

### 3. MODELLI PER LO STUDIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA: LE RETI NEURONALI

L'avvento dei calcolatori e soprattutto lo sviluppo delle attuali potenze di calcolo e di memoria a basso costo (PC e workstation, in particolare) hanno consentito il decollo nel settore ambientale di uno strumento di gestione e di controllo capace di dare trasparenza alle decisioni: i modelli matematici.

Fino a pochi anni fa le situazioni venivano valutate su base empirica con modelli fisici o con modelli analogici. Per merito della matematica numerica questi strumenti sono stati sostituiti con costrutti logici che si sono evoluti fino a divenire algoritmi di elaborazione potenti e consistenti con le leggi fisiche alla base dei fenomeni.

L'informatica ha poi reso operativi tali algoritmi ed ha consentito che venissero memorizzate e rese utilizzabili le più ampie raccolte di dati sperimentali, spingendo la sperimentazione anche a velocizzare gli apparati di misura.

Così la sperimentazione e la modellistica si inseguono in una gara di avvicinamento alla comprensione dell'ambiente, ancora solo abbozzata.

I modelli matematici, originariamente deterministici (la banca dei modelli US-EPA annovera oltre una quarantina di modelli deterministici per il controllo della qualità dell'aria) vengono ora arricchiti di componenti stocastiche in conseguenza all'acquisita consapevolezza che non è ragionevole procedere all'infinito nella ricerca di un dettaglio la cui importanza è solo marginale.

Nel caso dell'aria, la meteorologia, il trasporto degli inquinanti, il loro chimismo sono talmente complessi da sconsigliare indagini troppo minuziose rispetto all'intrinseca variabilità degli indicatori prescelti.

Una dettagliata rassegna di modelli matematici ed, ancor di più, una loro classificazione appaiono inopportune in questo contesto, in cui è preferibile fare solo qualche richiamo ad alcuni modelli di interesse per lo studio dell'inquinamento atmosferico. In particolare si ritiene utile ricordare la classe dei modelli a *box* e quella dei modelli autoregressivi. I primi hanno la prerogativa di essere semplici e di poter riguardare situazioni dettagliate quanto si vuole, potendo adattarsi alla descrizione di un

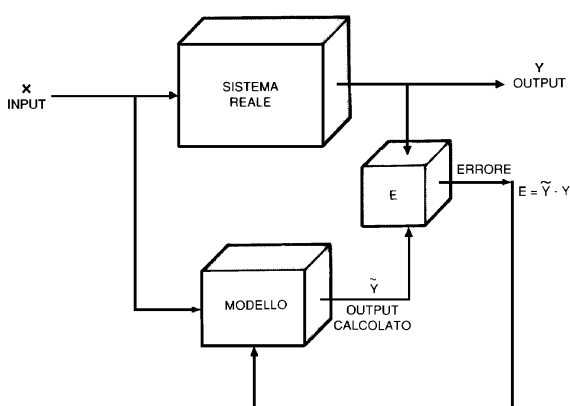
locale, di una strada, di una città o addirittura dell'intero globo. I secondi hanno la caratteristica di effettuare lo scorporo del 'rumore' dai dati sperimentali e di controllare eventuali contributi dovuti a fattori esogeni (come la meteorologia per la qualità dell'aria).

Entrambe queste strade sono state esplorate, ma si è ritenuto di superarle utilizzando uno strumento più moderno quale quello costituito dalle reti neurali.

In effetti, l'uso di un modello a *box* elaborato ad *hoc* ha trovato difficoltà di applicazione a causa della carenza di dati sperimentali (soprattutto riguardanti il traffico veicolare), mentre i modelli autoregressivi, che pure hanno aspetti in comune con le reti neurali, sono caratterizzati da una struttura parametrica che può risultare rigida<sup>1</sup> o, alternativamente, di difficile stima<sup>2</sup>.

Le reti neurali<sup>3</sup> sono delle strutture adattive dotate della capacità di 'apprendere' la soluzione di problemi sulla base di esempi noti.

Fig. 3.1. Schema di un sistema adattivo.



Un sistema adattivo può apprendere ad emulare il comportamento di un sistema reale operando in parallelo con esso per un certo periodo ed modificando progressivamente la propria struttura interna, in funzione dell'errore comportamentale, sino a minimizzare e possibilmente annullare ogni differenza (fig. 3.1).

Le reti neurali costituiscono perciò un modo del tutto diverso di affrontare un problema rispetto a quello su cui si fonda l'Intelligenza Artificiale classica. Invece di scrivere esplicitamente un programma utilizzando un linguaggio, una rete neurale

<sup>1</sup> La rigidità parametrica è tipica dei modelli 'a scatola nera' in cui l'ingresso dei dati esogeni avviene in modo esplicito, ossia sotto forma di ulteriori variabili esplicative rappresentate da misure o previsioni di variabili fisiche rilevanti (Finzi, Brusasca, 1991)

<sup>2</sup> Aspetti problematici nella stima dei parametri si presentano per i modelli 'a scatola grigia' in cui l'introduzione dei dati esogeni è effettuata in modo implicito, tale da influire direttamente sulla struttura parametrica del modello (ad esempio tramite coefficienti che, collegati alla presenza o meno di stagionalità, variano in modo periodico).

<sup>3</sup> O *neurals*, secondo alcuni autori italiani che così traducono il termine inglese "neural networks".

viene 'istruita' ad eseguire determinate operazioni attraverso una sorta di apprendimento di tipo imitativo che consiste nel fornirle degli esempi di soluzione del problema da risolvere.

Le reti neurali artificiali sono state sviluppate in analogia con il sistema nervoso biologico, rifacendosi al *paradigma connessionista* che postula l'eventuale emergere di un comportamento 'intelligente' dalla cooperazione/competizione di un gran numero di unità le cui connessioni si rafforzano/indeboliscono con meccanismi autogeni di premi e penalizzazioni.

Il sistema nervoso è costituito da una rete di cellule (*neuroni*) collegate tra loro attraverso connessioni (*sinapsi*). Ogni neurone è in grado di eccitarsi e di trasmettere uno stimolo elettrico in risposta agli stimoli che riceve dagli altri neuroni. Lo stimolo trasmesso da un neurone all'altro dipende dalla natura della sinapsi che li connette e può sia eccitare che inibire. Durante la crescita, per effetto dell'apprendimento, le sinapsi si modificano in modo tale che i vari agglomerati di neuroni possano specializzare il proprio comportamento in risposta agli stimoli da cui vengono sollecitati.

I modelli neurali si configurano come metodi di elaborazione particolarmente adatti a risolvere quei problemi complessi (riconoscimento di immagini e di 'forme', classificazione di dati rumorosi, estrazione di significati da associazioni di dati apparentemente casuali o comunque oscure, ecc.) a cui gli algoritmi classici, basati su una rigida sequenza di istruzioni, riescono a fornire solo parziali risposte.

L'origine delle reti neurali risale ai primi anni Quaranta quando viene proposto il primo modello di un neurone (il combinatorio lineare a soglia) e la connessione di un gran numero di queste unità (McCulloch e Pitts, 1943), ma solo a partire dagli anni Ottanta l'argomento prende quota promuovendo la fioritura di studi, articoli, libri, convegni, corsi, ecc. Il risveglio dell'interesse si ha quando alcune ricerche suggeriscono l'uso di reti neurali per la realizzazione di *memorie auto-associative*, dimostrandone anche l'applicabilità nella soluzione di problemi di ottimizzazione (Hopfield, 1982). Ma la rivalutazione del paradigma connessionista dopo un periodo ventennale di quiescenza - dal 1962, anno di nascita della macchina *Perceptron* per il riconoscimento e la classificazione di forme (Rosenblatt, 1962) - si deve soprattutto allo sviluppo di un'elevata potenza di calcolo. Nel 1985, infatti, Rumelhart, Hinton e Williams

(Rumelhart, *et al.*, 1986) propongono un potente algoritmo di apprendimento a retropropagazione dell'errore che consente il superamento delle limitazioni della macchina Perceptron (in particolare dell'incapacità di questo dispositivo di risolvere importanti classi di problemi come la funzione logica *or esclusivo*, XOR). La relativa semplicità del nuovo algoritmo riporta subito in auge il connessionismo, permettendo anche le prime applicazioni commerciali del calcolo neuronale.

### 3.1. Struttura e funzionamento delle reti neurali

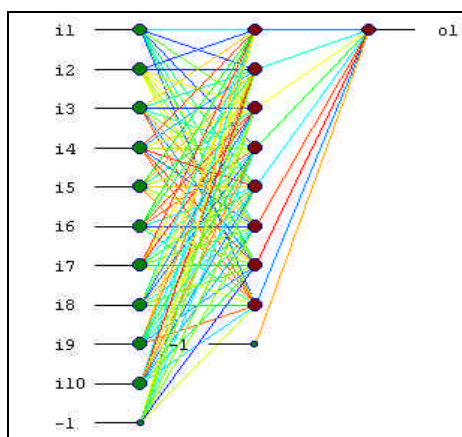
Lo schema generale di una rete neuronale artificiale consiste in un sistema di  $N$  neuroni ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), ognuno dei quali:

- si trova, istante per istante, in uno stato  $o_i$ ;
- può essere stimolato da altri neuroni  $j$ , ai quali è connesso con intensità  $w_{ij}$  (*peso sinattico*);
- ha una *soglia di eccitazione*  $q_i$ .

In ogni rete alcune unità ricevono segnali dall'esterno costituendo gli ingressi della rete. Tali unità vengono pertanto chiamate *unità di ingresso* o *input*. Altre unità forniscono le uscite della rete e vengono dette *unità di uscita* o *output*. Le rimanenti unità vengono dette *unità nascoste*.

Comunemente le reti presentano una struttura stratificata: tra uno strato di unità di ingresso ed uno di unità di uscita si inseriscono uno o più strati nascosti.

Fig. 3.2. *Struttura di una rete neuronale a strati.*



Nella figura 3.2 è riportata la struttura di una rete costituita da uno strato di input a 10 neuroni (l'ultimo nodo rappresenta l'input fittizio con cui si tiene conto della soglia di eccitazione dei neuroni, v. §. 3.1.1), da uno strato nascosto a 8 neuroni e da uno strato di output di un solo neurone.

Le reti in cui: (i) ogni neurone di uno strato è connesso a tutte le unità dello strato