

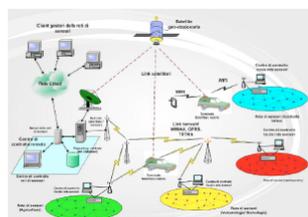


Modelli di localizzazione per reti logistiche di emergenza multirischio.[†]

Giuseppe Confessore,^a Salvatore Fiorino,^b Marco Simonetti,^a Giuseppe Stecca^a
Antonio Toscano^c

Il presente lavoro rientra nell'ambito degli studi condotti dal gruppo di lavoro per il progetto PON 2007 – 2013 – ASSE I (Piano Operativo Nazionale) denominato SIGMA (Sistema Integrato di sensori In ambiente cloud per la Gestione Multirischio Avanzata). Il progetto vede tra gli attori principali per la progettazione e lo sviluppo della piattaforma il CNR. Lo scopo del lavoro è l'analisi e la formalizzazione di problematiche di logistica in situazioni di rischio, note anche come logistica di emergenza. In particolare la problematica affrontata è la progettazione del network logistico consistente delle facilities dove collocare il personale e le attrezzature di intervento e delle connessioni tra le facilities e i luoghi di intervento. Il problema è stato modellato tramite delle variazioni al problema CFLP (Capacitated Facility Location Problem). È stato sviluppato il modello di programmazione mista (MILP - Mixed Integer Linear Programming) tramite l'ambiente CPLEX Optimization Studio v 12.5. Sono stati condotti dei test ed è stata fatta analisi di sensitività a partire da istanze relative al Sistema Informativo Territoriale Regionale (SITR) Siciliano.

Keywords: Monitoring System, Emergency logistics, MILP (mixed integer linear programming), Location - allocation, CPLEX.



1 Introduzione

Il presente articolo descrive alcuni modelli di ottimizzazione per la logistica di emergenza sviluppati nell'ambito del progetto PON 2007 – 2013 – ASSE I (Piano Operativo Nazionale) denominato **SIGMA** (*Sistema Integrato di sensori In ambiente cloud per la Gestione Multirischio Avanzata*) che vede tra gli attori principali per la progettazione e lo sviluppo della piattaforma il CNR. Il lavoro di modellazione e ottimizzazione di processi decisionali è stato sviluppato attraverso l'applicazione di competenze proprie della ricerca operativa e dell'ingegneria gestionale e finalizzate allo sviluppo di metodologie e strumenti per il supporto alle decisioni strategiche, tattiche ed operative.

Il Sistema Integrato di sensori in ambiente cloud per la

Gestione Multirischio Avanzata (SIGMA) è un'architettura multilivello che ha la funzione di acquisire, integrare ed elaborare dati eterogenei provenienti da diverse reti di sensori (meteo, sismiche, vulcaniche, idriche, pluviali, del traffico auto e navale, ambientali, video, ecc..) con lo scopo di potenziare i sistemi di controllo e di monitoraggio sia ambientali che di produzione industriale per fornire dati utili alla prevenzione e gestione di situazioni di rischio tramite servizi erogati al cittadino ed alle imprese, sia pubbliche che private. Il sistema verrà progettato per consentirne l'utilizzo anche in aree e situazioni critiche nelle quali non siano disponibili le normali infrastrutture di comunicazione necessarie a veicolare i dati raccolti dalle reti di sensori.

La parte innovativa del lavoro riguarda la modellazione degli eventi di rischio che vengono suddivisi in classi e risorse specifiche per ciascuna di queste tipologie. Nel presente lavoro, verranno poi descritti alcuni concetti legati alla realizzazione e configurazione nell'infrastruttura di telecomunicazione che veicola le informazioni e al sistema informativo che ne permette la raccolta e l'utilizzo dei dati. Lo scopo del lavoro è l'analisi e la formalizzazione di problematiche di logistica in situazioni di rischio note anche come logistica di emergenza o emergency lo-

^a CNR - Istituto delle Tecnologie Industriali e Automazione, Strada Provinciale 35/d, Montelibretti, Italia

^b CNR - Istituto di Studi sul Mediterraneo Antico, Strada Provinciale 35/d, Montelibretti, Italia

^c Nuconga s.r.l. (<http://www.nuconga.com>) – Tesista presso l'Istituto delle Tecnologie Industriali e Automazione (ITIA).

Creative Commons Attribution - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

rischio

- trasferimento dei dati fisici rilevati dalle reti di sensori verso il centro di elaborazione attraverso l'uso di opportune reti di telecomunicazioni in grado di erogare servizi con continuità ed affidabilità
- garantire uniformità dei dati provenienti dalle diverse reti eterogenee utilizzando filtri e regole ad hoc
- garantire l'accesso in mobilità alle applicazioni e ai dati utilizzati per la gestione delle attività di emergenza, monitoraggio e controllo con elevata qualità di servizio (QoS)
- implementare moduli di Decision Support System (DSS) in grado di fornire modelli previsionali, strumenti di simulazione dei possibili scenari e strumenti di controllo avanzati di supporto alle decisioni
- garantire la scalabilità, la flessibilità e la robustezza di tutto il sistema al fine di poter integrare con il minimo impatto eventuali nuovi servizi e nuove funzionalità.

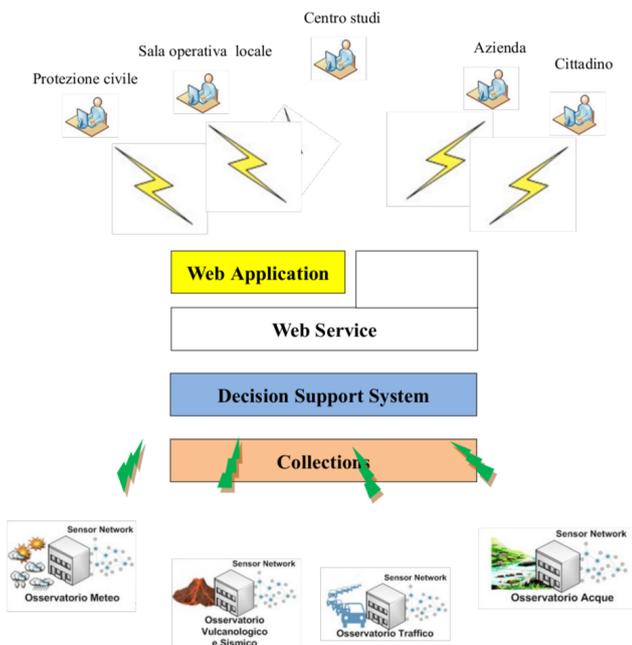


Fig. 2 Architettura del sistema

2.2 Livello “Sensor Network”

Partendo dal livello più basso troviamo le reti di sensori che costituiscono l'ossatura portante in quanto rappresentano il punto di acquisizione e trasmissione dei dati che alimenta l'intero sistema. La rilevazione dei dati proviene da diverse reti eterogenee e pertanto si tratta di dati grezzi non omogenei e non sempre comparabili.

Per garantire affidabilità, robustezza, sicurezza e continuità di servizio è necessaria una infrastruttura di telecomunicazioni ridondante che possa rispondere a qua-

lunque scenario; oltre alle reti wired, si ricorre alle reti di telefonia mobile (GPRS, 3G, LTE), WIMAX, satellitare facendo uso di alcune tecniche messe in atto in campo militare in presenza di uno scenario di guerra dove la gestione delle comunicazioni è affidata a reti definite ad hoc e dove le reti tradizionali sono spesso inesistenti o fuori uso. Inoltre, il ricorso alle Virtual Private Network (VPN) consente di stabilire delle connessioni logiche private utilizzando connessioni fisiche pubbliche; ciò è implementabile tramite la costituzione di un tunnel tra due router e uno strato di crittografia che consente la trasmissione sicura delle informazioni su una rete non sicura.

2.3 Livello “Collections”

Questo strato si pone come collettore delle reti di sensori sul campo e fornitore di collezioni di dati significative per i livelli superiori. In particolare esso ha il compito di:

- interfacciare, tramite drivers, le diverse reti eterogenee di sensori
- raccogliere la grossa mole di dati e su di essi applicare opportuni filtri e regole in grado di uniformarli eliminando ridondanze e dati non significativi o aggregandone parte di essi
- alimentare il database utilizzato per le elaborazioni dello strato superiore di “Decision Support System”

La tempestività e la delicatezza delle attività svolte da questo strato impongono, l'adozione di tutti gli strumenti in grado di garantire elevate prestazioni nella massima sicurezza ed affidabilità.

2.4 Livello “Decision Support System”

Questo livello si preoccupa di implementare l'attività di analisi dei dati, simulazione e di ottimizzazione delle soluzioni in modo da fornire strumenti (cruscotti) decisionali agli operatori del sistema. I dati depositati nel database dal livello sottostante, vengono estrapolati in maniera coerente all'utilizzo attraverso l'uso di viste specifiche; successivamente si procede alla loro elaborazione attraverso i modelli sviluppati e per finire si espongono i dati che sono di utilità per le analisi, il monitoraggio, il controllo e il supporto alle decisioni.

2.5 Livello “Web Service”

L'uso della tecnologia dei Web Service è ormai affermata da diversi anni e consente di realizzare l'interfaccia tra un sistema ed il mondo esterno attraverso lo scambio di messaggi disaccoppiando così i servizi di elaborazione e di logica applicativa rispetto alle applicazioni di vera e propria presentazione all'utente, così da rendere i servizi indipendenti dalla piattaforma client utilizzata (hardware/software).

Attraverso questa struttura è possibile esporre all'esterno una serie di servizi che possono essere utilizzati sia da applicazioni di presentazione web facenti parte del sistema stesso e sia da applicazioni esterne che possiedono una propria interfaccia grafica utente.

Ad esempio, ciò consente di sviluppare una applicazione di mobilità per uno smartphone/tablet che necessita di una interfaccia grafica diversa e più leggera rispetto ad una applicazione desktop per personal computer; il tutto utilizzando sempre lo stesso motore di logica applicativa i cui servizi sono disponibili tramite Web Service senza necessità di fornire dettagli sulla sua implementazione interna.

2.6 Livello “Web Application”

A questo livello vengono realizzate le applicazioni grafiche di interazione con l'utente che consentono di effettuare l'input dei parametri di ingresso e l'output dei risultati oggetto dell'elaborazione. Queste applicazioni vengono tipicamente sviluppate per dare accesso diretto agli utenti interni al sistema stesso. Naturalmente visto il ruolo ricoperto da questo livello, si prevede l'implementazione di un sistema di sicurezza e di gestione delle credenziali che possa essere in grado di garantire l'accesso agli utenti autorizzati e la riservatezza dei dati.

3 Modelli per la localizzazione

Il problema della localizzazione, in generale, è un quesito molto caro alle logiche industriali e commerciali, e si pone principalmente come obiettivo quello di applicare dei modelli di risoluzione che permettano di individuare il luogo di posizionamenti di un nodo (sia esso un magazzino, una fabbrica, centro di smistamento, ecc..) al fine di minimizzare i costi e massimizzare il profitto a parità di servizio fornito ai clienti. Logicamente la scelta delle localizzazioni ottimali deve avvenire in relazione alla funzione obiettivo che vogliamo massimizzare (minimizzare) e che a sua volta è fortemente influenzata dalle caratteristiche del servizio, dalle caratteristiche degli impianti dalla struttura della domanda di servizio e dalla struttura delle funzioni di costo. A seguire verranno introdotti alcuni dei modelli di Programmazione Lineare (PL) che sono di supporto alle decisioni di Facility Location Problem (FPL). Questo problema in letteratura è anche noto come plant location problem; a seconda che ciascuna potenziale facility abbia capacità finita o meno il problema è chiamato Capacitated Facility Location Problem (CFLP) oppure Uncapacitated Facility Location Problem (UFLP).² Nel caso di interesse è necessario tener conto della capacità limitata dei siti e quindi verranno sviluppati modelli Capacitati (CFLP).

3.1 Modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-LETTERATURA)

Analizziamo un problema di tipo CFLP in cui si prevede la gestione di un solo prodotto attraverso una struttura a singolo livello da sorgente (S) a destinazione (D) (es. fornitore, cliente); inoltre si considera il caso in cui ogni nodo (facility) abbia capacità finita e la domanda sia frazionabile.

L'obiettivo che vogliamo raggiungere è la determinazione della:

- Localizzazione, cioè quali nodi (facility) attivare
- Allocazione delle risorse, cioè come distribuire la domanda sulle facility attivate in relazione alle disponibilità e alle logiche individuate
- Minimizzazione, cioè, nello specifico, mantenere il più bassi possibili i costi fissi e quelli variabili.

Il modello dunque può essere definito come segue:

- Un grafo $G = \{S \cup D, A\}$, con S che rappresenta l'insieme dei nodi SORGENTE da attivare (facility potenziali), D i nodi DESTINAZIONE (pozzo, beni o clienti da servire) ed A rappresenta l'insieme degli archi che collegano S e D ($A \subseteq S \times D$);
- d_j , ($j \in D$) è la stima della domanda del nodo j ed è costante durante l'orizzonte temporale di pianificazione;
- q_i , ($i \in S$) è il massimo livello di attività del nodo potenziale i ed è costante durante l'orizzonte temporale di pianificazione
- y_i , ($i \in S$) che rappresenta una variabile binaria (1,0) con la quale indichiamo l'attivazione o meno di uno specifico nodo (1 = nodo attivato, 0 = nodo non attivato)
- x_{ij} , ($i \in S, j \in D$) rappresenta una variabile che indica la frazione di quantità richiesta dal nodo j e rifornita da i
- c_{ij} , ($i \in S, j \in D$) sono i costi legati al flusso dal nodo sorgente i al nodo destinazione j
- f_i , ($i \in S$) rappresenta il costo legato all'attivazione del nodo facility i .

La funzione obiettivo per costi lineari è la seguente:

$$(f.o.) \min \sum_{i \in S} \sum_{j \in D} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in S} f_i y_i$$

che minimizza i costi complessivi di attivazione e localizzazione facility.

I vincoli invece sono:

1. $\sum_{i \in S} x_{ij} = 1, j \in D$
2. $\sum_{j \in D} d_j x_{ij} \leq q_i y_i, i \in S$
3. $x_{ij} \geq 0, i \in S, j \in D$
4. $y_i \in \{0, 1\}, i \in S$

dove:

1. garantisce che la domanda di ogni nodo cliente j sia soddisfatta;
2. garantisce che il flusso in uscita dal nodo i non superi il livello massimo consentito q sul nodo stesso;
3. garantisce che ci sia quantità richiesta di generico servizio tra i e j
4. garantisce che il nodo faccia parte degli attivabili.

Il problema CFPL è un problema che rientra tra quelli NP-difficili o NP-ardui (NP-hard, da non-deterministic polynomial-time hard, "difficile non deterministico in tempo polinomiale") e non è risolvibile in tempo polinomiale; quindi per trovare una soluzione si ricorre all'utilizzo di algoritmi euristici.

3.2 Modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-VERSIONE 1)

Il modello sopra enunciato è molto generico e proprio per questo si presta a molte customizzazioni per renderlo adatto al caso in cui lo vogliamo applicare. Un esempio di personalizzazione può essere quello in cui possiamo considerare che il nostro non è un semplice modello di localizzazione, ma che stiamo parlando di un modello per situazioni di emergenza e quindi dobbiamo considerare la minimizzazione dei costi anche in base al fattore di rischio. Pertanto dobbiamo costruire una serie di scenari, dipendenti da altri eventi, che rendono variabile la stima della domanda e dei costi di afferenza. Quindi, per ambiti che si possono definire multi-rischio, prendiamo in considerazione quanto segue:

- d_{jl} , ($j \in D, l \in L$) rappresenta la stima della domanda del nodo j in funzione dell'evento l , con L l'insieme degli eventi considerati
- q_i , ($i \in S$) è la capacità massima di attività del nodo potenziale i (costante durante l'orizzonte temporale di pianificazione)
- y_i , ($i \in S$) che rappresenta una variabile binaria (1,0) con la quale indichiamo l'attivazione o meno di uno specifico nodo (1 = nodo attivato, 0 = nodo non attivato)
- x_{ijl} , ($i \in S, j \in D, l \in L$) rappresenta una variabile che indica la frazione di quantità richiesta dal nodo j e soddisfatta da i a seguito dell'evento l
- c_{ijl} , ($i \in S, j \in D, l \in L$) sono i costi legati al flusso dal nodo sorgente i al nodo destinazione j in funzione dell'evento l
- f_i , ($i \in S$) rappresenta i costi legati all'attivazione del nodo facility i .

Pertanto la nuova funzione obiettivo può essere così modificata:

$$(f.o) \min \sum_{i \in S} \sum_{j \in D} c_{ijl} x_{ijl} + \sum_{i \in S} f_i y_i$$

Che minimizza i costi complessivi e di attivazione delle facility.

I vincoli, invece, si modificano come segue:

1. $\sum_{i \in S} x_{ijl} = d_{jl}, j \in D, l \in L$
2. $\sum_{j \in D} x_{ijl} \leq q_i y_i, i \in S, l \in L$
3. $x_{ijl} \geq 0, i \in S, j \in D, l \in L$
4. $y_i \in \{0, 1\}, i \in S$

3.3 Modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-VERSIONE 2)

Nel modello che andremo ad esplicitare in questo paragrafo, è presente un'ulteriore aggiunta che rende il lavoro ancora più interessante, ovvero andiamo a differenziare il personale che è presente nelle diverse facility (il personale con mansioni diverse viene rappresentato con k). Non vengono messe delle univocità sul personale che dovrà essere utilizzato e l'evento che si deve affrontare, ma viene introdotto un fattore tridimensionale $b[j, l, k]$ o $b[\text{Demand}]$ che rappresenta il minimo di personale k da utilizzare per tipo di evento l in una specifica destinazione j . Inoltre tramite un fattore di penalità (o matrice di conversione tra risorse) si potrebbe utilizzare anche altro personale non necessariamente indicato e specializzato per l'evento specifico (per un Incendio anche DPC invece del VdF); l'utilizzo di personale diverso rispetto all'impiego di quello originalmente dichiarato come necessario va ad incidere sul valore della funzione obiettivo.

Quindi, prendiamo in considerazione quanto segue:

- d_{jlk} , ($j \in D, l \in L, k \in K$) rappresenta la stima della domanda del nodo j in funzione dell'evento l del personale specializzato k
- q_{ik} , ($i \in S, k \in K$) è il massimo livello di personale di tipo k del nodo potenziale i
- y_i , ($i \in S$) che rappresenta una variabile binaria (1,0) con la quale indichiamo l'attivazione o meno di uno specifico nodo (1 = nodo attivato, 0 = nodo non attivato)
- x_{ijlk} , ($i \in S, j \in D, l \in L, k \in K$) rappresenta una variabile che indica la frazione di quantità richiesta dal nodo j e soddisfatta da i a seguito dell'evento l con l'impiego di personale specializzato k
- c_{ijlk} , ($i \in S, j \in D, l \in L, k \in K$) sono i costi legati al flusso dal nodo sorgente i al nodo destinazione j in funzione dell'evento l con l'impiego di personale specializzato k
- b_{jlk} , ($j \in D, l \in L, k \in K$) rappresenta il minimo impiego di personale specializzato k nel nodo j in funzione dell'evento l

- w_{lk} , ($l \in L, k \in K$) rappresenta il fattore di penalità che abbiamo nell'utilizzare specializzato k per l'evento l con k non propriamente specializzato nella risoluzione del problema l
- f_i , ($i \in S$) rappresenta i costi legati all'attivazione del nodo facility i

Pertanto la nuova funzione obiettivo può essere così modificata:

$$(f.o.) \min \sum_{i \in S} \sum_{j \in D} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_{i \in S} f_i y_i + \sum_{j \in D} w_{lk} \times (d_{jlk} - x_{ijkl})$$

Che minimizza i costi complessivi di attivazione e la localizzazione delle facility. I vincoli, invece, si modificano come segue:

1. $\sum_{i \in S} x_{ijkl} \leq d_{jlk}$, $j \in D$, $l \in L$, $k \in K$
2. $\sum_{j \in D} x_{ijkl} \leq q_{ik} y_i$, $i \in S$, $l \in L$
3. $x_{ijkl} \geq 0$, $i \in S$, $l \in L$, $j \in D$, $k \in K$
4. $\sum_{i \in S} x_{ijkl} \geq b_{jlk}$, $j \in D$, $l \in L$, $k \in K$
5. $y_i \in \{0, 1\}$, $i \in S$

4 Scelta dello strumento per l'ottimizzazione: CPLEX Optimization Studio

La scelta dello strumento di ottimizzazione è ricaduta su IBM ILOG CPLEX Optimization Studio³ (o più semplicemente CPLEX) che è completamente integrato con OPL (l'IBM è la proprietaria e principale sviluppatrice di entrambi). CPLEX è un solver commerciale (scritto in C) dedicato alla risoluzione e all'ottimizzazione di problemi matematici di vario tipo; è fortemente utilizzato in ambito industriale e di ricerca ed è noto per la sua stabilità e le sue elevate prestazioni (per molto tempo è stato considerato come il più performante ed ha una elevata diffusione sul mercato, oggi esistono ulteriori sistemi allo stesso livello come Gurobi⁴, rilasciato da alcuni ex-sviluppatori di CPLEX); CLPEX risolve problemi di PLI tramite diversi algoritmi tra cui diverse implementazioni di Branch&Cut];⁵ risolve rilassati continui tramite avanzate routine riconducibili alla tecnica del simplesso.

Come prima operazione viene costruito un albero decisionale in cui ogni nodo corrisponde ad un sotto-problema, poi ogni sotto-problema viene risolto; se ci sono soluzioni frazionarie, vengono introdotti tagli e il modello risultante viene risolto nuovamente (ogni nodo può prevedere più risoluzioni). Se non ci sono più tagli da aggiungere, vengono generati i sotto-problemi tramite branching su una delle variabili frazionarie; l'esplorazione dell'albero continua finché non si giunge alla soluzione

ottima. CPLEX è caratterizzato da diversi elementi che lo compongono:

- preprocessing (presolve + probing) nel quale vengono eliminati vincoli e variabili inutili e analizzate le implicazioni logiche derivanti dall'assegnamento di valori interi alle variabili intere;
- i tagli vengono introdotti nel modello in modo statico;
- procedimenti euristici eseguiti "occasionalmente" per migliorare i bound.

CPLEX può essere utilizzato secondo diverse modalità, in relazione all'uso che se ne vuole fare e al contesto di descrizione del problema.

- Modalità interattiva: applicazione con la quale è possibile interagire tramite riga di comando. Si può descrivere il modello del problema (o importarlo da un file esterno) tramite una determinata sintassi, configurare il risolutore tramite l'impostazione di parametri opportuni e infine chiedere l'ottimizzazione del modello specificato
- C Callable Library: libreria di funzioni C tramite le quali si può comandare CPLEX e gestirne le funzionalità
- Concert Technology: le funzionalità di CPLEX sono disponibili sotto forma di librerie (C++, .NET e Java) linkabili in modo dinamico.

Le ultime due modalità permettono di interfacciarsi col risolutore all'interno di un altro software più ampio (embedding), lasciando ad esso il controllo del processo ed eliminando la necessità di una interazione real-time da parte di un utente.

5 Implementazione, Test e Conclusioni

5.1 Implementazione ed esempio del modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-LETTERATURA)

Partendo dal problema della letteratura possiamo effettuare delle prove sul funzionamento dell'accoppiata CPLEX e OPL, utilizzati dal software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.

Per fare questo, in relazione anche al nostro scopo iniziale, prendiamo in esame una situazione base che si può verificare nella regione Sicilia, la principale fruitrice del nostro lavoro e del bando relativo al progetto SIGMA.

A partire dai dati forniti dal Sistema Informativo Territoriale Regionale (S.I.T.R.) (<http://www.sitr.regione.sicilia.it>)⁶ abbiamo reperito le informazioni di base che ci permettono di creare dei file di partenza (in relazione al nostro modello base creiamo il file .mod e a partire da i primi dati semplici il .dat).

Il modello di riferimento è quello che abbiamo descritto con il nome CFLP-LETTERATURA.

Di seguito vengono spiegate le logiche del caso reale preso in considerazione per testare la nostra prima modellazione del problema. Per far comprendere al meglio il problema e la sua trasposizione in linguaggio matematico, seguono alcune considerazioni e supposizioni importanti che ci rendono più facile intuire il comportamento nei casi reali (nelle successive formulazioni, di volta in volta saremo sempre più specifici e tenteremo di analizzare il più possibile e sopporre il meno):

- Per determinare i costi che poi dovremo minimizzare nella nostra funzione obiettivo, siamo partiti da una matrice FACILITY-DESTINAZIONE che contiene le informazioni sulle distanze (archi o strade) tra i vari nodi. • Come ipotesi di partenza fissiamo un costo (nel nostro caso 40 €/km) che chiamiamo costo d'intervento, che rappresenta una stima di quanto dobbiamo spendere per servire una determinata destinazione dalla nostra facility dove sono pronte le forze di soccorso; quindi moltiplicando per 40 tutte le distanze otteniamo i dati inizializzati nella variabile c del file .dat.
- Abbiamo inoltre dei costi specifici (€) di attivazione delle diverse facility rappresentate nel vettore f .
- Abbiamo infine ipotizzato che la capacità di ogni facility sia di 100 unità di personale e che debbano essere servite tutte le destinazioni (quindi il caso peggiore in cui un evento catastrofico sia presente in tutte le nostre destinazioni).

Può essere molto interessante anche capire la sensibilità del modello, in relazione al variare dei parametri; in particolare si possono far variare alcuni dati, come ad esempio, i costi fissi di attivazione (f), le domande (d) ed anche la quantità (q) a disposizione per vedere come cambiano le soluzioni.

Nel vettore delle soluzioni, riportato in appendice, vediamo come il solver, restituisce una soluzione ottima con un valore della (f.o.) pari a 7956, dove vengono attivati soltanto due nodi facility, come si può dedurre dal valore della Y (Alì Terme e Ganzirri), che mettono a disposizione il personale per far fronte agli eventi; il vettore X contiene l'informazione sugli archi attivati, cioè come e da chi vengono servite le destinazioni.

Questo caso/esempio iniziale, che può sembrare un semplice esercizio, è in realtà il punto di partenza per il lavoro successivo, al fine di entrare in un contesto che sia meno didattico e più reale e che ci permetta di modellare il problema tenendo entrambi gli occhi ben puntati su quello che si vuole realizzare e sulle possibili implementazioni che modellino il più fedelmente possibile la realtà.

5.2 Implementazione ed esempio del modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-VERSIONE 1)

Il modello di riferimento è quello che abbiamo descritto con il nome CFLP-VERSIONE 1.

Per far comprendere al meglio il problema e la sua trasposizione in linguaggio matematico, seguono alcune considerazioni e supposizioni importanti che ci rendono più facile la descrizione che integrano le considerazioni fatte in merito all'implementazione del modello precedente. Rispetto ad esso, in aggiunta, valgono anche le seguenti considerazioni:

- Abbiamo esplicitato il personale richiesto dai nodi destinazione per sedare l'evento /catastrofe che si è sviluppato.

Dal RUN della configurazione del nostro problema possiamo notare come nella soluzione, ottima con valore della (f.o.) pari a 82404, siano stati distribuiti gli interventi e attivate le facility. Anche in questo caso vengono attivati soltanto due nodi facility, come si può dedurre dal valore della Y (Alì Terme e Ganzirri), che mettono a disposizione il personale per far fronte ai diversi eventi (incendi e alluvione); il vettore delle X ci dice quale sono gli archi attivati, cioè come e da chi vengono servite le destinazioni. Può essere interessante, analizzare il peso delle diverse componenti della funzione obiettivo:

$Z=8240 \rightarrow$ (valore all'ottimo della funzione obiettivo);

$Z1=42404 \rightarrow$ (componente legata alle scelte di servizio);

$Z2=40000 \rightarrow$ (componente legata ai costi fissi di attivazione);

Notiamo come i costi siano dello stesso ordine di grandezza, in pratica simili, e che i costi di attivazione incidono in maniera preponderante sulla scelta delle logiche di servizio. Possiamo anche, al fine di comprendere al meglio la soluzione e il modello stesso, provare a tralasciare i costi fissi, per comprendere come variano le scelte di attivazione delle facility (location) ed archi (allocation).

Balza subito agli occhi un importante decremento del valore della funzione obiettivo, oltre al fatto che, non essendoci più i costi di attivazione (che avevamo detto essere importanti e pesanti) il vettore Y ci mostra che vengono attivate tutte le facility. L'attivazione di tutte le facility era attesa perché a questo punto si deve soltanto ottimizzare il costo di servizio delle diverse destinazioni, che verrà fatto in base alla distanza (visto che i costi sono espressi per €/km). Continuiamo come detto con un'ulteriore complicazione del modello introducendo altri scenari e fattori.

5.3 Implementazione ed esempio del modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-VERSIONE 2)

Il modello di riferimento è quello che abbiamo descritto con il nome CFLP-VERSIONE 2.

Per far comprendere al meglio il problema e la sua trasposizione in linguaggio matematico, seguono alcune considerazioni e supposizioni importanti che ci rendono più facile comprendere il problema e in particolare che lo differenziano dalle precedenti versioni:

- Per determinare i costi che abbiamo nel nostro caso, abbiamo analizzato il problema secondo quanto dichiarato nel modello tenendo in considerazione le distanze tra la facility (i) e il nodo destinazione (j). Valgono le considerazioni già fatte nel caso precedente sulle vie da utilizzare in relazione all'evento/catastrofe che si presenta; in aggiunta in questo caso abbiamo differenziato i costi tenendo presente anche che esiste diverso personale specializzato che ha un costo differente (oltre a definire delle peculiarità/competenze specifiche). Abbiamo ipotizzato dei costi differenti per i diversi gruppi di personale specializzato quantificando in 50 € il costo dei Vigili del Fuoco (VdF) e in 40 € il costo d'intervento della Protezione Civile (DPC)
- Come importante caratterizzazione di questo modello abbiamo elencato il personale presente nelle diverse facility esplicitandolo per competenze/corpo di appartenenza
- Introduciamo un fattore di penalità w che entra in gioco nel momento in cui non si soddisfa di un'unità di personale k la richiesta per l'evento l (nel sito j) e ci peggiora economicamente la situazione;
- Inoltre esplicitiamo i valori delle domande d [Demand] dei nodi destinazione e di b [Demand] che è un ulteriore parametro (intero) utilizzato per indicare il numero minimo di personale specializzato che imponiamo essere necessario per affrontare la catastrofe. È importante notare che l'introduzione di tale fattore b serve a prevenire una problematica che potrebbe portare a sostituire interamente una risorsa specializzata con un'altra non specializzata. Poniamo ad esempio il caso in cui, secondo una tabella di equivalenza imponiamo che 10 infermieri valgono come un vigile del fuoco, il nostro sistema potrebbe prevederne l'utilizzo sostitutivo, ma la realtà ci dice che questo non può essere possibile. Quindi la sostituzione è prevista solo in quota parte (parametro b) e accompagnata da penalizzazione (parametro w).

Da quanto riportato nel vettore delle soluzioni in appendice, vediamo l'utilizzo del diverso personale afferente alle facilities attivate, in relazione alla nostra funzione obiettivo.

Per comprendere meglio la composizione della soluzione, possiamo analizzare i diversi fattori che influiscono su di essa:

$Z=306074 \rightarrow$ (valore all'ottimo della funzione obiettivo);

$Z1=218774 \rightarrow$ (componente legata alle scelte di servizio);

$Z2=80000 \rightarrow$ (componente legata ai costi fissi di attivazione);

$Z3=7300 \rightarrow$ (componente che quantifica la penalità);

Come possiamo notare dalle soluzioni e dai diversi fattori che la compongono, la penalità per le situazioni non correttamente servite ($Z3$) è bassa nonostante i fattori moltiplicativi w siano molto alti; questo significa che per come è posto il problema, le facilities e il loro dimensionamento, sono adeguate e possiamo fronteggiare gli eventi che si presentano diminuendo il più possibile i casi di disservizio.

6 Considerazioni e conclusioni

Il presente articolo ha mostrato alcune possibili modellazioni legate alla problematica della logistica di emergenza. In particolare si è trattato il caso di studiare l'ottimizzazione di decisioni strategiche legate alla localizzazione di centri operativi per il soccorso in situazioni di emergenza e della allocazione di tali centri a bacini di utenza. Il lavoro ha previsto la costruzione di modelli derivati dai classici facility location problem in cui sono state inserite considerazioni relative all'utilizzo di multi risorse, la codifica di eventi di rischio, l'utilizzo alternativo tra risorse. Il lavoro ha inoltre previsto la definizione di una architettura informatica che possa supportare i processi decisionali legati alla logistica di emergenza. Infine sono state svolte delle sperimentazioni che hanno permesso di verificare la validità dei modelli in situazioni realistiche. Come estensione futura del lavoro si prevede di aumentare le dimensioni dei tests, di considerare in modo più specifico alcune tipologie di rischi, di implementare la piattaforma sull'architettura descritta, in linea con gli sviluppi del progetto SIGMA di cui questo lavoro rappresenta un contributo.

7 Appendice

(codice dei file .mod e .dat e le soluzioni di CPLEX)

7.1 Modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-LETTERATURA)

Segue il file relativo al modello in considerazione:

```
##### INIZIO FILE .mod #####
/*****
* OPL 12.5 Model
*****/
// dichiarazioni variabili e insiemi//
{string} S = ...;
{string} D = ...;
int q [S] = ...;
int d [D] = ...;
float c [S][D] = ...;
int f [S] = ...;
dvar boolean y [S];
dvar int+ x [S][D];
//dichiarazioni termini funzione obiettivo//
dexpr float Z1 = sum (i in S, j in D) c[i][j] * x[i][j];
dexpr int Z2 = sum (i in S) f [i] * y[i];
dexpr float Z = Z1 + Z2;
// funzione obiettivo //
minimize Z;
//dichiarazione dei vincoli//
subject to {
//vincolo (1)//
forall (j in D)
v_1: sum (i in S) x[i][j]>=1;
//vincolo (2)//
forall (i in S)
v_2: sum (j in D) d[j] * x[i][j] <= q[i] * y[i];
// fine// }
##### FINE FILE .mod #####
```

Segue il file dei dati:

```
##### INIZIO FILE .dat #####
/*****
* OPL 12.5 Data
*****/
//Destinazioni//
D = {"Alì", "Altolia", "Itala", "Bordonaro", "Faro
Superiore", "Galati Superiore", "Giampillieri", "Messina",
"Rizzotti", "Scaletta Superiori"};
//Facility//
S = {"Alì Terme", "Galati Marina", "Ganzirri",
"Roccalumera", "Tremestri"};
//capacità facility//
q = [100, 100, 100, 100, 100];
//domanda destinazioni//
d = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];
// inizializzazione matrice costi (i,j) --> servire j da i//
c = #{"Alì Terme": [280, 580, 992, 1484, 600, 428, 296,
1172, 1216, 340], "Galati Marina": [700, 424, 452, 964,
116, 272, 452, 512, 696, 392], "Ganzirri": [1660, 1384,
588, 144, 1076, 1232, 1412, 376, 324, 1352],
"Roccalumera": [484, 784, 1196, 1720, 804, 628, 500,
1268, 1416, 544], "Tremestri": [948, 676, 252, 764, 304,
460, 704, 312, 496, 576] }#;
f = [2800, 4000, 1200, 2200, 4800];
##### FINE FILE .dat #####
```

Di seguito le soluzioni restituite dal solver CPLEX:

```
##### INIZIO SOLUTIONS #####
// solution (optimal) with objective 7956
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective 7.95600000000e+003
// MILP solution norm |x| (Total, Max)
1.20000e+001 1.00000e+000
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max) 6.66134e-016
6.66134e-016
// MILP x integrality error (Total, Max) 3.33067e-015
6.66134e-016
// MILP slack bound error (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
x = [[1 1 0 0 1 1 1 0 0 1]
[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
[0 0 1 1 0 0 0 1 1 0]
[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]];
y = [1 0 1 0 0];
##### FINE SOLUTIONS #####
```

7.2 Modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-VERSIONE 1)

Segue il file relativo al modello in considerazione:

```
##### INIZIO FILE .mod #####
/*****
* OPL 12.5 Model
*****/
// dichiarazioni variabili e insiemi//
{string} S = ...;
{string} D = ...;
{string} L = ...;
int q [S] = ...;
int d [D][L] = ...;
tuple scenario {
string i;
string j;
string l; }
{scenario} Scenario = {<i,j,l> | i in S, j in D, l in L};
float c[Scenario] = ...;
int f [S] = ...;
dvar boolean y [S];
dvar int+ x [Scenario];
//dichiarazioni termini f.o.//
dexpr float Z1 = sum (<i,j,l> in Scenario) c[<i,j,l>] *
x[<i,j,l>];
dexpr int Z2 = sum (i in S) f [i] * y[i];
dexpr float Z = Z1 + Z2;
//f.o.//
minimize Z;
//dichiarazione dei vincoli//
subject to {
//vincolo (1)//
forall (j in D, l in L)
v_1: sum (i in S) x[<i,j,l>] == d[j][l];
//vincolo (2)//
forall (i in S, l in L)
```

```

v_2: sum (j in D) x[<i,j,l>] <= q[i] * y[i];
//vincolo (3)//
forall (<i,j,l> in Scenario)
v_3: x[<i,j,l>] >= 0;
}
##### FINE FILE .mod #####

Segue il file dei dati:

##### INIZIO FILE .dat #####
/*****
* OPL 12.5 Data
*****/
//Facility//
S = {"Ali Terme", "Galati Marina", "Ganzirri",
"Roccalumera", "Tremestieri"};
//Destinazioni//
D = {"Ali", "Altolia", "Itala", "Bordonaro", "Faro
Superiore", "Galati Superiore", "Giampilieri", "Messina",
"Rizzotti", "Scaletta Superiore"};
//Eventi o catastrofi//
L = {"Incendio", "Alluvione"};
//Capacità facility//
q = [100, 100, 100, 100, 100];
//Domanda destinazioni per evento//
//per la destinazione j per ogni evento esplicito le
richieste//
d = #{"Ali":{3,5}, "Altolia":{3,7}, "Itala":{4,2},
"Bordonaro":{5,8}, "Faro Superiore":{9,2},
"Galati Superiore":{4,6}, "Giampilieri":{2,8},
"Messina":{10,10}, "Rizzotti":{3,5}, "Scaletta Superiore":
{4,6}}#;
//Vettore dei costi per arco i,j ed eventi l//
c=[280,280,580,580,992,1400,1484,2024,600,600,428,428,
296,296,1172,1580,1216,1756,340,340,700,776,424,424,452,
472,964,1096,116,116,272,272,452,452,512,652,696,828,392,
392,1660,2240,1384,1480,588,704,144,204,1076,1196,1232,
1372,1412,1800,376,408,324,440,1352,1600,484,608,784,880,
1196,1340,1720,1820,804,1096,628,760,500,628,1268,1376,
1416,1552,544,636,948,1532,676,676,252,316,764,940,304,
304,460,460,704,704,312,356,496,668,576,576];
f = [28000, 40000, 12000, 22000, 48000];
##### FINE FILE .dat #####

```

Di seguito le soluzioni restituite dal solver CPLEX:

```

##### INIZIO SOLUTIONS #####
// solution (optimal) with objective 82404
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective 8.2404000000e+004
// MILP solution norm |x| (Total, Max)
1.08000e+002 1.00000e+001
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x integrality error (Total, Max)
1.77636e-015 1.77636e-015
// MILP slack bound error (Total, Max)
1.77636e-015 1.77636e-015
x = [3 5 3 7 0 0 0 0 9 2 4 6 2 8 0 0 0 0 4 6 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 2 5 8 0 0 0 0
0 0 10 10 3 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
y = [1 0 1 0 0];
##### FINE SOLUTIONS #####

```

Soluzioni relative allo scenario che tralascia i costi fissi di attivazione (f) delle facilities:

```

##### INIZIO SOLUTIONS #####
// solution (optimal) with objective 30680
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective
3.0680000000e+004
// MILP solution norm |x| (Total, Max)
1.11000e+002 1.00000e+001
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x bound error (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP x integrality error (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
// MILP slack bound error (Total, Max)
0.00000e+000 0.00000e+000
x = [3 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 8 0 0 0 0 4 6 0 0 3 7 0 0 0
0 9 2 4 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 8 0 0 0 0 0 0 0
3 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4
2 0 0 0 0 0 0 0 10 10 0 0 0 0];
y = [1 1 1 1 1];
##### FINE SOLUTIONS #####

```

7.3 Modello di localizzazione discreta, singolo prodotto, singolo livello, capacità finita (CFLP-VERSIONE 2)

Segue il file relativo al modello in considerazione:

```

##### INIZIO FILE .mod #####
/*****
* OPL 12.5 Model
*****/
// dichiarazioni variabili e insiemi//
{string} S = ...;
{string} D = ...;
{string} L = ...;
{string} K = ...;
int q [S][K] = ...;
tuple scenario {
string i;
string j;
string l;
string k; }
tuple demand {
string j;
string l;
string k; }
tuple penalty {
string l;
string k;}
{scenario} Scenario = {<i,j,l,k> | i in S, j in D, l in L,
k in K};
{penalty} Penalty = {<l,k> | l in L, k in K};
{demand} Demand = {<j,l,k> | j in D, l in L, k in K};
int b[Demand]= ...;
int d[Demand]= ...;
float w[Penalty]= ...;
float c[Scenario] = ...;
int f [S] = ...;
dvar boolean y [S];
dvar int+ x [Scenario];
//dichiarazioni termini f.o.//

```


8 Glossario

- **CFLP** Capacitated Facility Location Problem
- **CPLEX** Solver scritto in C che prende il nome del semplice. Risolve problemi di programmazione lineare intera, problemi di programmazione lineare e problemi di programmazione mista
- **DSS** Decision Support System
- **OPL** Optimization Programming Language (Linguaggio proprietario ILOG / IBM)
- **MILP** - Mixed Integer Linear Programming
- **SIGMA** Sistema Integrato di sensori In ambiente cloud per la Gestione Multirischio Avanzata
- **SITR** Sistema Informativo Territoriale Regionale
- **UFLP** Uncapacitated Facility Location Problem

Riferimenti

- 1 J.-B. Sheu, Challenges of emergency logistics management, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 43 (6) (2007) 655 – 659. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.01.001>.
- 2 D. Menerba, «Ingegneria - Università di Brescia», 2010. [Online](#).
- 3 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio [online] (<http://www-03.ibm.com/software/products/it/it/ibmilogcpleoptistud/>).
- 4 Gurobi [online] (<http://www.gurobi.com/>).
- 5 F. Filippi, Pianificazione e gestione dell'emergenza, La Sapienza, Roma, 2002.
- 6 Regione Sicilia, Sistema Informativo Territoriale Regionale (S.I.T.R.), [Online]. (<http://www.sitr.regione.sicilia.it/>).