

# Valutare i consumi energetici degli edifici

È in fase sperimentale l'utilizzo di una rete neurale per la diagnosi energetica degli edifici. Ma anche per la manutenzione del patrimonio immobiliare pubblico e per la valutazione della sostenibilità a scala territoriale. Con ottimi risultati in termini di semplificazione e accelerazione delle procedure di calcolo

Giuliano Dall'O' e Gabriella Calsolaro\*

**R**eti neurali, sistemi esperti, algoritmi genetici. Sono solo alcune delle chiavi di lettura per comprendere la grande galassia dell'Intelligenza Artificiale, più che una frontiera affascinante un sogno: quello di utilizzare una macchina non solo per fare calcoli più o meno complessi ma per prendere decisioni sulla base di informazioni che essa stessa apprende, con una logica che si avvicina a quella umana.

L'Intelligenza Artificiale (AI) si occupa del comportamento intelligente in sistemi artificiali. Tale comportamento, a sua volta, coinvolge capacità quali ragionamento, apprendimento, comunicazione e azione in ambienti complessi. L'IA ha fra i suoi obiettivi a lungo termine lo sviluppo di macchine che possano fare queste cose come o addirittura meglio degli esseri umani, nonché la comprensione di questo tipo di comportamento sia che esso si presenti in macchine sia in esseri umani o altri animali.

L'utilizzo dell'IA per risolvere problemi legati al quotidiano di Architetti e Ingegneri può sembrare eccessivo. In fondo il quotidiano si basa su metodologie di calcolo consolidate da anni. Chi pensa che l'utilizzo dell'IA sia un

po' come sparare alla mosca con un cannone però si sbaglia. Le innovazioni tecnologiche e i progressi fatti nel campo della ricerca hanno permesso di creare strumenti con comportamenti

intelligenti che aiutano l'uomo nel quotidiano operare, strumenti complessi ma relativamente semplici da utilizzare, strumenti che consentono soprattutto di risolvere in modo diretto tutti quei casi in cui la costruzione di un algoritmo diventerebbe troppo complessa. Le applicazioni nei campi dell'ingegneria e dell'architettura sono ancora poche. L'Intelligenza artificiale tuttavia è presente, anche se in modo invisibile, in molti degli oggetti che utilizziamo quotidianamente, dall'automobile alla lavatrice. Se l'obiettivo è

*Applicazione di algoritmi genetici; gioco di simulazione per capire sotto quali condizioni la combinazione di un gene sarà vitale dal punto di vista dell'evoluzione.*



\*Giuliano Dall'O' è Docente presso il Dipartimento BEST, Politecnico di Milano e Direttore della Rete di Punti Energia della Regione Lombardia; Gabriella Calsolaro, è Cultore della Materia presso il Dipartimento BEST, Politecnico di Milano.

quello di fare uscire questo strumento dalla sua collocazione quasi di nicchia per applicazioni più legate al campo della progettazione edile, noi uno sforzo lo abbiamo fatto utilizzando una rete neurale per valutare il comportamento energetico degli edifici. Il risultato ottenuto è incoraggiante: una volta addestrata la rete, con un numero limitato di indicatori è possibile ottenere direttamente il valore desiderato del consumo energetico specifici. L'alternativa? Un calcolo non difficile ma complesso che richiede parecchi dati ma, soprattutto, parecchio tempo.

### Neuroni artificiali per simulare il cervello umano

Una rete neurale (NN) è uno strumento di analisi modellato sulla struttura ad alto parallelismo del cervello umano che simula una struttura computazionale altamente interconnessa, formata da molti elementi di processo individuali, relativamente semplici, i neuroni, che effettuano calcoli in parallelo.

Una rete neurale artificiale possiede un insieme d'unità elementari variamente connesse tra loro. Alcune di queste unità ricevono e codificano gli stimoli provenienti dall'esterno, altre emettono risposte nell'ambiente e altre ancora, se ve ne sono, comunicano solamente con le unità all'interno della rete (non sono quindi "visibili" ai sistemi esterni) e hanno la funzione di trovare i criteri che permettono di associare lo stimolo a una risposta: esse sono definite rispettivamente unità d'ingresso (input), unità d'uscita (output) e unità nascoste (hidden). Ciascuna unità intende simulare il ruolo di un neurone o di un gruppo di neuroni.

Esiste inoltre un insieme di linee (o canali) di interconnessione tra le unità elementari, in grado di connetterle reciprocamente ed eventualmente di trasmettere segnali provenienti dall'esterno della rete o diretti dalla rete verso l'esterno: a ogni linea è associato un numero, chiamato peso (o coefficiente di connessione o efficacia sinaptica), che rappresenta in modo quantitativo la "forza" o l'importanza dei segnali che lo percorrono. Ciascuna unità svolge un'operazione molto semplice che consiste nel diventare attiva se la quantità totale di segnale che riceve supera la propria soglia d'attivazione. Quando l'unità viene attivata, emette un segnale che è trasmesso lungo i canali di comunicazione fino

alle altre unità cui essa è connessa; ciascun punto di connessione agisce co-me un filtro che trasforma il messaggio ricevuto in un segnale inibitorio o eccitatorio, aumentandone o diminuendone nello stesso tempo l'intensità secondo le proprie caratteristiche individuali.

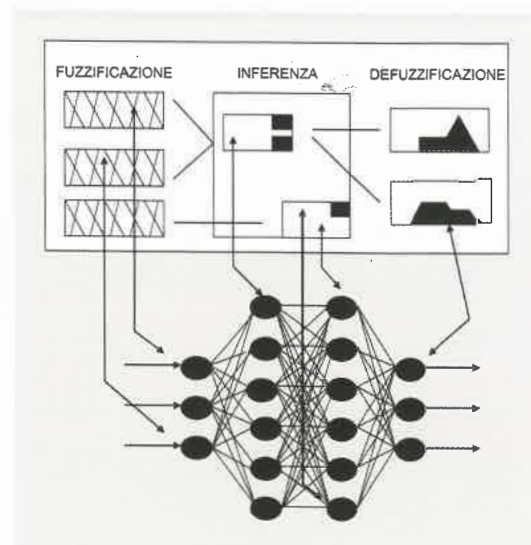
Il principio di funzionamento del software che simula la rete neurale è molto semplice. Al programma viene somministrata una certa quantità di esempi rappresentativi del problema da affrontare, con le corrispondenti soluzioni.

La rete esamina gli esempi proposti e crea una serie di valori, detti pesi, la cui interazione con le variabili del problema, sulla base di determinate funzioni matematiche, produce delle ipotesi di soluzione; confronta quindi queste soluzioni teoriche con quelle effettive, ne misura lo scostamento e, se tale scostamento supera una soglia massima predefinita, torna indietro, modifica i pesi e ripete il ciclo. In sostanza, procede per approssimazioni successive finché non vengono individuate soluzioni accettabilmente simili a quelle reali.

Ultimata questa fase, detta di addestramento, si passa a quella di verifica con la somministrazione di alcuni esempi del problema, diversi da quelli già utilizzati, le cui soluzioni, questa volta, non vengono comunicate. La rete, sulla base dei pesi elaborati durante l'addestramento, fornisce le proprie soluzioni la cui validità è strettamente correlata al livello di efficienza raggiunto.

Se l'esito è soddisfacente, la rete è pronta per essere utilizzata nel settore di applicazione per il quale è stata creata, al fine di individuare delle soluzioni non conosciute.

Poiché non è sempre possibile identificare





con precisione i fattori che incidono su un determinato fenomeno, può risultare conveniente abbondare nella somministrazione delle variabili di input. Sarà la stessa rete a riconoscere autonomamente quelle maggiormente significative, alle quali assegnerà pesi più consistenti, e quelle marginali, alle quali assegnerà pesi ridotti (pur con un aggravio, talvolta rilevante, dei tempi di elaborazione).

Benché esistano molte possibilità di utilizzo di questo tipo di strumento v'è da notare che una imprecisa individuazione del tipo di valori da fornire in input costituisce spesso un impedimento al buon esito dell'addestramento.

### La rete neurale per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici

Il calcolo del fabbisogno energetico degli edi-

fici viene eseguito utilizzando dei software che basano la loro procedura su un algoritmo semplice ma che richiede l'immissione di un numero di dati elevato (UNI EN 832).

Negli edifici nuovi questi dati sono già noti e quindi è pressoché implicita l'elaborazione del calcolo che porterà alla valutazione del fabbisogno energetico. Ben altra cosa è il caso degli edifici esistenti nei quali è necessario eseguire un ricalcolo del fabbisogno, spesso ipotizzando certi valori che non possono essere rilevati in modo attendibile (ad esempio le caratteristiche termofisiche delle strutture che costituiscono l'involucro).

E' in questo campo che si rivela utile la sperimentazione di un approccio nuovo che, di fatto, prescinda dall'algoritmo classico utilizzando la rete neurale.

Nell'intraprendere questa strada si è posto fin da subito il problema di definire un nume-

## Intelligenza Artificiale e Architettura

**D**ando uno sguardo alle ricerche già completate o in fase di sviluppo in ambito universitario e aziendale.

### Settore edilizio

SEMPER – Sistema Esperto per la Organizzazione della Manutenzione Edili Grandi Patrimoni Immobiliari Pubblici

Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1989-1994

Questa ricerca utilizza una Rete Neurale per rappresentare il problema di associare alcune caratteristiche rilevanti degli edifici appartenenti al patrimonio edilizio dell'Istituto Autonomo Case Popolari di Milano e note agli uffici tecnici dell'Istituto, alla possibilità di indicare per questi stessi edifici gli interventi manutentivi probabilmente appropriati avendo di essi quella sola informazione specifica disponibile.

Lo sforzo si è concentrato nel far funzionare un meccanismo che, a partire da una serie di informazioni sintetiche e rilevanti e già disponibili allo IACPM, consentisse:

- di stimare quali interventi di manutenzione fossero probabilmente necessari o utili agli edifici in questione;

- di stimare, di questi edifici conosciuti soltanto sommariamente, alcune informazioni di maggior dettaglio;

- di capire a quali edifici, tra quelli appartenenti ad un sottoinsieme di cui si hanno informazioni più dettagliate, ciascuno di essi potesse assomigliare per qualche aspetto.

Tutto questo con la finalità di poter derivare dalla scarsa informazione disponibile sugli edifici dell'intero patrimonio IACPM, informazioni utili alla redazione di stime e di piani di massima per gli interventi manutentivi sull'intero parco edilizio IACPM.

BEAMES – Sistema Esperto per la Diagnosi Energetica degli Edifici.

BEAMES – Building Energy Auditing Management Expert System, 1992-1993

Il prototipo di questo strumento è stato sviluppato in collaborazione con Flavio Conti, George Helcké, Bruno Caudana, nell'ambito del Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea a Ispra.

Il Sistema Esperto, in questo caso, consente di elaborare una diagnosi energetica su edifici esistenti in base al IEA Source Book pubblicato nel 1990.

Algoritmi sofisticati, quali le associazioni di pattern delle Reti Neurali, sono state incorporate nello strumento per l'identificazione rapida delle Opzioni di Conservazione Energetica più idonee rispetto agli edifici di volta, in volta diagnosticati. Progettato per essere veicolato sui calcolatori portatili, BEAMES è un modello interattivo che indica le

procedure di diagnosi e le tecniche di misura necessarie per le fasi di acquisizione dati.

### Reti Neurali e Complessità Urbana

Programma di ricerca dell'Unità del Politecnico di Milano-Architettura; Responsabile scientifico: prof. Lidia Diapil

È un programma di ricerca che si propone di sperimentare l'approccio delle Reti Neurali applicato al tema della sostenibilità urbana. In particolare, il gruppo di ricerca ha costruito la mappa di rischio e di opportunità della sostenibilità nel Comune di Milano articolato in 144 zone.

Si tratta di un Data Base contenente indicatori di natura sociale, economica ed ecologico-ambientale con l'introduzione di informazioni relative ai consumi di energia nelle diverse fonti e di elementi morfologici e funzionali significativi.

L'utilizzazione di Reti Neurali per la sostenibilità alla scala micro-urbana consentirebbe di evidenziare le connessioni tipiche tra variabili (es. quali variabili socio-economiche si rapportano di più alla densità edilizia? La criminalità, nelle sue varie componenti, come si rapporta allo spazio urbano? Come si associano le attività economiche nelle varie parti della città?) e di sperimentare approcci innovativi nel tema individuando tipologie, andamenti temporali, elementi di criticità.

Tali relazioni evolvono nel tempo dando luogo a nuove connessioni preferenziali.

ro limitato di parametri descrittivi. Il numero massimo di input a disposizione era infatti di cinque, parametri che sembrano pochi se confrontati con le centinaia di dati richiesti dalla procedura standard. Si sono scelti comunque dei parametri in grado di coprire tutti e quattro gli aspetti: quello termodinamico dell'involucro, quello impiantistico, quello climatico e quello comportamentale. La descrizione dettagliata degli indicatori utilizzati, tutti facilmente rilevabili, è riportata nel paragrafo successivo.

La rete neurale deve essere addestrata con input e output. Per quanto riguarda quest'ultimo, che ovviamente è il fabbisogno energetico normalizzato (FEN) ci si è posti il problema di quale considerare, se quello teorico, calcolato attraverso un programma, o quello effettivo ricavato sulla base dei consumi reali. Dato l'esiguo numero di casi disponibili si è scelta la prima opzione. La rete addestrata in questo modo quindi simula in modo rapido con pochi valori di ingresso il comportamento di un software. Visti i risultati incoraggianti ottenuti la seconda opzione sarà comunque verificata nel momento in cui sarà creato un database sufficientemente ricco di casi reali con consumi reali.

### La definizione degli indicatori termofisici dell'edificio

La rete neurale implementata in un software di simulazione è uno strumento potente che comunque non sostituisce le competenze e le professionalità del progettista. Nel nostro caso il problema maggiore è stato quello di definire con pochi indicatori le informazioni che caratterizzavano il comportamento energetico dell'edificio. Si sarebbe potuti andare per tentativi, utilizzando indicatori casuali ma la strada, con molta probabilità, non avrebbe portato a nessun risultato. E' nelle definizioni prioritarie di indicatori corretti che intervie-

ne la competenza professionale e, quindi, il fattore umano è determinante per raggiungere un risultato soddisfacente. I dati utilizzati per l'addestramento della rete neurale sono stati ricavati da elaborazioni effettuate, con l'ausilio del software Cened4, sviluppato dalla Associazione Rete di Punti Energia della Regione Lombardia sulla base della normativa UNI, su un campione di 170 edifici. Queste elaborazioni provengono dalle sedi dell'Associazione di Brescia, Cremona, Milano e Varese; è importante conoscere sia il bacino di provenienza dei dati sia il tipo di software utilizzato per elaborarli, considerato il fatto che questi due elementi influenzeranno i risultati forniti dalla rete. Tra tutte le informazioni contenute in queste elaborazioni, ne sono state scelte alcune rappresentative delle caratteristiche salienti che influenzano il valore del FEN, sempre tenendo in considerazione il principio della facilità di rilevazione di queste informazioni. Le variabili scelte come input per la rete sono le seguenti:

- Climatica (Gradi Giorno, caratteristici del comune di ubicazione dell'edificio)
- Geometrica (Superficie disperdente complessiva/Volume lordo riscaldato; Superficie trasparente laterale/Superficie opaca laterale);
- Costruttiva (Classe di trasmittanza delle strutture opache, Classe di trasmittanza delle strutture trasparenti);
- Impiantistica (Tipo di regolazione della caldaia);
- Destinazione d'uso.

Per la definizione della tipologia di strutture opache e trasparenti, invece di utilizzare il valore preciso di trasmittanza, che pure si aveva a disposizione, si è scelto di creare delle classi di trasmittanza. Si è pensato di procedere in questo modo per far sì che le valutazioni della rete fossero legate ad una famiglia di valori; è facile, infatti, capire come

### Dati input e output utilizzati per l'addestramento della rete neurale per il calcolo del fabbisogno energetico.

Variabili di ingresso (INPUT)						
Gradi Giorno	Superficie/Volume	Superficie trasparente laterale/ Superficie opaca laterale	Classe pareti opache	Classe serramenti	Classe di destinazione d'uso	Classe di tipologia di regolazione caldaia
°C	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Numero intero	Intero da 1 a 15	Intero da 1 a 10	Intero da 1 a 8	Intero da 0 a 5
Variabili di uscita (OUTPUT)						
Fabbisogno energetico normalizzato (F.E.N.)						
kJ/m <sup>2</sup> °C						



sia più semplice correlare la struttura di un edificio esistente ad una classe di trasmittanza, piuttosto che ad un valore preciso di essa. Le variabili individuate, relative a 163 edifici, sono state successivamente utilizzate per addestrare la rete a calcolare il FEN.

In particolare, i dati, completi di output, relativi a 146 edifici sono stati utilizzati dalla rete durante la fase di addestramento per strutturarsi gli algoritmi di apprendimento; i dati dei rimanenti edifici sono stati inseriti in un secondo momento nella rete neurale, privi dei correlativi output, per effettuare la fase di test.

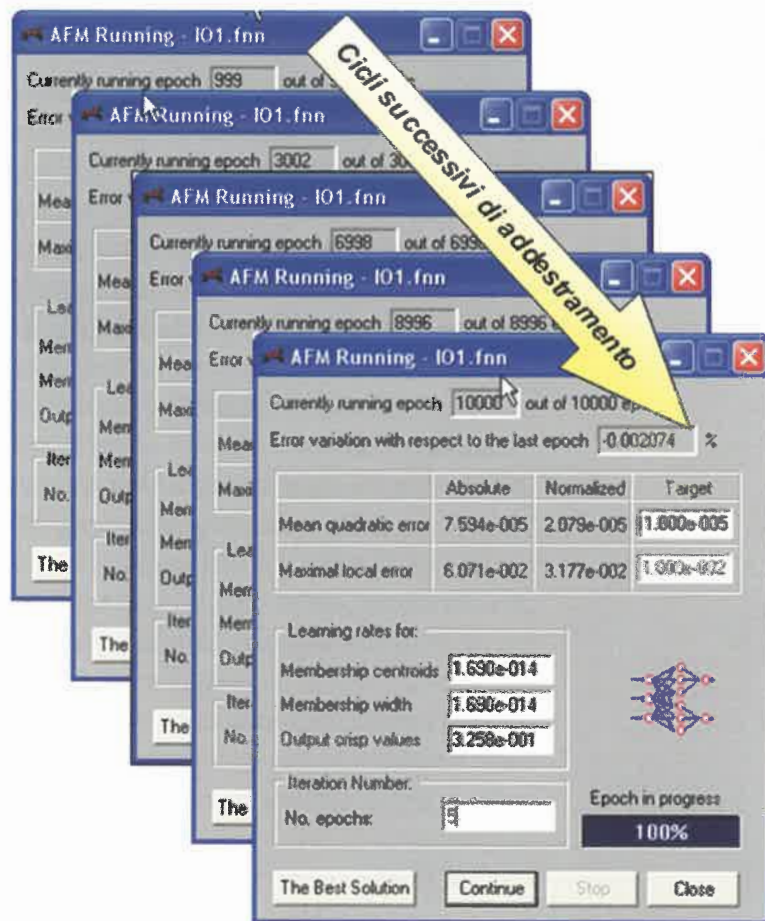
### La validazione del sistema previsionale di calcolo

Anche la rete neurale, una volta addestrata, deve essere testata. Occorre verificare, cioè, se i risultati attesi sono coerenti con casi reali. Alla fine della fase di addestramento, sono stati inseriti nel programma solo i dati input per verificare se la rete era in grado di generare valori in uscita coerenti con gli originali. Il grafico di addestramento evidenzia che i risultati misurati e quelli calcolati dalla rete sono molto vicini tra loro.

Successivamente, si è proceduto ad effettuare la fase di testing, in cui sono stati inseriti pattern di dati input che la rete non aveva mai esaminato in precedenza.

I risultati di questa fase, riportati nel grafico di test, dimostrano che in presenza di dati nuovi la rete è riuscita a generare valori anche migliori della fase di addestramento. Infatti, in fase di verifica dell'addestramento la rete nello 0,7% dei casi genera errori superiori al 25%, ma non lo supera mai nella fase di test. In entrambi i casi, cumulando gli errori commessi, il risultato tende a zero.

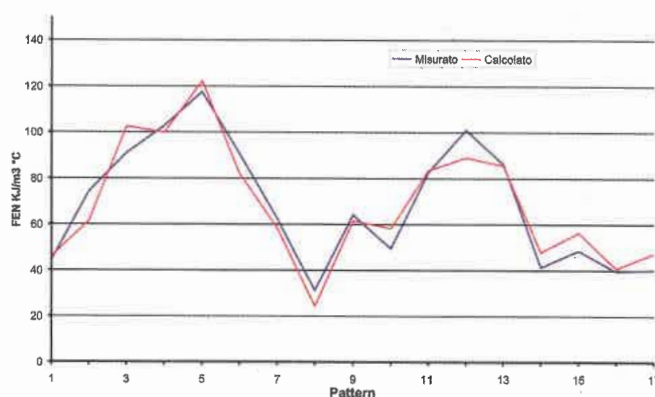
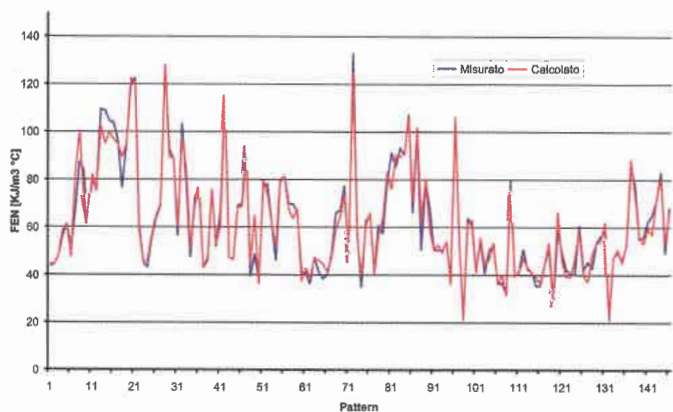
I risultati ottenuti da questa applicazione delle reti neurali confermano la validità dell'ap-



proccio adottato. Sono risultati incoraggianti se si considerano i seguenti aspetti:

- i margini di errore ottenuti sono ridotti tenendo conto che il numero degli edifici utilizzati per addestrare la rete, solo 146, non è grande; i margini di errore si ridurrebbero ulteriormente aumentando il numero di campioni: ciò consentirebbe alla rete di completare maggiormente la matrice delle possibili combinazioni;
- con soli 7 parametri, facilmente rilevabili, si è riusciti a definire le caratteristiche del sistema edificio-impianto; si potrebbe raggiungere un grado di approssimazione ancora maggiore introducendo altri indicatori, ma questo rallenterebbe eccessivamente il tempo di elaborazione della rete stessa nella fase di adde-

*In basso a sinistra: alla fine della fase di addestramento, sono stati inseriti nel programma solo i dati input per verificare se la rete era in grado di generare valori in uscita coerenti con gli originali. Il grafico di addestramento evidenzia che i risultati misurati e quelli calcolati dalla rete sono molto vicini tra loro. In basso a destra: Successivamente, si è proceduto ad effettuare la fase di testing, in cui sono stati inseriti pattern di dati input che la rete non aveva mai esaminato in precedenza. I risultati di questa fase, riportati nel grafico di test, dimostrano che in presenza di dati nuovi la rete è riuscita a generare valori anche migliori della fase di addestramento.*



## Le applicazioni dell'Intelligenza Artificiale

**S**istemi Esperti sono i programmi di calcolo che usano conoscenze e tecniche di ragionamento per risolvere problemi che normalmente richiederebbero l'aiuto di un esperto. Un esempio classico di applicazione è la diagnostica medica. **Algoritmi Genetici.** Modelli computazionali idealizzati dell'evoluzione darwiniana con lo scopo di migliorare le prestazioni di un sistema e il suo adattamento ad un ambiente. Sono metodi di ricerca e di ottimizzazione basati sulla sopravvivenza della soluzione migliore ad un problema dato, a partire da una popolazione iniziale di soluzioni ammissibili e attraverso la loro evoluzione, secondo principi ispirati a quelli della selezione naturale di Darwin. Sono molto utilizzati nel campo della genetica delle popolazioni per capire sotto quali condizioni la combinazione di un gene sarà vitale dal punto di vista dell'evoluzione.

**Pianificazione Automatica.** Modelli per la definizione automatica del piano per raggiungere lo scopo. Si tratta di sistemi costituiti da tre componenti:

- un sistema percettivo per estrarre

informazioni dall'ambiente esterno;

- un sistema motorio per tradurre il piano in azioni effettive;
- un pianificatore per generare una sequenza di azioni (piano) che permetta al sistema di raggiungere i suoi scopi.

**Apprendimento Automatico.** Consiste in tecniche di categorizzazione di dati per l'acquisizione di conoscenza e in un "miglioramento" delle capacità comportamentali di un sistema, in relazione ad opportuni scopi da conseguire, ottenuto tramite l'acquisizione di conoscenza. Una delle forme di conoscenza più utili all'uomo è la classificazione: saper classificare correttamente un oggetto o un evento dà il vantaggio di poter trarre preziose conclusioni anche in assenza di tutte le informazioni dettagliate sull'oggetto. Ad esempio, sapendo che un animale è un pesce, possiamo dedurre che vive nell'acqua, non vola, si riproduce a mezzo di uova, ecc.

**Logica Fuzzy.** È un'estensione della logica classica, che definisce l'appartenenza ad un insieme con un grado (valore tra 0 e 1) anziché un valore binario (0,1). È multivalente e assegna infiniti gradi di verità compresi tra 0 e 1. Ne deriva un mondo non più in bianco e nero ma con infinite variazioni di grigio, non più con oggetti dai contorni precisi e ben definiti ma con oggetti dai contorni sfumati. Nella logica fuzzy, in particolare, non vale il principio di non-contraddi-

zione per il quale, ad esempio, un bicchiere è "pieno o non pieno". Quel bicchiere può anzi avere infiniti gradi di pienezza compresi tra 0 (bicchiere vuoto) e 1 (bicchiere pieno) e può essere poco pieno, piuttosto pieno, pieno a metà, quasi vuoto, ecc. Le applicazioni più comuni sono programmi per controllare il ciclo di lavaggio di lavatrici e lavastoviglie, la messa a fuoco delle telecamere e la climatizzazione di grandi edifici.

**Reti Neurali.** Sistemi di elaborazione dell'informazione il cui funzionamento trae ispirazione dai sistemi nervosi biologici. Ne esistono diversi tipi, ma il principio di fondo comune a tutte consiste nella capacità di certi algoritmi di calcolo di emulare il comportamento umano estraendo valutazioni e considerazioni da situazioni complesse, non sempre ben definite, talvolta anche contraddittorie. Come gli esseri umani, le reti neurali hanno la capacità di apprendere dalle esperienze pregresse per poi applicare a circostanze nuove le conoscenze acquisite. A differenza degli esseri umani, hanno la capacità di crearsi un sistema rappresentativo delle molteplici relazioni esistenti tra le variabili causali di un sistema complesso manifestando, di conseguenza, elevata attitudine ad esprimere con regolarità valutazioni appropriate e comportamenti adeguati in presenza di situazioni apparentemente caotiche.

In basso a sinistra, grafico di diffusione dell'errore in fase di addestramento.

In basso a destra, Grafico di diffusione dell'errore in fase test.

stramento;

- una volta addestrata la rete, il tempo di elaborazione per calcolare il fabbisogno energetico di un edificio è istantaneo, il software, inoltre, può essere impiegato in un normale personal computer.

L'utilizzo di questo strumento può trovare molte applicazioni. Nella certificazione energetica degli edifici, per esaminare il patrimonio edilizio esistente nel quale alcuni dati, ad esempio quelli riferiti alle strutture, sono incerti. In questo caso può essere utile addestrare la rete utilizzando dati di output calcolati con un software tradizionale.

I gestori di impianti termici o le ESCO possono utilizzare questo strumento sia in fase informativa (valutazione del consumo energetico di patrimoni edilizi) che in fase predittiva per valutare il risparmio che si potrebbe ottenere con interventi di riqualificazione energetica. In questo caso la rete potrebbe essere addestrata utilizzando valori di fabbisogno energetico rilevati da consumi reali. Questo studio è il primo passo di una ricerca che proseguirà affinando lo strumento grazie ad una implementazione della banca dati dei casi contenenti le informazioni utili per l'addestramento della rete.

