

Il Controllo Evolutivo per l'Ottimizzazione Dinamica di Reti Energetiche Distribuite

M. Annunziato*, I. Bertini*, M. Lucchetti**, A. Pannicelli***, S. Pizzuti*

*ENEA – Centro Ricerche Casaccia

Via Anguillarese 301, 00060 Roma

Tel. 0630483932 Fax 0630484811 ilaria.bertini@casaccia.enea.it

**Univ. Roma, "La Sapienza"

***CS Communication System

Sommario

In questa memoria viene proposta una metodologia il cui scopo è il governo, l'ottimizzazione dinamica ed il recupero di una rete di un distretto energetico. Tale metodologia è basata sull'approccio del controllo evolutivo, ossia un sistema che, emulando i meccanismi della evoluzione, compone la capacità di selezionare continuamente il migliore assetto della rete al variare delle condizioni operative, con la capacità di elaborare modelli ad apprendimento continuo. Tale metodologia parte dalle esperienze storiche degli algoritmi genetici per ri-elaborarli verso un sistema cosiddetto ad agenti autonomi (o ambiente di vita artificiale), che possa continuamente riadattarsi ai cambiamenti cronici che potrebbero avvenire in un distretto energetico. Il metodo fu introdotto da ENEA nel 2000 ed è stato applicato alla gestione di diversi processi energetici, come ad esempio il controllo e l'ottimizzazione dinamica in linea d'impianti di termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani. Nell'articolo viene riportata sinteticamente la teoria del controllo evolutivo ed un primo esperimento di applicazione di tale metodo ad un semplice prototipo simulato (*benchmark*) di una rete di un distretto energetico, formata da sistemi di generazione di energia, nodi di smistamento ed utenze.

1. INTRODUZIONE

I recenti avvenimenti relativi ai black-out delle reti di energia di potenza negli Stati Uniti ed in Italia stanno chiaramente mostrando una notevole vulnerabilità di tali reti dovuta alla difficoltà di gestire, controllare, automatizzare grandi reti al crescere della complessità delle reti stesse. Il governo di tale complessità richiede strumenti e tecnologie nuove sia in termini di componenti, ma soprattutto in termini di progettazione e controllo della rete stessa. Eventi incidentali, variabilità delle risorse e della topologia della rete, cambiamenti repentini delle richieste delle utenze, richiedono potenti doti di auto-adattamento, che le reti attuali non possiedono ai livelli di affidabilità richiesti.

Nel passato l'uso di sistemi complessi auto-adattabili è stato raro e per lo più confinato nel settore delle telecomunicazioni o in applicazioni spaziali, in cui non era possibile una manutenzione del sistema o comunque un intervento umano. Tali sviluppi si sono progressivamente intensificati al crescere della complessità della rete a causa di una correlata e drastica diminuzione della capacità di controllare la rete per via centralizzata.

In qualsiasi situazione soggetta a rapidi cambiamenti, un controllo completamente centralizzato richiede elevatissimi ratei di trasmissione dati, connessioni a due vie, unità di calcolo centrali molto potenti e sofisticati strumenti software. Comunque, anche nel caso che fossimo capaci di implementare tali controlli, non saremmo in grado di prevenire i (purtroppo) ben noti "cascading effects" ovvero gli effetti di propagazione di un guasto attraverso la rete.

Come conseguenza di ciò, negli ultimi anni è stata focalizzata l'attenzione su strutture di reti molto meno vulnerabili. Tale approccio si basa sulla decentralizzazione della generazione energetica e sulla organizzazione di entità locali ed autonome dotati di elevata efficienza, flessibilità ed auto-adattamento. Il concetto di *distretto energetico* è cresciuto in popolarità in relazione ad una richiesta di vettore energetico diversificata (poligenerazione). Con il termine distretto energetico ci si riferisce ad una sub-rete di piccole dimensioni, altamente interconnessa, ma sostanzialmente autonoma rispetto al resto della rete globale.

L'idea è quella di prendere in considerazione una rete distribuita di distretti energetici autonomi, laddove sia possibile installare le sorgenti in prossimità delle utenze e dove sia possibile conoscere il livello di soddisfazione degli utenti appartenenti allo stesso distretto. Questa informazione di ritorno è essenziale al fine di ridurre lo spreco di energia sia alle sorgenti, sia nelle reti di trasmissione e sia nelle utenze stesse. Per ogni distretto sarà possibile costruire dei controllori locali che hanno la capacità di ottimizzarsi

dinamicamente e di provvedere al recupero automatico della prestazione della rete in caso di guasto (*self-healing*).

Nei paragrafi successivi viene riportata sinteticamente la teoria del controllo evolutivo ed un primo esperimento di applicazione di tale metodo ad un semplice prototipo simulato di una rete di un distretto energetico. Tale rete è costituita da sistemi di generazione d'energia, nodi di smistamento ed utenze. In particolare, l'obiettivo del controllo è quello della regolazione delle sorgenti energetiche e dei nodi di smistamento al fine di adattare continuamente la rete alle variazioni delle utenze (cicliche, a gradino o a rampa) o alla comparsa di guasti sulle sorgenti stesse. In questo esperimento il controllo implementato è da considerarsi ancora centralizzato, seppur in senso locale, nel senso che c'è una sola funzione di prestazione globale all'interno di ciascun singolo distretto. L'approccio degli agenti autonomi è però una via molto promettente per l'ottimizzazione distribuita a qualsiasi scala; conseguentemente potrebbe essere applicato alla gestione di ogni singolo nodo di smistamento (router). In tale ottica la rete energetica arriverebbe ad assumere alcuni dei connotati che hanno determinato il successo delle reti di comunicazione reali (Internet), in cui utenze, sorgenti e nodi interagiscono con i vicini attraverso le loro connessioni negoziando sia competitivamente che cooperativamente le risorse dell'intero sistema.

2. L'OTTIMIZZAZIONE IN LINEA DI PROCESSI DINAMICI NON LINEARI MEDIANTE ALGORITMI EVOLUTIVI

Per realizzare l'ottimizzazione e il controllo di processi complessi occorre impiegare metodologie di ottimizzazione dinamica capaci di adattare continuamente la soluzione ai cambiamenti del contesto.

Negli ultimi venti anni un approccio molto promettente per la risoluzione di tali problemi ha fatto ingresso nello scenario scientifico: la *programmazione evolutiva*. Vari ricercatori hanno svolto studi allo scopo di estendere l'uso degli *algoritmi evolutivi* alle problematiche relative alla ricerca *dell'ottimo in contesti dinamici*.

L'approccio proposto, il *Controllo Evolutivo*, per l'ottimizzazione e il controllo di sistemi dinamici non stazionari complessi si fonda sulla programmazione evolutiva. Le principali caratteristiche della metodologia consistono nella capacità di seguire l'*evoluzione del processo*. Il sistema continuamente acquisisce misure dal processo, registra il quadro delle regolazioni correnti e valuta il corrispondente livello di performance. Il cuore del sistema è un ambiente artificiale composto da individui artificiali capaci di individuare e far emergere la soluzione ottimale, le azioni di controllo finali sono ottenute facendo una media fra la migliore delle soluzioni suggerita *dall'ambiente ALife* e le regolazioni correnti, allo scopo di imporre al processo transizioni di stato smussate e non critiche.

Il contesto ALife è uno spazio bidimensionale (*life space*) diviso in $n \times n$ celle. Secondo la metafora biologica questo ambiente rappresenta lo spazio fisico in cui gli individui artificiali (o *agenti autonomi*) vivono.

Ad ogni iterazione (*life cycle*) dell'algoritmo tutti gli individui viventi si muovono liberamente nello spazio interagendo tra loro e riproducendosi. Il movimento dell'individuo è il risultato della composizione di una componente deterministica e una componente random allo scopo di definire la curvatura della traiettoria nello spazio 2D. Lo spazio fisico in cui gli individui si muovono è di forma *toroidale* (ovvero gli individui escono su un confine e rientrano dall'altro opposto).

La riproduzione è di tipo *aploide* può avvenire solo se un individuo ha un'energia maggiore di un valore prefissato e chiamata *birth energy*. Durante la riproduzione una certa quantità di energia (*birth energy*) viene trasferita dal genitore al figlio. Ad ogni ciclo di vita, un test probabilistico decide il determinarsi di una riproduzione asessuata. Il parametro probabilistico fecondità (*fecundity*) è memorizzato nel genoma.

Il blocco delle informazioni contiene i dati di processo (regolazioni) e identificano la configurazione di controllo interpretata dell'individuo. La nascita di un figlio si accompagna ad una *mutazione* randomica probabilistica, nel patrimonio genetico, che dipende da due parametri: probabilità media di mutazione (*mutation average rate*) e intensità massima di mutazione (*mutation maximum intensity*). Tutti i parametri descritti (lignaggio, fecondità, energia alla nascita, intensità e probabilità di mutazione) sono registrati nel genoma.

Quando l'età dell'individuo si avvicina al valore di vita-media (*average lifetime*), la probabilità di morte naturale aumenta. Tale meccanismo di invecchiamento è fondamentale per garantire il turn over delle soluzioni ottime, ovvero soluzioni molto vecchie anche se con un valore di prestazione elevate devono essere eliminate per poter seguire l'evoluzione del processo. Un altro meccanismo che provoca la morte di un individuo è la perdita totale di energia ($energy=0$). Ciò può avvenire in seguito all'*interazione* con un altro individuo (due individui nel loro continuo movimento collidono, ovvero cercano di occupare la stessa

cella dello spazio fisico). In quest'ultimo caso i due individui entrano in conflitto e combattono; ciò naturalmente induce un meccanismo di selezione fra le soluzioni. L'individuo con il valore di performance più alto vince e sottrae al perdente una certa quantità di energia (*fighting energy*). Questi effetti alimentano un meccanismo di selezione *dell'individuo migliore* in termini di performance.

3. IL PROBLEMA DELL'OTTIMIZZAZIONE DEL FLUSSO DI RISORSE IN UNA RETE SEMPLICE

Al fine di testare l'efficacia dell'approccio evolutivo all'ottimizzazione in linea del traffico di risorse su una rete generica, è stato formalizzato in questo lavoro un problema di allocazione ottima. L'obiettivo che ci si prefigge è quello di massimizzare la soddisfazione degli utenti collegati alla rete, minimizzando al contempo lo spreco di risorse prodotte. La prima ipotesi che si considera è dunque quella di poter conoscere il livello di soddisfazione dell'utente. Quest'informazione costituisce un feedback indispensabile per la corretta gestione della rete, ma in sua mancanza si può considerare semplicemente la differenza tra la quantità di risorse richieste e la quantità di risorse erogate per ciascun utente.

L'approccio che si vuole proporre, come detto nell'introduzione, è quello di distribuire il controllo su entità che possano considerarsi quasi autonome dal resto della rete e che prendono il nome di *distretti energetici*. Il distretto energetico è una rete semplice, costituita da un ridotto numero di sorgenti, da pochi nodi di distribuzione altamente collegati fra di loro e dagli utenti collegati a tali nodi. Ciascun distretto energetico è collegato al resto della rete per mezzo di pochi canali di trasmissione. Il controllo e la gestione sono effettuati dall'interno al fine di ottimizzare esclusivamente le prestazioni locali. La prestazione globale della rete, in termini di massimizzazione dell'efficienza, costituisce una proprietà che emerge dalle singole regole di conduzione locale delle sottoreti che la costituiscono. Per la realizzazione di una tale strategia di controllo sembra ideale, quindi, l'approccio ad agenti autonomi di cui al paragrafo precedente. Ciascun agente, infatti, può rappresentare un insieme di regolazioni da imporre alle sorgenti e ai nodi di una generica sottorete. Attraverso meccanismi di competizione, cooperazione, esplorazione e selezione, l'ambiente artificiale sviluppa l'emergenza di una forma di auto-organizzazione nelle soluzioni di controllo che suggerisce, fatto che rispecchia il raggiungimento di un equilibrio ottimale nella gestione delle risorse all'interno di ciascuna sottounità. La fattibilità di un simile tipo di controllo è in via di studio, ma in questo lavoro si vogliono presentare dei primi risultati per quanto riguarda l'ottimizzazione in linea delle prestazioni di un singolo distretto energetico, effettuata con l'algoritmo di vita artificiale.

Sono state a tal fine simulate due condizioni che potrebbero rappresentare criticità per la conduzione della rete ed è stata analizzata la capacità della stessa rete:

1. di riorganizzare i flussi in linea
2. di recuperare il valore ottimo di prestazioni.

In tal senso si può affermare che la rete riesce ad auto-ripararsi (*self-healing*). Entrambi i problemi che sono stati analizzati rappresentano delle determinazioni particolari di un problema generale che può essere formalizzato nel modo seguente.

3.1 Formulazione del problema di ottimo

Si suppone che ciascuna rete possa essere costituita da tre tipologie di elementi: le *sorgenti*, i *nodi di distribuzione* e gli *utenti*. Si considerano per la generica rete in esame S sorgenti, N nodi di distribuzione e U utenti. Le ipotesi che si fanno per distinguere le tre tipologie sono le seguenti:

1. nessuna sorgente può essere caratterizzata da un bilancio negativo tra flussi entranti ed uscenti;
2. nessun utente può erogare energia verso la rete;
3. i nodi non accumulano energia, nel senso che ad ogni istante la somma dei flussi entranti eguaglia la somma dei flussi uscenti.

Se consideriamo allora la matrice delle adiacenze di tale rete (definita in generale per una rete costituita da n nodi come la matrice A di dimensione $n \times n$ tale che $a_{ij} = 1$ se esiste il collegamento tra il nodo i ed il nodo j (nel verso di percorrenza $i \rightarrow j$) e $a_{ij} = 0$ altrove), solo una parte di essa, che chiameremo parte *significativa* contiene elementi potenzialmente non nulli. In particolare, la matrice significativa delle adiacenze avrà dimensioni $(S + N) \times (N + U)$.

La funzione che si vuole minimizzare è data dalla composizione delle due esigenze di riduzione degli sprechi e di massimizzazione della soddisfazione degli utenti connessi alla rete.

Le variabili da regolare sono i flussi su ogni canale della rete. Se indichiamo con $x_i(k)$ il flusso di risorse nel canale i all'istante discreto k , il costo dovuto all'invio di una quantità di risorse maggiore rispetto a ciò che è richiesto ($x_i(k) \geq r_i(k)$) ed il costo dovuto all'insoddisfazione delle utenze ($x_i(k) \leq r_i(k)$) possono essere rappresentati da una funzione quadratica della differenza $x_i(k) - r_i(k)$. Si considera poi un costo di dissipazione lineare rispetto alla lunghezza l_i del collegamento i e alla quantità di risorse $x_i(k)$ che in esso è convogliata. In questa prima formulazione non si considera, per semplicità, il costo dovuto all'ampiezza delle variazioni cui è sottoposta una sorgente. La composizione dei due costi è data da una combinazione lineare con pesi opportuni, c_d e c_t . In questo modo la funzione di costo può essere scritta come segue:

$$J(k) = c_d \sum_{i \in \{S, N, U\}} l_i x_i(k) + c_t \sum_{i \in \{N, U\}} (x_i(k) - r_i(k))^2,$$

in cui $\{S, N, U\}$ rappresenta l'insieme dei collegamenti tra le sorgenti, i nodi e gli utenti (la totalità della rete) e $\{N, U\}$ rappresenta l'insieme dei collegamenti tra i nodi e gli utenti (flussi entranti negli utenti).

I vincoli che si devono considerare sulle variabili di regolazione sono dovuti alla minima e alla massima capacità di trasmissione di ogni canale e alla massima capacità di produzione di energia da parte di ogni sorgente. A tal proposito si suppone che ciascuna sorgente sia collegata ad un canale che riesca a supportare la trasmissione del valore massimo di energia che essa può produrre. Un altro vincolo è dovuto ai nodi di distribuzione, dal momento che per le ipotesi iniziali, il flusso totale che entra in un nodo deve eguagliare il flusso totale che esce. Si può allora formulare il seguente problema di ottimo:

$$\begin{aligned} \min_{x(k)} J(k) \quad & \sum_{i \in \{N_{in,n}\}} x_i = \sum_{i \in \{N_{out,n}\}} x_i, \quad n = 1, \dots, N \\ 0 \leq x_i \leq M_i, \quad & i = 1, \dots, S \quad 0 \leq x_i \leq C_i, \quad i \in \{S, N, U\} \end{aligned}$$

in cui $\{N_{in,n}\}$ e $\{N_{out,n}\}$ sono gli insiemi dei collegamenti che rispettivamente entrano nel ed escono dal nodo n , M_i è la massima quantità di energia disponibile a ciascuna sorgente e C_i è la massima capacità del canale i . Tutte le quantità menzionate finora sono facilmente calcolabili se si dispone della matrice delle adiacenze della rete.

Il problema di ottimo così formulato è un problema di programmazione convessa con vincoli di disuguaglianza e di uguaglianza. Seguendo una metodologia consolidata, si può trasformare il problema di ottimizzazione vincolata in un nuovo problema di ottimizzazione non vincolata, attraverso l'introduzione delle funzioni di penalità esatta. In particolare tutte e sole le sue soluzioni saranno tutte e sole le soluzioni del seguente problema alternativo:

$$\begin{aligned} \min J'(k) = & c_d \sum_{i \in \{S, N, U\}} l_i x_i(k) + c_t \sum_{i \in \{N, U\}} (x_i(k) - r_i(k))^2 + \\ & + \frac{1}{\varepsilon_u} \sum_{i=1}^N \left| \sum_{i \in \{N_{in,n}\}} x_i(k) - \sum_{i \in \{N_{out,n}\}} x_i(k) \right| + \\ & + \frac{1}{\varepsilon_d} \sum_{i \in \{S, N, U\}} \max\{0, -x_i(k)\} + \frac{1}{\varepsilon_d} \sum_{i=1}^S \max\{0, x_i(k) - M_i\} + \frac{1}{\varepsilon_d} \sum_{i \in \{S, N, U\}} \max\{0, x_i(k) - C_i\} \end{aligned}$$

in cui ε_u e ε_d sono degli opportuni coefficienti che pesano la violazione dei vincoli di uguaglianza e di disuguaglianza rispettivamente.

La minimizzazione di questa funzione non può essere effettuata con metodi numerici tradizionali, in quanto la funzione $\max\{\}$ non è continuamente differenziabile. Questo costituisce un altro aspetto che ci fa propendere per un'ottimizzazione di tipo evolutivo.

Il problema così formulato è generale e scalabile ad una qualsiasi dimensione di rete, purché di essa si conosca la matrice delle adiacenze. Nei paragrafi successivi verranno descritti i risultati ottenuti in due specifici esperimenti.

3.2 Ottimizzazione in linea delle prestazioni di una rete semplice con utenze variabili nel tempo

Il primo esperimento che è stato effettuato riguarda l'ottimizzazione in linea delle prestazioni di distribuzione delle risorse in una rete in cui le richieste degli utenti varino nel tempo. Al fine di simulare il controllo di un distretto energetico, è stata considerata una rete con topologia semplice, schematizzata assieme alla relativa matrice delle adiacenze in fig.1.

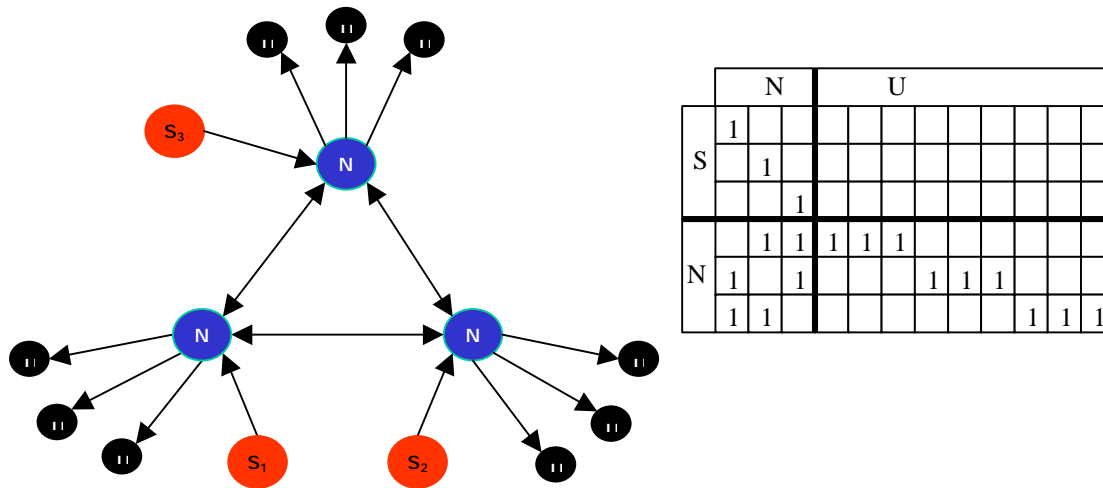


Fig. 1 – Rete di distribuzione dell'energia considerata e relativa matrice delle adiacenze (S= sorgenti, N= nodi trasmissione, U= utenze)

I grafici di fig. 2 mostrano (nel tratto più scuro) le funzioni, che simulano l'andamento delle richieste variabili di ciascuno dei 9 utenti, indipendenti dalla capacità complessiva della rete; con il tratto più chiaro viene riportato l'andamento dell'effettiva quantità di risorse che viene assegnata dinamicamente ad ogni utente. In particolare si suppone di campionare la richiesta degli utenti periodicamente e di riadattare la configurazione dei flussi in linea. I coefficienti della funzione di costo sono stati scelti nel modo seguente:

$$M_i = 10, \quad i = 1,2,3, \quad C_i = 10, \quad i \in \{S, N, U\}$$

$$c_d = 0, \quad c_t = 0.9, \quad \varepsilon_u = 0.0000001, \quad \varepsilon_d = 0.0000001$$

Se si osserva l'andamento complessivo della somma delle quantità richieste alla rete e della somma delle quantità erogate agli utenti si ha il grafico di figura 3 (tratto scuro la richiesta ed tratto chiaro l'offerta), si può notare come le richieste degli utenti vengano soddisfatte in modo piuttosto efficiente, quando queste non presentino anomalie.

Situazioni critiche si presentano nella simulazione analizzata in due occasioni:

1. caso dell'utente 9, si ha una richiesta che eccede il massimo quantitativo di energia effettivamente trasportabile dal canale che lo connette alla rete;
2. caso dell'utente 6, si verifica un picco molto acuto che fa sì che la somma delle richieste ecceda la quantità di risorse che effettivamente si riesce a produrre all'interno della rete.

Il primo caso porta alla saturazione delle risorse disponibili per l'utente 9 e le prestazioni della rete sono influenzate da questo effetto causando uno scostamento della linea delle risorse fornite da quella delle risorse richieste. Nel secondo caso la rete reagisce cercando di soddisfare al meglio gli utenti, pur risentendo nella gestione generale di un evento così repentino, com'è possibile notare dalle anomalie che all'istante

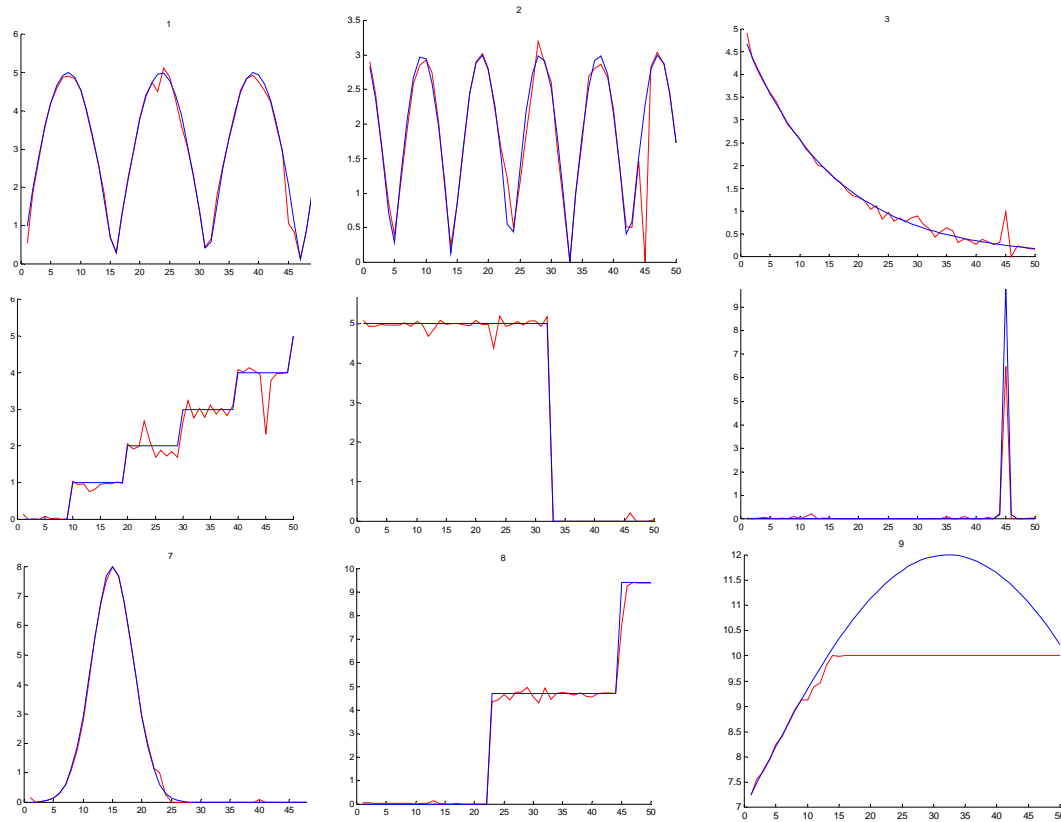


Fig. 2 Simulazione della richiesta (tratto scuro) e conseguente quantità di risorse fornite (tratto chiaro) per ciascun singolo utente durante l'intervallo di ottimizzazione in linea delle prestazioni della rete (asse x = tempo, asse y = risorse)

discreto $k = 45$ (in cui si verifica il picco) si presentano anche sulle altre utenze.

Le misure effettuate sulla rete per verificarne le condizioni sono periodiche e, nel caso di questa simulazione, si è imposto un tempo di campionamento pari a 200 cicli dell'algoritmo di vita artificiale. Ogni 200 cicli, quindi ci sarà un nuovo punto di ottimo per la nostra funzione, dal momento che $r_i(k)$ varia con continuità per ogni i . L'andamento della prestazione del sistema di controllo è riportato in fig. 5. In particolare l'efficienza ottima è posta pari ad 1 e si sono considerati 50 campionamenti lungo un tempo pari a 10000 cicli di vita artificiale. Il sistema di controllo in esame si trova quindi ad affrontare un paesaggio di

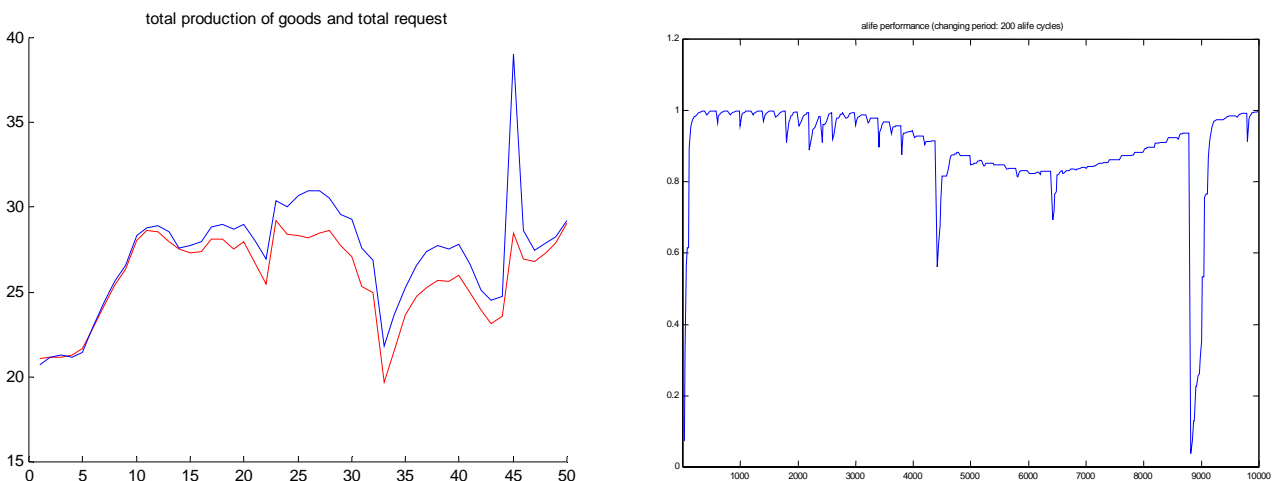


Fig. 3 Richieste totali degli utenti e risorse globalmente assegnate

Fig. 4 Andamento delle prestazioni del sistema di ottimizzazione

fitness non stazionario. In questa prima implementazione tale problema è stato affrontato tramite la soluzione di una successione di problemi di ottimizzazione statica, ma l'obiettivo è quello di poter sfruttare la capacità dell'algoritmo evolutivo di generare ed aggiornare in linea un modello del processo che controlla, al fine di poterne eseguire l'ottimizzazione dinamica vera e propria.

Ad ogni istante di campionamento, come conseguenza della variazione del punto di ottimo, si ha una diminuzione nel valore di prestazioni, in quanto la configurazione ottima dell'istante precedente non risulta più tale per l'istante successivo. L'adattività del sistema di controllo, però, consente di recuperare un valore buono (se non l'ottimo) delle prestazioni, ogni volta che si verifica una caduta.

Sebbene siano stati ottenuti da una simulazione piuttosto semplice, i risultati presentati mostrano l'effettiva realizzabilità di un controllo di tipo evolutivo per il flusso di beni in una rete semplice, quale potrebbe essere ad esempio un distretto energetico, e gettano le basi per uno sviluppo futuro che consenta di sfruttare in pieno la vasta gamma di potenzialità che tale approccio ha dimostrato ampiamente in altri settori applicativi.

3.3 Recupero delle prestazioni ottime di una rete semplice in caso di guasto in una sorgente

Il secondo esperimento che è stato effettuato ha avuto come scopo quello di mostrare la reattività del sistema di controllo quando si verificano eventi imprevedibili con effetti potenzialmente dannosi per tutta la rete.

In particolare è stata aggiunta una sorgente esterna al distretto energetico simulato nell'esperimento precedente. Tramite un nodo di distribuzione ad essa connesso, le risorse vengono convogliate all'interno del distretto energetico e si aggiungono a quelle presenti, generate dalle sorgenti esistenti al suo interno. Tale sorgente esterna rappresenta la linea principale di produzione dell'energia alla quale il distretto è connesso. Il numero delle variabili di controllo aumenta di conseguenza, così come la dimensione della matrice delle adiacenze. Lo schema della nuova rete simulata è riportato in figura 5.

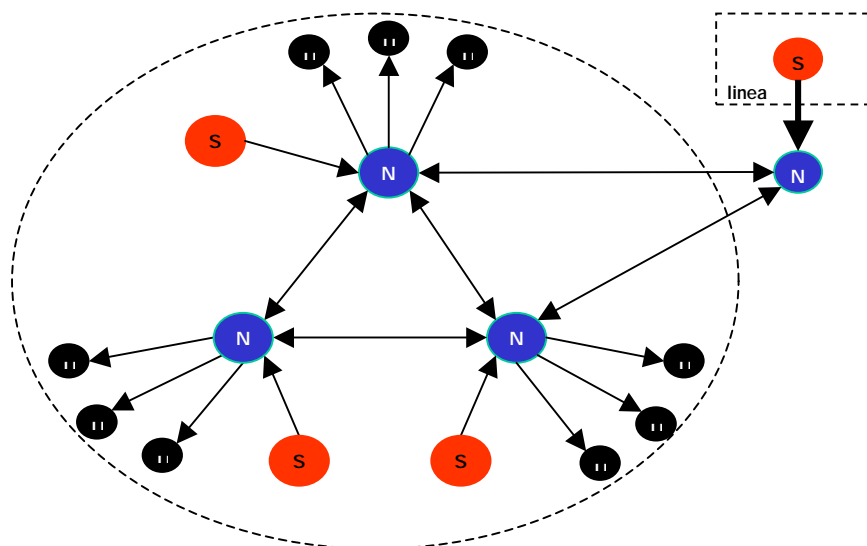


Fig. 5 – Schema della rete simulata e relativa matrice delle adiacenze

Dopo aver raggiunto la ripartizione ottima per l'attuale configurazione (linea + distretto energetico), è stato simulato per due volte un guasto sulla linea che ne dimezzi la potenza disponibile. Tale eventualità costringe un aumento di produzione da parte delle sorgenti interne al distretto e un riassetto dei flussi scambiati su

ciascun collegamento. La richiesta degli utenti è tenuta ad un valore costante e pari ad 1, in modo da non dover tenere conto di essa nell'analisi dei risultati. Inoltre si suppone che solo quattro (3,4,7 e 8) dei nove utenti richiedano risorse. I valori dei coefficienti della funzione di costo sono gli stessi dell'esperienza precedente, ad eccezione di $M_i = 2$, $i = 1,2,3,4$, $C_i = 2$, $i \in \{S\}$ e $C_i = 1$, $i \in \{N,U\}$. In fig. 6 viene riportato l'andamento delle potenze erogate dalle sorgenti insieme al livello massimo di energia disponibile (in rosso). In fig. 7 viene invece riportato l'andamento delle risorse fornite agli utenti.

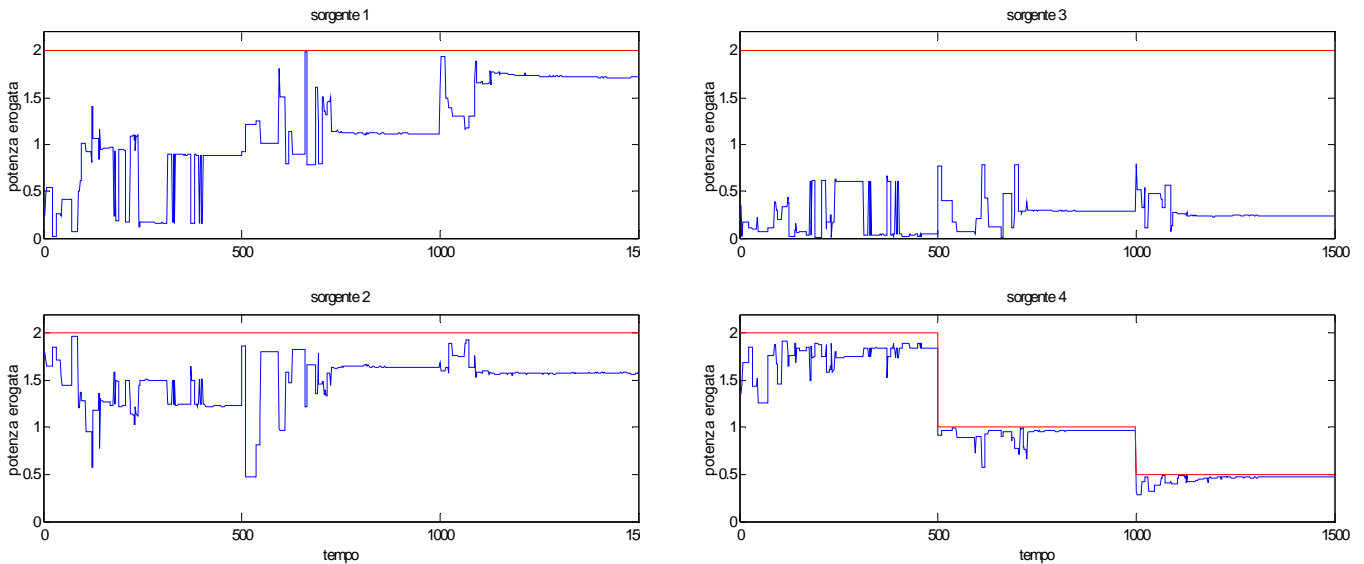


Fig. 6 – Potenze erogate dalle sorgenti in caso di guasti sulla linea principale di rifornimento

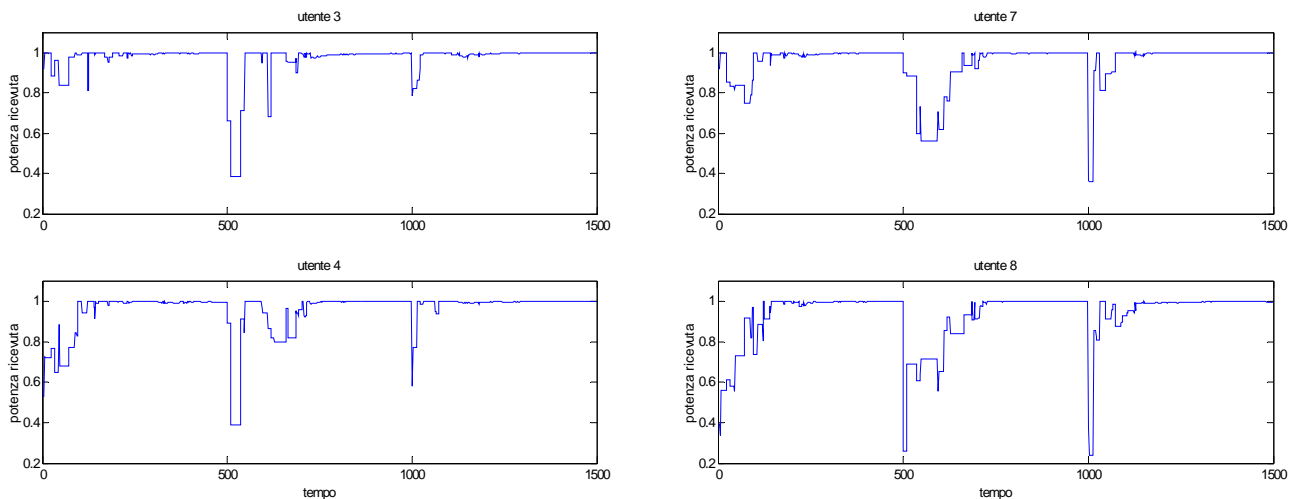


Fig. 7 – Risorse fornite agli utenti per richiesta costante e pari ad 1

La reazione della rete alla diminuzione drastica della potenza di linea disponibile consiste nel ridistribuire i flussi al suo interno, in modo da ottenere una nuova configurazione anche dei punti di lavoro delle sorgenti interne al distretto energetico. Si nota che ancora una volta la rete riesce a recuperare una situazione di criticità, che questa volta è imposta dal malfunzionamento della linea principale di rifornimento. La rapidità con cui questo avviene dipende sicuramente dall'algoritmo che si utilizza per effettuare l'ottimizzazione, ma un ruolo rilevante è rivestito anche dalla bassa dimensionalità del distretto energetico. Se infatti la rete che deve ridistribuire le proprie risorse è di dimensioni piccole, l'ottimizzazione viene effettuata su uno spazio

di dimensioni ridotte e la ricerca del minimo di J risulta più efficiente. In questo senso l'approccio del controllo distribuito consente una maggiore agilità nella manipolazione delle variabili di regolazione e sembra poter dare dei risultati promettenti anche in termini di affidabilità delle prestazioni.

4. CONCLUSIONI

La metodologia descritta, basata sull'impiego di ambienti di vita artificiale (ALife), ha l'obiettivo di realizzare l'ottimizzazione adattiva in linea di una rete di distribuzione di energia.

L'approccio che si vuole proporre è quello di distribuire il controllo su entità che possano considerarsi quasi autonome dal resto della rete e che prendono il nome di *distretti energetici*. Ciascun distretto energetico è collegato al resto della rete per mezzo di pochi canali di trasmissione. Il controllo e la gestione sono effettuati dall'interno al fine di ottimizzare esclusivamente le prestazioni locali. Nell'articolo vengono presentati i risultati di due esperimenti relativi all'ottimizzazione in linea delle prestazioni di una rete semplice con utenze variabili nel tempo e al recupero delle prestazioni ottime di una rete semplice in caso di guasto in una sorgente.

Sebbene l'esperienza svolta costituisca solo un esperimento preliminare alla risoluzione del problema dell'ottimizzazione di reti di distribuzione i risultati ottenuti sembrano incoraggianti e suggeriscono un ulteriore approfondimento nell'applicazione di questa metodologia al problema specifico.

Bibliografia

- [1] Annunziato M. , Bruni C. , Lucchetti M., Pizzuti S. , 2003 , "Artificial Life approach for continuous optimisation of non stationary dynamical systems", Integrated Computer-Aided Engineering, IOS Press
- [2] Annunziato, M., Bertini, I., Lucchetti, M., Pannicelli, A., Pizzuti, S. , 2001 , Adaptivity of Artificial Life Environment for On-Line Optimization of Evolving Dynamical Systems, proc. EUNITE01, Tenerife, Spain.
- [3] Annunziato M., Bertini I., Lucchetti M., Pizzuti S., van Kessel L.B.M. , Arendsen A.R.J., 2003, "An evolutionary adaptive model for a MSWI plant", Deliverable D4 of Task 1.4: Evolutive process model, EU Project ECOTHERM
- [4] Annunziato M., Lucchetti M., Pizzuti S., 2002, "Adaptive Systems and Evolutionary Neural Networks : a Survey", in Proc. EUNITE02, Albufeira, Portugal.
- [5] Annunziato, M. , "Emerging Structures in Artificial Societies", in Creative Application Lab CDROM, Siggraph, Los Angeles/CA, USA, 1999
- [6] Branke J. , 1999, "Evolutionary Approaches to Dynamic Optimisation Problems – A Survey", GECCO Workshop on Evolutionary Algorithms for Dynamic Optimization Problems, A. Wu (ed.), 134-137
- [7] Chua L.O., 1992, "The Genesis of Chua's Circuit", AEU 46, 250
- [8] Emmeche, 1991, "The Garden in the Machine : The Emerging Science of Artificial Life", Princeton University Press.
- [9] Epstein J.M. and Axtell R.L., 1996, " Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up (Complex Adaptive Systems)", MIT Press, Cambridge/MA, USA
- [10] Goldberg D. E. , 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning", Addison Wesley, USA
- [11] Grefenstette J. J. , 1992, "Genetic algorithms for changing environments", R. Maenner and B. Manderick, eds, Parallel Problem Solving from Nature 2, North Holland, 137-144.
- [12] Holland J. H. , 1975, "Adaption in Natural and Artificial Systems", MIT Press, Cambridge/MA, USA
- [13] Langton. C. , 1989, "Artificial Life", C. Langton Ed. Addison-Wesley. pp. 1-47.
- [14] Oliver and Smith D. and Holland J. R. , 1987, "A study of permutation crossover operators on the travelling salesman problem", Proc. of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms, J.J. Grefenstette ed., Hillsdale/NJ, USA, 224-230.
- [15] Rocha L.M., "Evolutionary Systems and Artificial Life", Lecture Notes, Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [16] Trojanowski K. and Michalewicz Z. , 1999, "Evolutionary Algorithms for Non-Stationary Environments", Proceedings of 8th Workshop: Intelligent Information systems, Ustron, Poland, ICS PAS Press, pp 229-240.