte nel guasto.
2. **Numero di Edifici Sensibili o Critici (SCB):** numero di edifici strategici come ospedali, caserme o centri decisionali nel luogo di intervento. Secondo questa metrica, il costo di assegnazione dipende solo dalla destinazione ed è inversamente proporzionale al numero di tali edifici o infrastrutture.
3. **Numero di Punti di Interesse (POI):** numero di scuole, uffici, attività commerciali, ecc. nel luogo di intervento. Secondo questa metrica, il costo dell'assegnazione dipende solo dalla posizione di destinazione ed è inversamente proporzionale al numero di punti di interesse.
4. **Numero di residenti:** numero di residenti in prossimità del luogo di intervento. Secondo questa metrica, il costo dell'assegnazione dipende solo dalla località target ed è inversamente proporzionale al numero di residenti.
5. **Numero di cabine telecontrollate:** la presenza di cabine telecontrollate facilita l'intervento a distanza dalla sala di controllo. Secondo questa metrica, il costo di assegnazione dipende solo dalla posizione di destinazione ed è proporzionale al numero di sottostazioni telecontrollate.
6. **Tempo di intervento:** tempo necessario a una data squadra di manutenzione per raggiungere una determinata posizione, tenendo conto della situazione del traffico in tempo reale. Secondo questa metrica, il costo di assegnazione dipende sia dalla squadra di manutenzione che dal luogo di destinazione ed è proporzionale al tempo necessario alla squadra di manutenzione per raggiungere il luogo di intervento

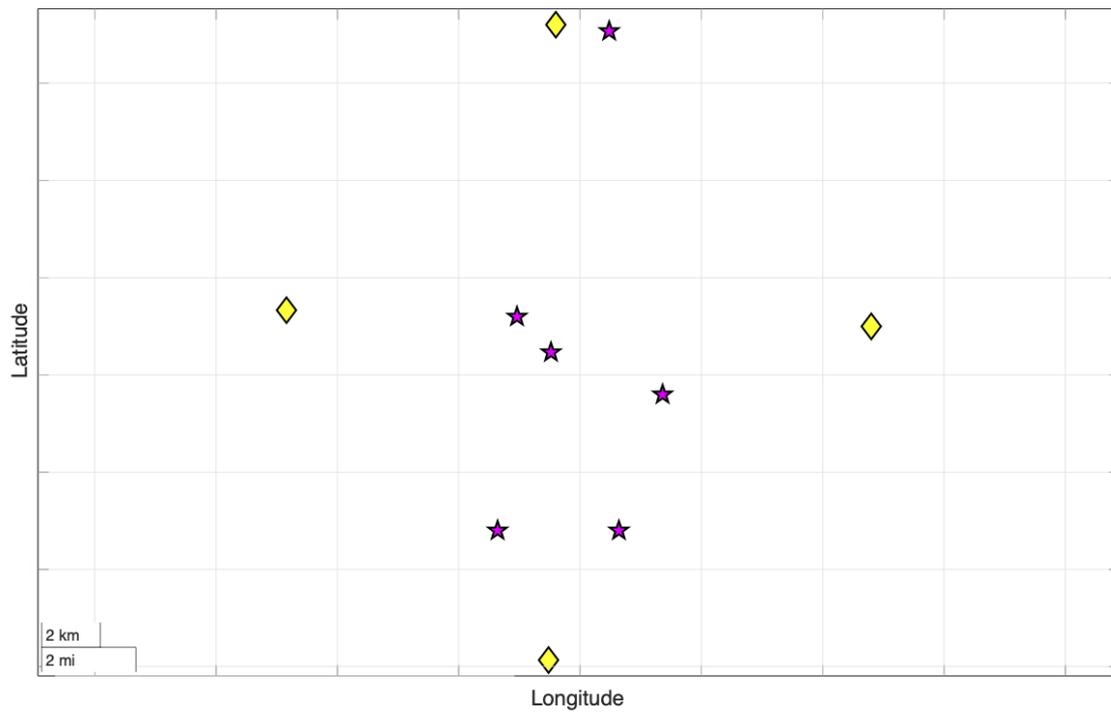


Figura 5 Mappa che mostra i luoghi di intervento (stelle magenta) e la posizione delle squadre di manutenzione (diamanti gialli). Le posizioni sono state anonimizzate per motivi di sicurezza.

Al fine di costruire un costo olistico dell'assegnazione delle squadre di manutenzione ai luoghi di intervento, abbiamo intervistato dieci decisori, ovvero esperti, manager e stakeholder nel contesto delle reti di distribuzione di energia. Con l'obiettivo di costruire le matrici $A^{(u)}$ raccogliendo l'opinione di ciascun decisore, abbiamo chiesto agli esperti di compilare il questionario grafico riportato in Figura 6.

Evaluation of the importance of intervention factors

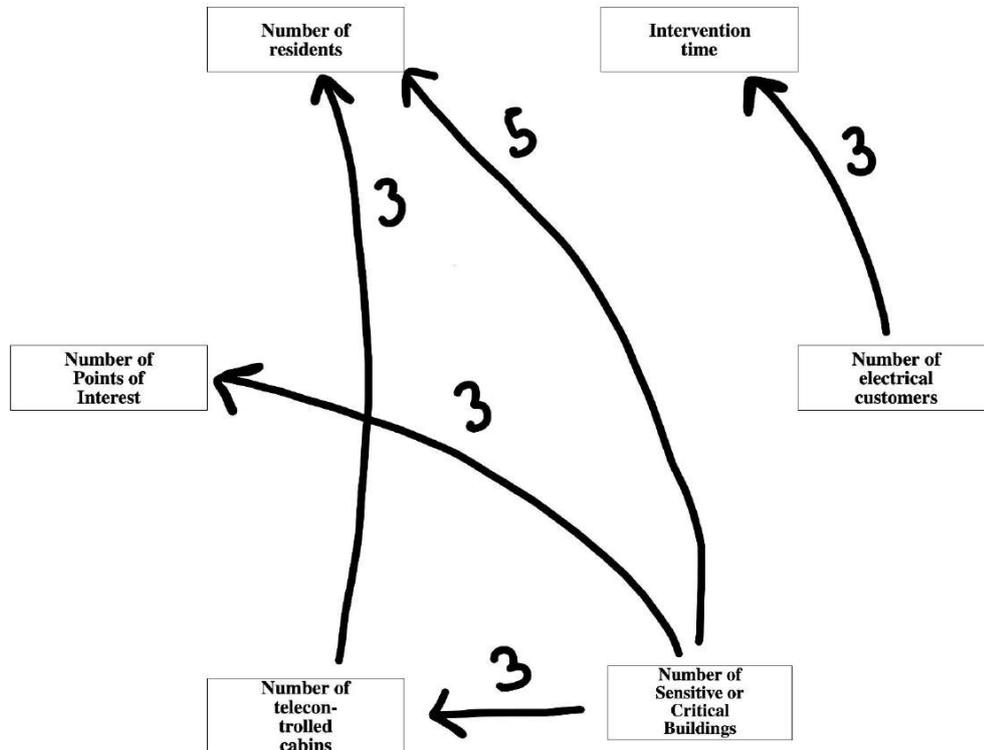


Figura 6 Esempio di questionario grafico compilato da un esperto.

Nello specifico è stato sottoposto agli esperti un questionario in cui le metriche dei costi sono state presentate come caselle di testo e ai decisori è stato chiesto di esprimere le proprie preferenze su coppie di alternative disegnando frecce (la casella di coda è considerata più importante della casella in testa della freccia) e associando alla freccia un valore numerico, secondo la scala di Saaty (Tabella 2). Ad esempio, in Figura 6 il numero di utenti elettrici è considerato "Poco più importante" (cioè tre volte più importante) del tempo di intervento. In particolare, agli esperti è stato chiesto di confrontare solo le coppie di alternative per le quali si sentivano a proprio agio nell'esprimere un giudizio. Nell'esempio di Figura 6, il grafo ottenuto è disconnesso, e quindi le informazioni raccolte non sono sufficienti per costruire un corretto ranking delle metriche di costo; tuttavia, combinando l'opinione di più decisori, otteniamo un grafo connesso e quindi una classifica.

La Tabella 4 riporta il valore numerico dei pesi w_i^* associati a ciascuna metrica di costo, insieme al loro ranking; i valori numerici sono stati calcolati utilizzando l'approccio

discusso nella Sezione 2.4.2 e sono stati normalizzati per far sì che avessero somma unitaria. Secondo la tabella, i decisori considerano il numero di edifici o infrastrutture strategiche come la metrica di costo più importante (vale a dire, contribuisce per circa 23, 8% al costo olistico), mentre la metrica di costo meno importante è correlata al numero dei residenti (contribuisce di circa 9, 4% al costo olistico).

Tabella 4 Pesì w^* (normalizzati in modo che la somma sia uguale a uno) ottenuti sulla base delle informazioni fornite da tutti gli esperti e della relativa classifica per le metriche di costo considerate.

Metrica di costo	Wi*	Classifica
Numero di utenze elettriche	0.1066	#5
Numero di edifici o infrastrutture strategiche	0.2383	#1
Numero di punti di interesse	0.1107	#4
Numero di residenti	0.0938	#6
Numero di sottostazioni telecontrollate	0.2331	#2
Tempo di intervento	0.2175	#3

Valutiamo ora il grado di accordo dei decisori. La figura 7 riporta una matrice la cui (i, j) -esima voce contiene il numero di volte in cui la i -esima metrica di costo è stata considerata dai decisori più importante della j -esima, mentre Figura 8 riporta una matrice la cui (i, j) -esima voce contiene il numero di volte in cui la i -esima metrica di costo è stata considerata dai decisori altrettanto importante della j -esima. Secondo Figura 7, sebbene i decisori siano d'accordo su alcuni confronti a coppie (ad esempio, sei decisori considerano il tempo di intervento più importante del numero di residenti, mentre solo un decisore ha una visione opposta; allo stesso modo, cinque decisori ritengono che il numero delle cabine telecontrollate sia più importante del numero dei punti di interesse, e nessuno crede il contrario), in alcuni casi non sono d'accordo (es. numero di utenti elettrici e numero di telecontrollati sottostazioni). In particolare, nel tentativo di risolvere il problema nel caso

di un solo decisore, la funzione obiettivo assume, in media, un valore pari a 5,2882, mentre la deviazione standard è pari a 5,8803. Al contrario, il valore della funzione obiettivo raggiunto considerando le informazioni fornite da tutti i decisori $m = 10$ contemporaneamente è pari a 187,4194 e quindi il contributo medio di ciascun decisore alla funzione obiettivo è 18,7419, ben al di sopra della singola decisione -caso maker (anche se con un aumento limitato). Osserviamo inoltre che, secondo Figura 8, nel complesso, i decisori considerano egualmente importanti diverse coppie di metriche di costo; in particolare, le coppie da 36 (ovvero, 42, 35% di tutti i confronti forniti) sono considerate ugualmente importanti. Nel complesso, ciò suggerisce che i decisori sono solo in accordo parziale, e quindi è necessario trovare un vettore di ponderazione che rappresenti un compromesso o un compromesso non banale. L'approccio proposto garantisce che il vettore scelto rappresenti il miglior compromesso in senso logaritmico dei minimi quadrati.

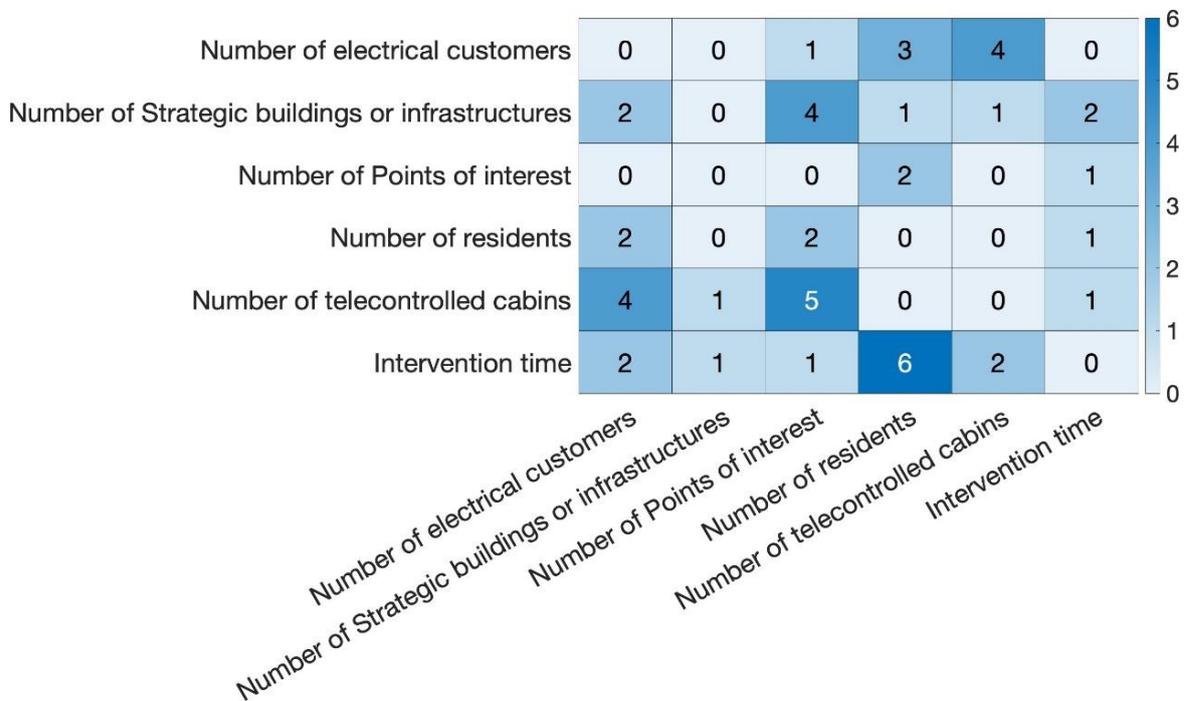


Figura 7 Numero di volte in cui la metrica del costo sulla riga è stata considerata dai responsabili delle decisioni più importante di quella sulla colonna.

Discutiamo ora di come il problema in questione viene risolto sulla base dei pesi di cui sopra. Come discusso nella sezione precedente, quando c'è la necessità di assegnare squadre di manutenzione ai luoghi di intervento il sistema CIPCast ricorre al *Repair assignment module* proposto e, nello specifico, viene invocato il corrispondente *webservice* passandogli un file JSON contenente le coordinate delle sorgenti e destinazioni, i valori numerici delle associazioni

secondo le singole metriche di costo (salva tempo di intervento) dei pesi. Quindi, il modulo recupera i tempi di intervento tramite un provider di localizzazione, calcola il costo complessivo delle associazioni e identifica l'associazione ottimale tramite l'algoritmo ungherese.

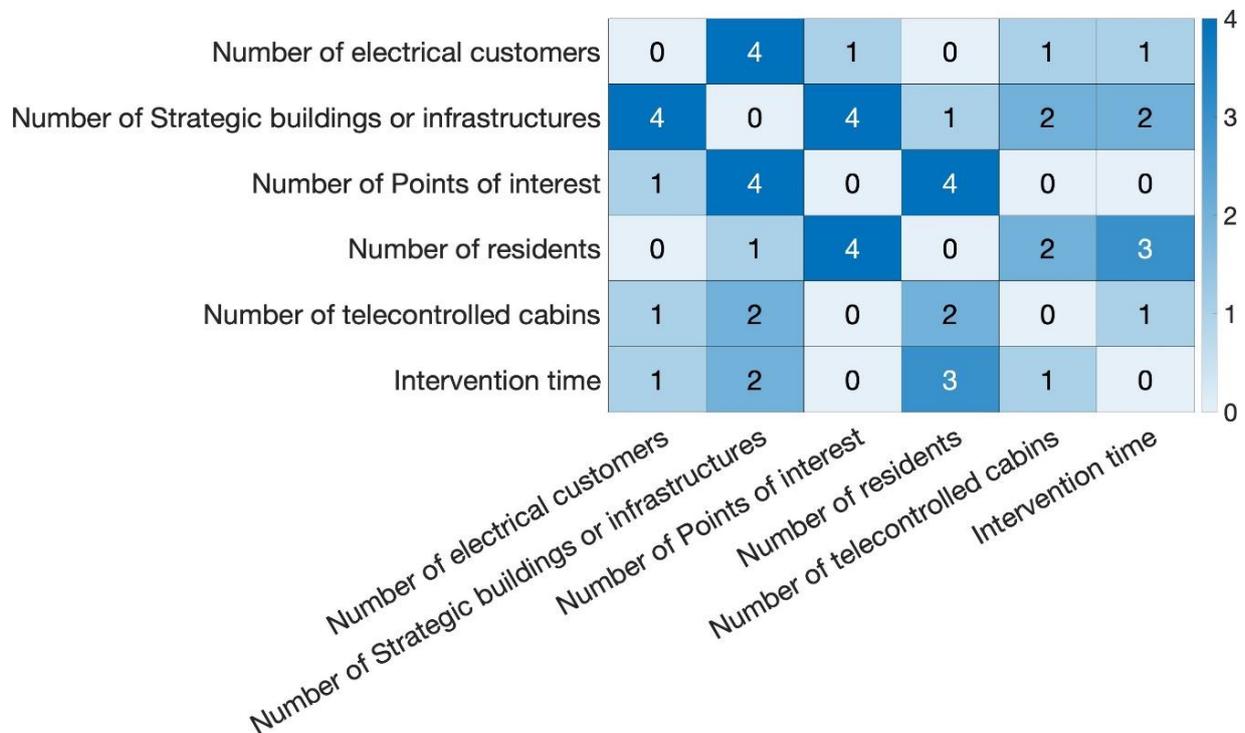


Figura 8 Numero di volte in cui la metrica del costo sulla riga è stata considerata dai responsabili delle decisioni altrettanto importante di quella sulla colonna.

I costi olistici c_{ij} risultanti dalla procedura AHP sono i seguenti:

$$C = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.61 & 0.66 & 0.80 & 0.73 & 0.35 \\ 0.45 & 0.52 & 0.74 & 0.74 & 0.58 & 0.24 \\ 0.34 & 0.56 & 0.66 & 0.80 & 0.64 & 0.26 \\ 0.36 & 0.56 & 0.77 & 0.75 & 0.64 & 0.35 \end{bmatrix}.$$

In particolare, osserviamo che tali costi olistici, essendo un compromesso tra le diverse metriche, sono abbastanza diversi dai semplici tempi di viaggio. Ad esempio, il costo c_{25} è maggiore di c_{21} (vale a dire, +6, 67%), ma il tempo di viaggio della seconda squadra di riparazione verso la prima e la quinta sede è pari a 1615[s] rispettivamente e 832[s] (cioè il primo corrisponde ad un aumento di +94, 11%); in altre parole, viene invertita la graduatoria

del costo di assegnazione del primo equipaggio a queste località. Il frammento di codice seguente mostra il file JSON ottenuto come output del *Repair assignment module*, in base al costo olistico.

```

{ "associations": [ { "source": "s1", "destination": "d1" }, {
                                                                    source":
"s2", "destination": "d5" }, { "source": "s3", "destination": "

```

Listing 3: Assegnazione ottimale tra sorgenti e destinazione considerando il costo olistico.

Al fine di fornire una comprensione visiva dell'associazione, la Figura 9 mostra le squadre di riparazione (diamanti gialli) e le località di intervento (stelle magenta) collegate da linee blu che rappresentano l'associazione. Si noti che, quando l'assegnazione viene eseguita in base solo ai tempi di viaggio in tempo reale, il risultato è quello riportato nel frammento di codice seguente e in Figura 10.

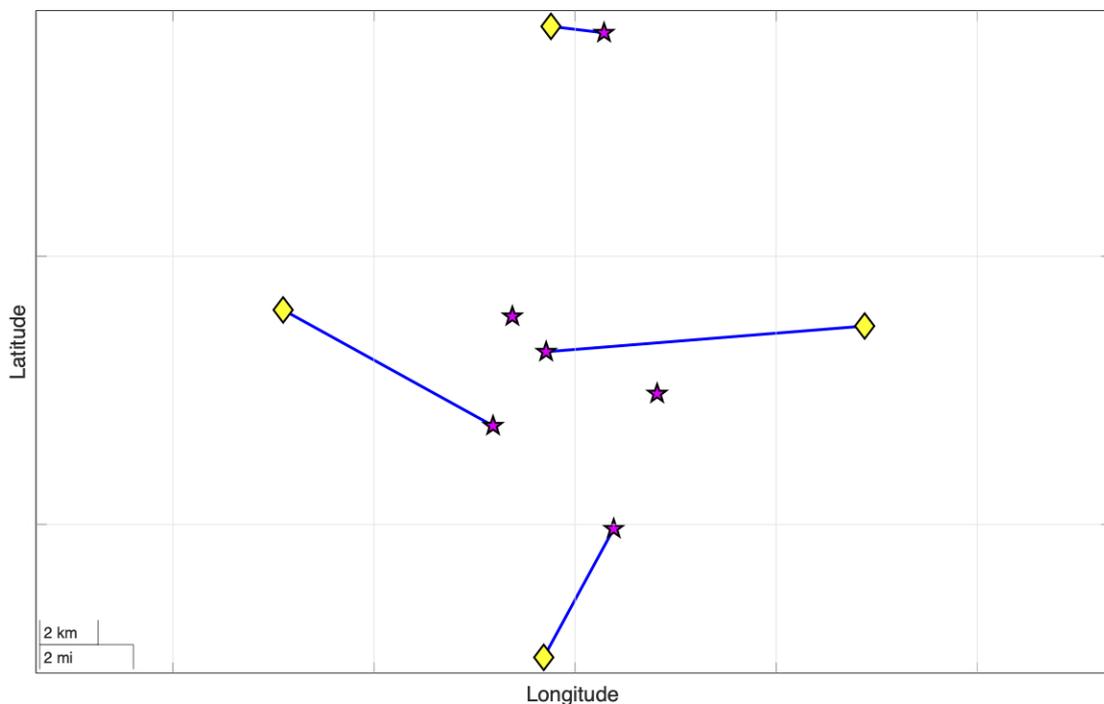


Figura 9 Mappa che mostra i luoghi di intervento (stelle magenta), la posizione delle squadre di manutenzione (diamanti gialli) e gli incarichi in base al costo olistico (linee ciano). Le posizioni sono state rese anonime per motivi di riservatezza.

```
{ "associations": [ { "source": "s1", "destination": "d1" }, {  
                                                                    source":  
"s2", "destination": "d5" }, { "source": "s3", "destination": "
```

Listing 4: Assegnazione ottimale tra sorgenti e destinazione proprio in considerazione del tempo di intervento.

Confrontando i due incarichi, si può notare che, infatti, il costo olistico dà risultati diversi, in quanto per alcuni equipaggi (es. quelli più a sinistra e quelli più a destra) vengono trascurate le destinazioni vicine e le destinazioni più lontane che sono più importanti in base ad altri costi le metriche sono invece preferite.

Per concludere questa sezione, validiamo l'approccio proposto rispetto alle associazioni ottenute sulla base di ogni singola metrica di costo e rispetto ad una strategia mista basata sui soli tempi di intervento e numero di residenti (con uguale importanza). Nello specifico, nella Tabella 5, per ogni assegnazione di un equipaggio ad un luogo di intervento si considera l'indice k_{min} che è il numero di minuti complessivi necessari per riparare la cabina (comprensivo sia del tempo di viaggio dell'equipaggio e il tempo necessario per l'intervento) moltiplicato per il numero delle utenze elettriche [6]. In particolare, secondo la tabella, l'approccio proposto, essendo un compromesso che riflette l'opinione degli esperti, supera nettamente le prestazioni degli approcci basati su un'unica metrica. Inoltre, osserviamo che l'approccio proposto supera anche la strategia multi-obiettivo basata solo sul numero di residenti e sul tempo di intervento. Ciò supporta la conclusione che il nostro approccio, incorporando il know-how degli esperti, produca una strategia più sfaccettata e sfumata.

Tabella 5: Validazione dell'approccio proposto rispetto a strategie basate sulle metriche di costo unico o su una combinazione dei soli fattori relativi al numero di residenti e al tempo di intervento. Per ogni strategia calcoliamo la metrica k_{min} per quantificare il costo del fault.

Strategia di intervento	Indice k_{min}
Strategia multi-obiettivo proposta	8.83×10^3
Strategia multi-obiettivo basata su #residenti e tempo di intervento	9.89×10^3
strategia a singolo-obiettivo #1: Numero di residenti	1.11×10^4
strategia a singolo-obiettivo #2: Tempo di intervento	1.54×10^4
strategia a singolo-obiettivo #3: Numero di edifici o infrastrutture strategiche	1.64×10^4
strategia a singolo-obiettivo #4: Numero di punti di interesse	2.20×10^4
strategia a singolo-obiettivo #5: Numero di sottostazioni telecontrollate	2.34×10^4
strategia a singolo-obiettivo #6: Numero di utenze elettriche	2.36×10^4

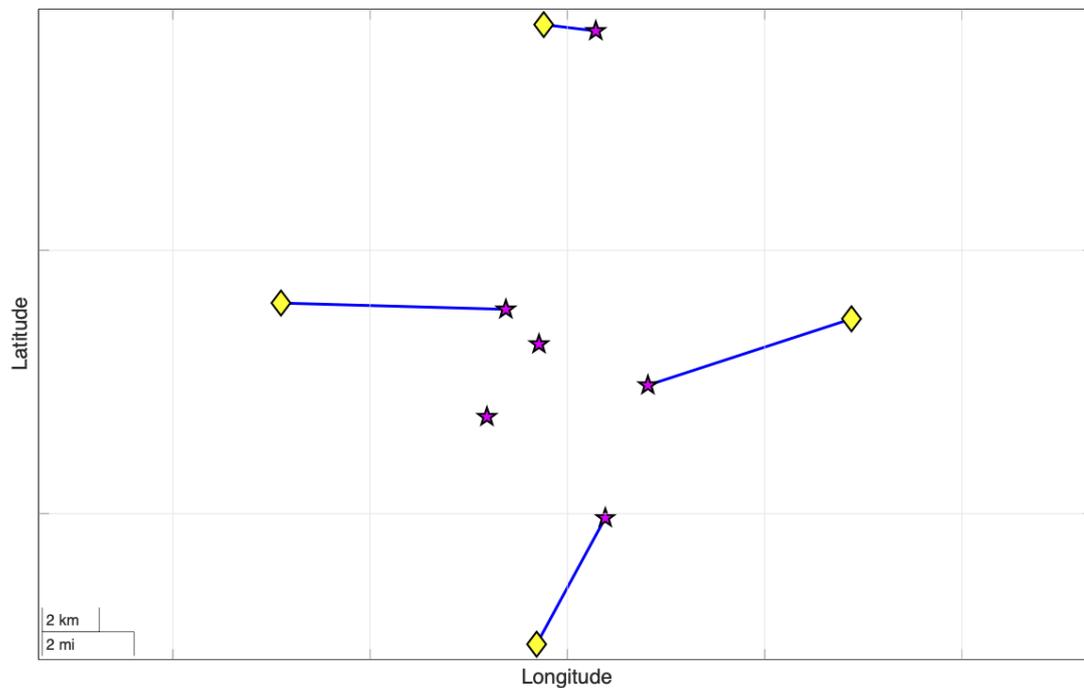


Figura 10 Mappa che mostra i luoghi di intervento (stelle magenta), la posizione delle squadre di manutenzione (diamanti gialli) e gli incarichi in base al tempo di percorrenza in tempo reale (linee ciano). Le posizioni sono state rese anonime per motivi di riservatezza.

4 Conclusioni

Questo lavoro aveva lo scopo di presentare le attività svolte nella LA relativamente allo sviluppo di una nuova metodologia per assegnare priorità agli interventi di riparazione su una rete di distribuzione elettrica. L'approccio proposto combina l'assegnazione delle attività, basata sull'Algoritmo Ungherese, con un costo di assegnazione olistico che rappresenta un compromesso tra diverse metriche di costo, eventualmente in contrasto.

L'approccio proposto è stato implementato come modulo software del sistema CIPCast DSS, una piattaforma GIS di monitoraggio e analisi del rischio in tempo reale che, tra gli altri dati georeferenziati, è in grado di fornire informazioni su diverse misure di rilevanza dei luoghi di intervento in una rete elettrica. Al fine di dimostrare sperimentalmente il potenziale dell'approccio proposto, è stato considerato un caso di studio realistico ambientato a Roma.

Il caso di studio mostra come, sulla base delle preferenze aggregate di diversi decisori ed esperti, l'associazione delle squadre di riparazione ai luoghi di intervento possa produrre soluzioni in cui le squadre trascurino le località vicine al fine di massimizzare l'utilità complessiva. Di conseguenza, l'approccio proposto produce associazioni di intervento che superano quelle basate su ogni singola metrica di costo.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] R. Setola, S. De Porcellinis e M. Sforna, «Critical infrastructure dependency assessment using the input–output inoperability model,» *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 2, p. 170–178, 2009.
- [2] R. Sharda, S. H. Barr e J. C. McDonnell, «Decision support system effectiveness: a review and an empirical test,» *Management science*, vol. 34, p. 139–159, 1988.
- [3] G. Arampatzis, C. T. Kiranoudis, P. Scaloubacas e D. Assimacopoulos, «A GIS-based decision support system for planning urban transportation policies,» *European Journal of Operational Research*, vol. 152, p. 465–475, 2004.
- [4] P. K. Anooj, «Clinical decision support system: Risk level prediction of heart disease using weighted fuzzy rules,» *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 24, p. 27–40, 2012.
- [5] J. Šelih, A. Kne, A. Srdić e M. Žura, «Multiple-criteria decision support system in highway infrastructure management,» *Transport*, vol. 23, p. 299–305, 2008.
- [6] A. Tofani, G. D'Agostino, A. Di Pietro, S. Giovinazzi, M. Pollino, V. Rosato e S. Alessandroni, «Operational Resilience Metrics for Complex Inter-Dependent Electrical Networks,» *Applied Sciences*, vol. 11, 2021.
- [7] S. Giovinazzi, M. Pollino, I. Kongar, T. Rossetto, E. Caiaffa, A. Di Pietro, L. La Porta, V. Rosato e A. Tofani, «Towards a Decision Support Tool for Assessing, Managing and Mitigating Seismic Risk of Electric Power Networks,» in *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017*, Cham, 2017.
- [8] P. Hilber, V. Miranda, M. A. Matos e L. Bertling, «Multiobjective optimization applied to maintenance policy for electrical networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, p. 1675–1682, 2007.
- [9] F. Li e R. E. Brown, «A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability,» *IEEE transactions on power delivery*, vol. 19, p. 439–441, 2004.

- [10] P. Afzali, F. Keynia e M. Rashidinejad, «A new model for reliability-centered maintenance prioritisation of distribution feeders,» *Energy*, vol. 171, p. 701–709, 2019.
- [11] P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, S. Bagheri-Shouraki e A. A. R. Kazemi, «Critical component identification in reliability centered asset management of power distribution systems via fuzzy AHP,» *IEEE Systems Journal*, vol. 6, p. 593–602, 2011.
- [12] C. Godsil, «G. Royle Algebraic graph theory,» *Graduate text in mathematics, Springer, New York*, 2001.
- [13] V. Rosato, S. Bologna e F. Tiriticco, «Topological properties of high-voltage electrical transmission networks,» *Electric Power Systems Research*, vol. 77, p. 99–105, 2007.
- [14] H. W. Kuhn, «The Hungarian method for the assignment problem,» *Naval research logistics quarterly*, vol. 2, p. 83–97, 1955.
- [15] J. E. Hopcroft e R. M. Karp, «An $n^{(5/2)}$ algorithm for maximum matchings in bipartite graphs,» *SIAM Journal on computing*, vol. 2, p. 225–231, 1973.
- [16] C. Berge, «Two theorems in graph theory,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 43, p. 842, 1957.
- [17] T. L. Saaty, «A scaling method for priorities in hierarchical structures,» *Journal of mathematical psychology*, vol. 15, p. 234–281, 1977.
- [18] G. B. Crawford, «The geometric mean procedure for estimating the scale of a judgement matrix,» *Mathematical Modelling*, vol. 9, p. 327–334, 1987.
- [19] J. Barzilai, W. D. Cook e B. Golany, «Consistent weights for judgements matrices of the relative importance of alternatives,» *Operations research letters*, vol. 6, p. 131–134, 1987.
- [20] T. L. Saaty, «How to make a decision: the analytic hierarchy process,» *European journal of operational research*, vol. 48, p. 9–26, 1990.
- [21] J. S. Dyer, «Remarks on the analytic hierarchy process,» *Management science*, vol. 36, p. 249–258, 1990.

- [22] S. Bozóki, J. Fülöp e L. Rónyai, «On optimal completion of incomplete pairwise comparison matrices,» *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 52, p. 318–333, 2010.
- [23] G. Oliva, R. Setola, A. Scala e P. Dell’Olmo, «Sparse analytic hierarchy process: an experimental analysis,» *Soft Computing*, vol. 23, p. 2887–2898, 2019.
- [24] M. Menci, G. Oliva, M. Papi, R. Setola e A. Scala, «On optimal completion of incomplete pairwise comparison matrices,» *Proceedings of the 2018 European Control Conference*, 2018 (to appear).
- [25] S. Bozóki e V. Tsyganok, «The (logarithmic) least squares optimality of the arithmetic (geometric) mean of weight vectors calculated from all spanning trees for incomplete additive (multiplicative) pairwise comparison matrices,» *International Journal of General Systems*, vol. 48, p. 362–381, 2019.
- [26] S. Bozóki e V. Tsyganok, «The (logarithmic) least squares optimality of the arithmetic (geometric) mean of weight vectors calculated from all spanning trees for incomplete additive (multiplicative) pairwise comparison matrices,» *International Journal of General Systems*, vol. 48, p. 362–381, 2019.
- [27] R. Olfati-Saber, J. A. Fax e R. M. Murray, «Consensus and cooperation in networked multi-agent systems,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, p. 215–233, 2007.
- [28] G. Oliva, A. Scala, R. Setola e P. Dell’Olmo, «Opinion-based optimal group formation,» *Omega*, vol. 89, p. 164–176, 2019.

6 Abbreviazioni ed acronimi

AHP	Analytic Hierarchy Process	DSS	Decision support system	EDN	Electrical distribution network
GIS	Geographic information system	HTTP	Hypertext Transfer Protocol		
ILLS	Incomplete Logarithmic Least Squares	JSON	JavaScript Object Notation		
LLS	Logarithmic Least Squares				
MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute	POI	Points of Interest		
SCB	Sensitive or Critical Buildings	WMS	Web Map Service		

7 Curriculum Scientifico del Gruppo di Lavoro

- **Simone Guarino** è laureato in ingegneria biomedica, specializzato nel settore dell'e-Health per lo sviluppo e la gestione di piattaforme proprie dell'Internet of Things (IoT). Durante il percorso di studi triennale in ingegneria industriale, ha iniziato una collaborazione con l'Unità di Ricerca di Automatica – “Coserity Lab” dell'Università Campus Bio-Medico di Roma che lo ha visto coinvolto, nel biennio 2018-2019, nel progetto “SmartBench”, finanziato da INAIL. In tale attività si è interessato allo studio di sensoristica avanzata, applicazioni Android e algoritmi di localizzazione indoor. Attualmente è uno studente di dottorato presso il medesimo laboratorio e si sta occupando del tema della sicurezza informatica in ambito industriale. L'attività sta riguardando lo studio di possibili strategie difensive contro cyber attacchi di tipo APT che coinvolgono sistemi SCADA con particolare riguardo all'applicazione di tecniche proprie del machine learning e del deep learning.
- **Gabriele Oliva** è ricercatore RTD-B presso l'Università Campus Bio-Medico di Roma (settore ING-INF/04, Automatica). La sua attività di ricerca si concentra sulla progettazione di meccanismi che consentono o supportano la decisione di esseri umani o agenti autonomi. È autore di oltre 100 pubblicazioni scientifiche e ricopre il ruolo di Associate Editor per le riviste PLOS ONE e IEEE Control System Letters. Ha partecipato a diversi progetti Nazionali ed Europei; inoltre, ha coordinato l'unità operativa UCBM per un progetto europeo SafeRa relativo alla gestione integrata della sicurezza e sicurezza negli stabilimenti di Seveso. È membro del gruppo di lavoro sulla Cybersecurity di UNINDUSTRIA. È il responsabile scientifico per l'Università Campus Bio-Medico di Roma della collaborazione con INAIL sulla cybersecurity e sull'effetto delle minacce informatiche sulla sicurezza dei lavoratori, con particolare riferimento agli Impianti Seveso.
- **Marco Papi** è Professore Associato nel ssd Metodi Matematici dell'Economia e delle Scienze Attuariali e Finanziarie presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università Campus Bio-Medico di Roma dove ricopre il ruolo di Presidente del Corso di Laurea in Ingegneria Industriale dal 2021. In precedenza, ha assunto il ruolo di vicepresidente di dipartimento, dal 2016 al 2020, e di coordinatore degli studi, dal 2013 al 2016. Il Prof. Papi è inoltre membro del board del Ph.D. Program in Methods and Models for Economic Decisions presso l'Università dell'Insubria a Varese. Dal 2005 al 2009 è stato Ricercatore presso il dipartimento di Economia dell'Università dell'Insubria, a Varese. Dal 2002 al 2003, ha ricoperto il ruolo di Research Assistant presso il Department of

Applied Mathematics dell'Università del Texas a Austin. Il Prof. Papi è docente titolare di diversi insegnamenti nell'ambito del Dipartimento di Ingegneria del Campus Bio-Medico di Roma e presso il Dipartimento di Economia e Finanza della Luiss Guido Carli di Roma.

- **Roberto Setola**, professore Ordinario (settore ING-INF/04, Automatica) ricopre il ruolo di Direttore del Laboratorio Sistemi Complessi e Sicurezza (<http://www.coseritylab.it/>) ed è anche Delegato del Rettore per i rapporti con il mondo industriale. Dal 2007 è Direttore Scientifico del Master di II livello in "Homeland Security". .. Dal 2019 lavora come esperto presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri – Ufficio del Consulente Militare per la Gestione delle Infrastrutture Critiche. Dal 2018 è Direttore Generale del Consorzio Nazionale Logistica e Trasporti (NITEL) .. Roberto Setola è il Principal Investigator di 2 progetti nazionali finanziati da INAIL ed è stato il Principal Investigator di 4 Progetti di Ricerca Internazionali, cofinanziati dall'Unione Europea e come Capo di un'Unità di Ricerca in più di 25 progetti di ricerca nazionali e internazionali. E' autore di 1 brevetto internazionale, 11 libri (di cui 9 in inglese) e di oltre 250 articoli scientifici pubblicati sui temi del Controllo Automatico, Modellazione e Controllo dei Sistemi Complessi e Sicurezza Industriale. È editor in chief della rivista International Journal of Critical Infrastructure Protection edito da Elsevier
- **Flavia Smarrazzo** è Professore Associato di Analisi Matematica presso l'Università di Roma Campus Bio-Medico. Ha partecipato a progetti di ricerca nazionali e locali (PRIN, GNAMPA, Sapienza) ed è coautrice di 31 pubblicazioni. I suoi interessi di ricerca riguardano principalmente le equazioni alle derivate parziali non lineari con dati singolari di tipo parabolico, ellittico e iperbolico. Recentemente, si è concentrata sull'esistenza di soluzioni locali e globali a modelli di chemiotassi su una rete, accoppiando un sistema iperbolico con un'equazione parabolica o ellittica, e integrate da condizioni di trasmissione adeguate ai nodi del grafo.
- **Luca Vollero** è Professore Associato di Informatica presso l'Università Campus Bio-Medico di Roma. È attualmente Membro del gruppo AQD del CdS di Ingegneria Biomedica della Facoltà di Ingegneria presso l'Università Campus Bio-Medico di Roma. Laureato in Ingegneria delle Telecomunicazioni presso l'Università Federico II di Napoli, nel 2005 consegue il Dottorato in Ingegneria Informatica e Automatica. Dal 2021 è Membro del collegio docenti per il Corso di Dottorato di Ricerca Nazionale in Intelligenza Artificiale – ambito Agricoltura (Agrifood) e Ambiente (37° Ciclo). E' socio fondatore della start-up innovativa Heremos (07/2021) operante nel campo del

monitoraggio da remoto di persone fragili. Il percorso scientifico è caratterizzato da linee di ricerca volte alla progettazione di sistemi e architetture per il monitoraggio remoto in logica IoT, il consolidamento dei dati per mezzo di tecnologie DLT e l'analisi dati per applicazioni biomedicali, agroalimentari, automotive e industriali.