

# Ricerca di Sistema elettrico



## Modelli ottimizzazione rete di distribuzione elettrica (LA2.16)

Laura Palagi, Veronica Piccialli, Valerio Dose, Giampaolo Liuzzi, Marianna de Santis



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Modelli ottimizzazione rete di distribuzione elettrica

LA2.16 Modelli ottimizzazione rete di distribuzione elettrica

Laura Palagi, Veronica Piccialli, Valerio Dose, Giampaolo Liuzzi, Marianna de Santis

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 2.16

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Laura Palagi, DIAG Sapienza Università di Roma

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: *Modelli ottimizzazione rete di distribuzione elettrica*

## Indice

1	Risultati attesi .....	3
2	Risultati ottenuti .....	4
2.1	Analisi della letteratura esistente .....	4
2.2	Definizione dei parametri di interfaccia input/output e aggiornamento del sistema RecSim .....	4
2.3	Integrazione del simulatore RecSim con un modello di ottimizzazione .....	4
3	Prodotti attesi .....	5
4	Prodotti sviluppati .....	6
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati .....	7
6	Sintesi delle attività svolte .....	8
7	Dettaglio delle attività svolte .....	9
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte .....	13
9	Pubblicazioni scientifiche .....	14
10	Eventi di disseminazione .....	15

## Indice delle figure

Figura 1 Input and Outpu del simulatore RecSIM.....	10
Figura 2 esempio di rete di distribuzione elettrica con interruttori automatici (rosso), interruttori tele-gestiti (rosa), interruttori (bianco o blu). .....	10
Figura 3 schema di interazione input/output Simulatore- Modelli PLMI .....	11
Figura 4 Figura 4: valore de CMI per diversi valori del numero di guasti (asse delle ascisse) in corrispondenza a N squadre per N=2,3,4,5 .....	12
Figura 5 OPT-RecSlm in confronto con la procedura euristica standard.....	12

## 1 Risultati attesi

I risultati attesi di questa linea di attività sono:

- analisi della letteratura esistente per la modellizzazione di problemi di pianificazione e gestione ottima di reti elettriche e degli algoritmi per la soluzione;
- definizione dei parametri di interfaccia input/output per l'utilizzo del simulatore RecSIM e aggiornamento del sistema RecSIM per simulare la resilienza di una rete in condizioni di normale operatività della rete e in condizioni estreme;
- integrazione del simulatore RecSIM con un modello di ottimizzazione e utilizzo di algoritmi open-source di programmazione non lineare intera per la determinazione di soluzioni ottime per il ripristino della rete; analisi dei risultati dal punto di vista della dimensione della rete e della qualità della rete rispetto alla resilienza e dell'onere computazionale degli algoritmi di ottimizzazione per validare la possibilità di utilizzo in tempo reale;

## 2 Risultati ottenuti

### 2.1 Analisi della letteratura esistente

L'analisi della letteratura scientifica ha premesso di fornire una panoramica su modelli matematici di ottimizzazione sia per pianificazione che per la gestione in modo ottimo di reti elettriche quando si vuole analizzare la resilienza rispetto a possibili scenari di guasti sulla rete. Sono stati approfonditi anche i possibili algoritmi euristici ed esatti per la determinazione della sequenza ottima delle operazioni.

### 2.2 Definizione dei parametri di interfaccia input/output e aggiornamento del sistema RecSIM

Il simulatore RecSIM è stato integrato per simulare il comportamento di una rete elettrica in condizioni di normale operatività della rete e non solo in condizioni estreme, allo scopo di valutare la resilienza.

In tal senso il simulatore è stato arricchito con

1. Un modello di rete elettrica più dettagliato rispetto a quello implementato in precedenza
2. Possibilità di simulazione di eventi di guasto sia sui nodi che su linee di collegamento sia lievi che di grave entità
3. Implementazione di procedure euristiche per l'individuazione del guasto.

Il simulatore RecSIM a seguito delle modifiche descritte è molto più realistico e consente di effettuare un'analisi più aderente ai possibili scenari reali sia lievi che catastrofici. Il simulatore è stato testato su rete realistica di una grande città metropolitana per valutare la resilienza.

### 2.3 Integrazione del simulatore RecSIM con un modello di ottimizzazione

Il simulatore aggiornato è stato integrato con un modello di ottimizzazione per la definizione di procedure ottime di riconfigurazione. In particolare, è stato impostato il problema di ottimizzazione della sequenza di riparazione per ripristinare la rete di distribuzione elettrica dopo un'interruzione per guasto. Il sistema integrato simulatore-ottimizzatore, denominato OPT-RecSIM, consente di verificare gli effetti del guasto e delle conseguenti operazioni di ripristino su reti elettriche complesse e di quantificare con KPI specifici gli effetti di diverse soluzioni. I modelli di ottimizzazione ottenuti con analisi di scenario su una rete metropolitana di grande dimensione sono stati risolti con algoritmi open-source avanzati, dimostrando l'efficacia dell'approccio. I risultati sono stati analizzati sia dal punto di vista della dimensione del problema (dimensione della rete, numero di guasti, numero di squadre disponibili), e del conseguente onere computazionale degli algoritmi di ottimizzazione, sia della qualità rispetto alla resilienza, per validare la possibilità di utilizzo in tempo reale.

### **3 Prodotti attesi**

Rapporto tecnico e possibili pubblicazioni su riviste internazionali

## 4 Prodotti sviluppati

L'attività di ricerca ha prodotto due tesi di laurea magistrale in ingegneria gestionale 2024

- Realizzazione di uno strumento di supporto per lo sviluppo di procedure ottimali per la riconfigurazione di reti di distribuzione elettriche
- Gestione ottimale di squadre di emergenza e generatori in caso di guasti alla rete elettrica: formulazione di un modello di ottimizzazione e integrazione in una piattaforma di simulazione delle operazioni di ripristino

Inoltre, è stato rilasciato un rapporto tecnico

[Opt-RecSIM: An Optimization-Simulation Integrated System for the Repair Sequence Optimization Problem by Atanu Maji, Anna Livia Croella, Valerio Dose, Gregorio D'Agostino, Laura Palagi, Alberto Tofani](#)

sottomesso per la pubblicazione su rivista internazionale.

Inoltre, è stato realizzato un nuovo sistema integrato simulatore-ottimizzatore OPT-RecSIM.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si riscontrano scostamenti dalle attività previste

## 6 Sintesi delle attività svolte

Le attività di ricerca della LA hanno riguardato gli aspetti metodologici e pratici di realizzazione di un sistema integrato di simulazione-ottimizzazione per definire la procedura di ottimizzazione della sequenza delle operazioni di ripristino in una rete di media tensione.

Il sistema, denominato OPT-RecSIM, integra il simulatore di resilienza RecSIM, sviluppato dall'ENEA, con un modello di scheduling per macchine parallele identiche.

Sono stati proposti diversi scenari di guasti su una rete metropolitana, che dimostrano l'efficacia del procedimento. I risultati sottolineano il valore dell'integrazione delle tecniche di ottimizzazione nelle strategie di risposta alle emergenze, che in ultima analisi migliorano la resilienza urbana e accelerano gli sforzi di ripristino dell'energia elettrica.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Il progetto si inserisce nel crescente interesse verso le reti elettriche di media tensione con l'obiettivo di ottimizzare la gestione, la pianificazione e il funzionamento dei sistemi elettrici moderni. Le reti di distribuzione elettriche sono tra le infrastrutture più importanti per le città o le grandi aree metropolitane a complessità molto elevata. Obiettivo della LA è lo sviluppo di una piattaforma integrata che unisca modelli di simulazione dettagliati delle reti elettriche con tecniche di ottimizzazione avanzate. Lo sviluppo di questa piattaforma consente di valutare scenari operativi realistici che possano includere variabilità della domanda, generazione distribuita e vincoli tecnici della rete e di supportare gli operatori nello sviluppo di strategie operative efficaci per ripristinare rapidamente l'alimentazione dopo guasti dovuti. Infatti, ridurre la durata delle interruzioni al minimo migliora la soddisfazione dei clienti e si allinea con gli incentivi retributivi legati alle prestazioni. È dunque essenziale una gestione efficiente delle informazioni disponibili, che consenta di identificare e isolare rapidamente i guasti e di garantire ai clienti interessati il ripristino del servizio regolare nel più breve tempo possibile.

Le attività di ricerca della LA si sono attuate attraverso una serie di passaggi metodologici fondamentali:

1. Analisi approfondita della piattaforma di simulazione esistente RecSIM
2. Modellazione avanzata della rete con l'adozione di un nuovo grafo connesso, caratterizzato da maggiore dettaglio, per ottenere una rappresentazione più accurata della complessità della rete e delle sue interconnessioni.
3. Modellazione nel simulatore delle procedure di ripristino utilizzate dagli operatori durante la fase di ripristino.
4. Integrazione della gestione ottima delle squadre d'emergenza nella piattaforma di simulazione.

Analizziamo nel dettaglio i singoli elementi caratterizzanti l'attività della LA.

La prima fase ha riguardato l'analisi del funzionamento del simulatore RecSIM e la definizione della mappa di grandezze input/output. Nella sua versione originale RecSIM è alimentato con uno scenario di guasto, che consiste in un insieme di stazioni elettriche in stato non operativo. Nel processo decisionale, RecSIM, valutando la configurazione attuale dell'EDN e le modalità operative dell'operatore elettrico, effettua il calcolo delle implicazioni della perturbazione in relazione al KPI specifico selezionato, che nel caso specifico è l'indice CMI (Customer Minutes of Interruption), che corrisponde al numero di clienti disconnessi serviti dalla stazione, moltiplicato per la durata temporale della disconnessione espressa in kilominuti.

La topologia della rete è rappresentata con un grafo non orientato  $G(V, E)$  senza anelli e spigoli paralleli. In questo grafo, l'insieme dei vertici ( $V$ ) corrisponde ai nodi della rete e gli spigoli dell'insieme ( $E$ ) sono le connessioni tra di essi. L'insieme dei nodi  $V$  può essere suddiviso in tre

sottoinsiemi che rappresentano i diversi tipi di nodi della rete: stazioni primarie e secondarie e interruttori, come rappresentato in Figura 2.

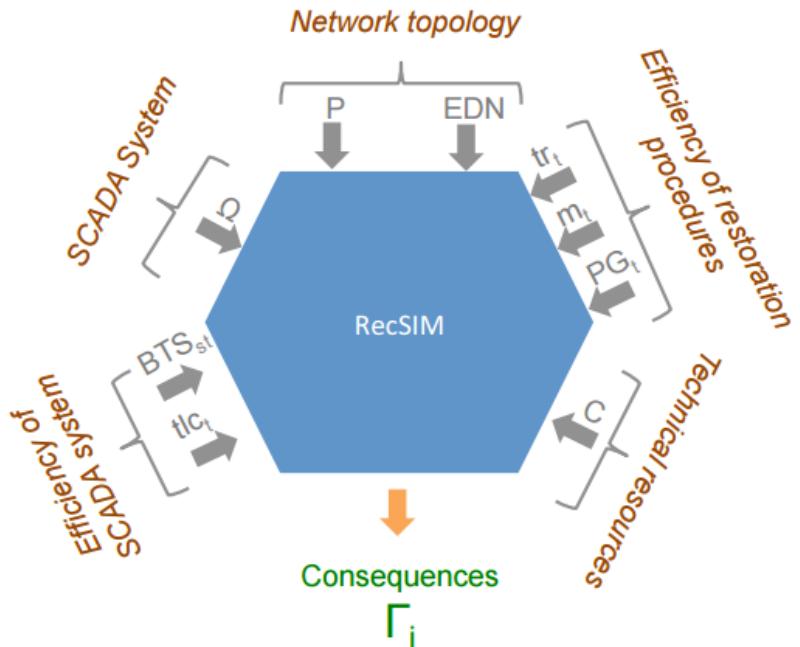


Figura 1 Input and Output del simulatore RecSIM

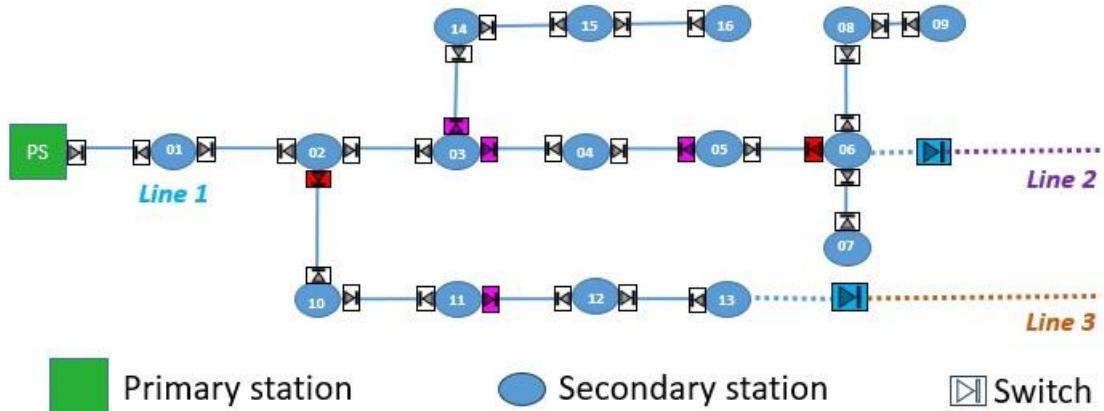


Figura 2 esempio di rete di distribuzione elettrica con interruttori automatici (rosso), interruttori tele-gestiti (rosa), interruttori (bianco o blu).

Gli interruttori possono essere (i) interruttori automatici che funzionano automaticamente senza l'intervento umano; (ii) interruttori tele-controllati, gestiti da operatori da una postazione remota; (iii) interruttori manuali, che richiedono interventi in loco da parte del personale. Il problema affrontato è legato ai guasti nelle linee di media tensione (MT) e di bassa tensione (BT). Tali reti possono subire guasti a uno o più elementi contemporaneamente. Si sono considerati solo i guasti alle cabine secondarie e per ogni linea sono stati considerati più elementi guasti. La fase di identificazione dei guasti può essere trascurata, e sono note le cabine in avaria all'inizio delle operazioni di recupero.

Gli input di RecSIM sono i seguenti: la topologia di rete; le informazioni sui guasti, elenco di coppie contenenti una linea e le relative stazioni secondarie guaste; la durata delle operazioni di ripristino, come il tempo necessario per completare un'operazione remota (accensione/spegnimento) e il tempo necessario per configurare un generatore di backup. Il simulatore procede quindi a generare le operazioni di commutazione automatizzate e controllate a distanza come parte della sequenza di riparazione per ridurre le porzioni disconnesse della rete attraverso anche l'attivazione degli interruttori di frontiera. Successivamente, per ogni linea danneggiata viene generato un elenco di interventi di riparazione che necessitano una squadra in loco (vedi Figura 3).

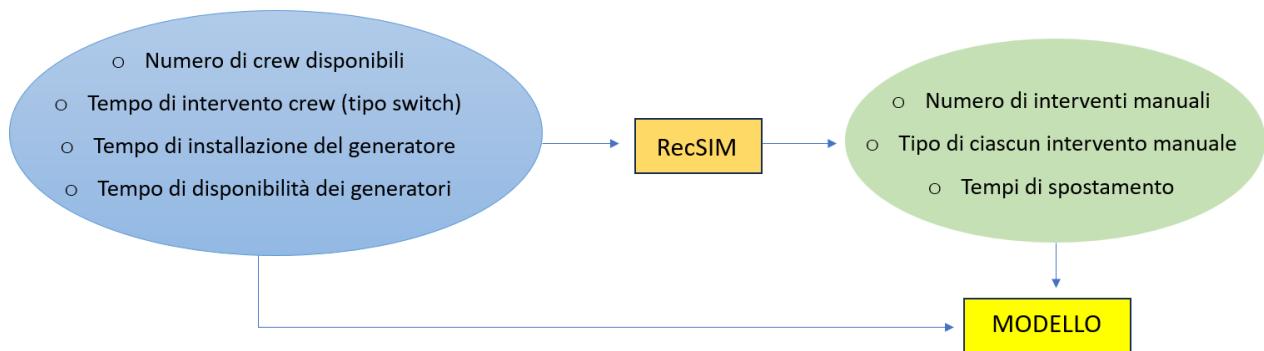


Figura 3 schema di interazione input/output Simulatore- Modelli PLMI

L'elenco dei lavori di riparazione in loco, la topologia e i parametri - il numero di squadre disponibili per le operazioni in loco, il tempo necessario per raggiungere una specifica sottostazione in caso di guasto e il tempo necessario per completare un intervento manuale su una stazione guasta - sono forniti come input al modello di che assegna i lavori di riparazione alle squadre e determina la sequenza dei compiti di ciascuna squadra per ridurre al minimo il tempo necessario per isolare i nodi guasti. Il problema può essere visto come un problema di schedulazione con macchine parallele e formulato come modello di Programmazione Lineare Mista Intera (PLMI). Per valutare i vantaggi dell'integrazione del modello di ottimizzazione nel simulatore, sono state confrontate le soluzioni ottime con quelle di un approccio euristico per l'invio delle squadre ai nodi guasti. L'approccio euristico distribuisce i nodi guasti in modo approssimativo tra le squadre disponibili. Per uno scenario con  $p$  nodi guasti e  $N$  squadre ( $p > N$ ), a ciascuna squadra viene inizialmente assegnato un nodo guasto in modo casuale. Successivamente le squadre procedono verso il nodo guasto più vicino. Sono state effettuate 300 simulazioni euristiche partendo da inizializzazione diverse e sono stati considerati i valori medi del CMI. Per i risultati dell'ottimizzatore sono stati considerati cinque scenari con un numero di nodi guasti che varia da 5 a 15 e con un numero di squadre variabili. Una prima part degli esperimenti ha consentito di analizzare le prestazioni del sistema in presenza di diversi livelli di intensità di guasto, come mostrato in Figura 4.

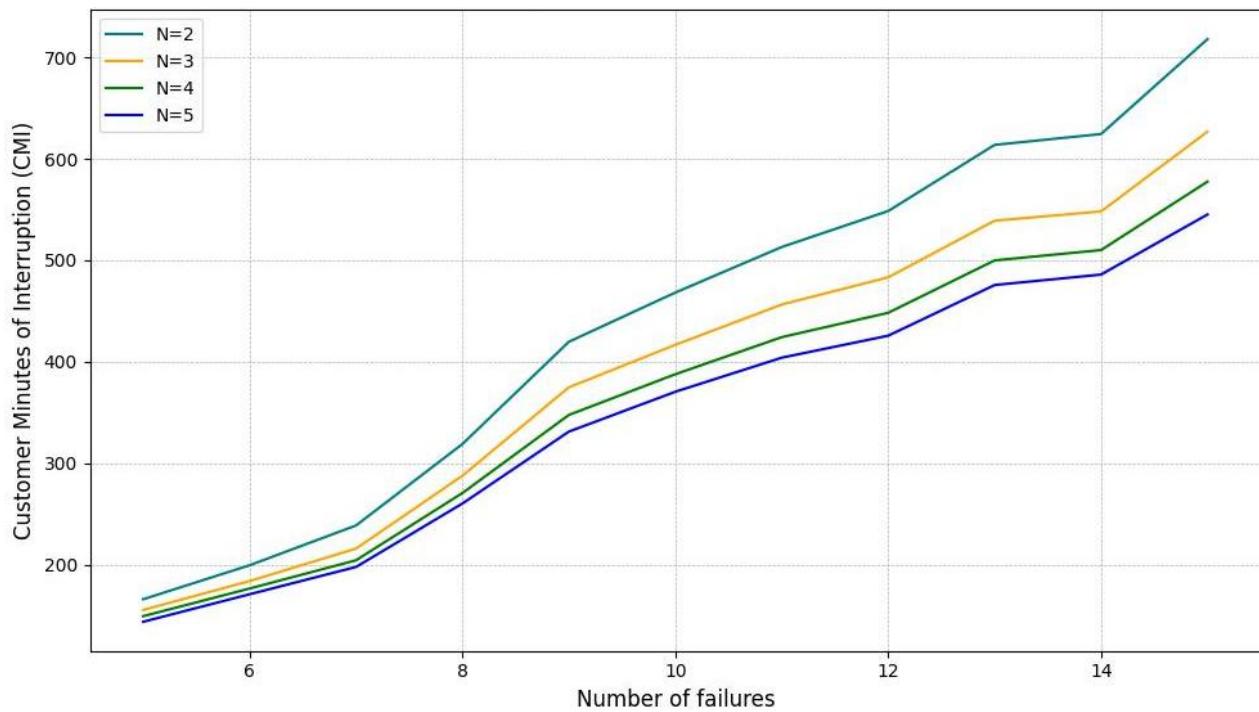


Figura 4 valore del CMI per diversi valori del numero di guasti (asse delle ascisse) in corrispondenza a N squadre per N=2,3,4,5

La Figura 5 mostra in che misura OPT-RecSIM migliora la qualità della sequenza di riparazione rispetto all'approccio euristico. Sono riportati i grafici per i casi estremi di squadre N=2,5 mostrando che OPT-RecSIM fornisce miglioramenti significativi, dimostrando la sua efficienza nella definizione delle procedure di ripristino.

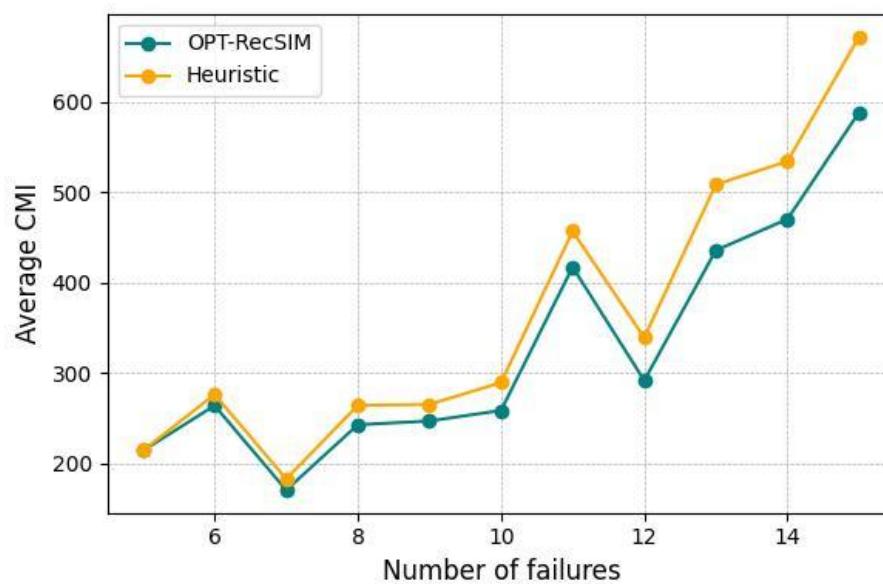


Figura 5 OPT-RecSIM in confronto con la procedura euristica standard

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta

[Opt-RecSIM: An Optimization-Simulation Integrated System for the Repair Sequence Optimization Problem by Atanu Maji, Anna Livia Croella, Valerio Dose, Gregorio D'Agostino, Laura Palagi, Alberto Tofani](#)

## 10 Eventi di disseminazione

I risultati ottenuti da questa LA sono stati presentati a due conferenze internazionali

- Europt 2024: 21st Conference on Advances in Continuous Optimization 26-28 June, 2024 Lund University (Svezia). Titolo: An integrated optimization-simulation system for the repair sequence problem of electricity distribution networks
- OMCEP 2024 Optimization models and methods for challenging energy problems 5-10 November, Centre "Ettore Majorana" for Scientific Culture - Erice, Italy. Titolo: Enhancing Resilience in Electrical Distribution Networks: An Optimization Approach under Uncertainty