



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SIENA

Corso di Laurea in Lettere e Filosofia

Analisi Matematica e Mente

**Studio per una rappresentazione analitica su assi cartesiani dei
processi cognitivi**

Relatore

Prof. Sandro Nannini

Controrelatore

Prof. Marco Gori

Tesi di Laurea di
Vincenzo Guido Fiore

Anno accademico 2004-2005

Quando si parla di abbandono, espressione cara a Heidegger, intendiamo soltanto che Dio non esiste e che bisogna trarne le conseguenze fino in fondo. L'esistenzialismo si oppone energicamente ad un certo tipo di morale laica che vorrebbe togliere di mezzo Dio con la minima spesa. [...]

L'esistenzialista al contrario pensa che è molto scomodo che Dio non esista.

Jean-Paul Sartre

Indice

Premessa: La ricerca di uno strumento unico	pag. 5
Prima Parte: Struttura	pag. 19
- Reti neurali	
1.1 – Neuroni: il segnale elettrochimico	pag. 19
1.2 – Sinapsi, neurotrasmettitori e neuromodulatori	pag. 26
1.3 – Rappresentazioni simboliche del calcolo neurale tramite insiemi di disequazioni	pag. 31
1.4 – Rappresentazioni simboliche del calcolo delle reti tramite insiemi di disequazioni	pag. 39
1.5 – Variazioni degli insiemi di disequazioni in corrispondenza di alterazioni fisiche degli elementi della rete	pag. 47
- La rete neurale umana	
1.6 – Cenni sulla struttura dell'encefalo	pag. 51
1.7 – Sinaptogenesi ed elasticità della rete	pag. 57
Seconda Parte: Rappresentazione grafica del calcolo neurale	pag. 62
- Limiti computazionali e frontiere di decisione	
2.1 – Dalle disequazioni alle rappresentazioni grafiche	pag. 62
2.2 – Il ruolo dei neuroni di primo livello	pag. 67

2.3 – Rappresentazione grafica di reti multistrato	pag. 73
- Reti complesse	
2.4 – Variazioni in corrispondenza di alterazioni fisiche degli elementi della rete	pag. 80
2.5 – Visione d'insieme	pag. 88
Terza Parte: Mente integra	pag. 91
- Dal reale al percepito	
3.1 – Mente o cervello computazionale: due paradigmi a confronto	pag. 91
3.2 – Materialismo e abbandono	pag. 99
3.3 – Percezioni, categorie e memoria	pag. 102
3.4 – Alterare il sistema	pag. 116
3.5 – Competenza ed errore	pag. 126
- Linguaggio	
3.6 – Denotazione	pag. 129
3.7 – Verso l'intraducibilità	pag. 137
Appendice	pag. 144
Note	pag. 149
Riferimenti bibliografici	pag. 155

Premessa:

La ricerca di uno strumento unico

Quali prospettive adottare nell'indagine della mente è un problema antico: le ipotesi filosofiche sul "funzionamento" della parte spirituale riconosciuta nell'uomo, sono state accompagnate sin dall'epoca classica dallo studio sul corpo umano in senso anatomico, ma questi percorsi di analisi hanno sempre avuto difficoltà ad integrarsi. I primi studi compiuti sugli effetti che i traumi al sistema nervoso centrale hanno sul comportamento possono essere ricondotti probabilmente al "De Rerum Natura" di Lucrezio; l'affermarsi della nuova corrente materialista, tuttavia, si è manifestato con il tentativo di una sovrapposizione più che di una integrazione tra le osservazioni compiute in ambito medico e le speculazioni sull'animo, contribuendo così a frammentare lo scenario degli approcci allo studio della mente umana.

Questa tendenza alla proliferazione di nuove correnti a partire dai rami originari è perdurata fino ai nostri giorni, accentuandosi anzi in modo esponenziale nel corso dell'ultimo secolo e portando così alla coesistenza forzata di paradigmi apparentemente inconciliabili sotto ogni punto di vista. Gli ambiti odierni di ricerca hanno inoltre aggiunto alla antica tendenza alla sovrapposizione reciproca, anche quella di un progressivo

allontanamento dovuto all'approfondimento specialistico che con gli anni sta generando linguaggi propri per ogni settore accentuando le difficoltà di comunicazione e condivisione attiva della ricerca.

Oltre all'ambito medico (a sua volta divisibile per lo meno nei settori della psichiatria, psicologia e neurofisiologia) ed alle diverse correnti filosofiche, può essere distinto il più recente ramo di stampo ingegneristico, che comprende la robotica e lo sviluppo di artefatti fisici o simbolici per la soluzione di problemi. Nonostante queste discipline abbiano la tendenza, come detto, a considerare se stesse come in comparti separati, le influenze reciproche restano molte e importanti, soprattutto in fase di origine di nuove correnti: basti pensare, ad esempio, che l'intero settore legato allo sviluppo di software è nato anche sotto la spinta della corrente filosofica della logica formale, dell'insiemistica e dei primi sistemi di elaborazione di simboli come le macchine di Turing.

Le discipline quindi si sfiorano e si intersecano affrontando spesso gli stessi problemi sotto ottiche differenti e trovandosi così costrette a generare modelli esplicativi e predittivi autonomi tra loro inconciliabili e spesso non esportabili in altri settori. Gli stessi strumenti di indagine e di analisi dei dati sperimentali sono differenti e risentono in modo innegabile del paradigma all'interno del quale sono stati concepiti.

All'origine di questo studio c'è il tentativo di perseguire una via di non contrapposizione. Questa scelta ha causato una oscillazione frequente in particolare tra gli ambiti medico, ingegneristico e filosofico, alla ricerca della formulazione di un modello non della mente in sé, ma di uno strumento di analisi che fosse valido all'interno di questi paradigmi e quindi in grado di permettere l'utilizzo dei moltissimi dati sperimentali proposti dai vari settori di ricerca.

L'indagine sulla mente qui proposta prende le mosse da una riflessione che per alcuni aspetti si avvicina al concetto del "reverse engineering": data la soluzione di un problema, non è detto che sia possibile risalire al problema stesso. In termini filosofici questa prospettiva diviene importante quando si cerca di immaginare come funzioni la mente in base al solo esame dei comportamenti osservabili: a partire da questi, le spiegazioni ipotizzabili sono infinite ed apparentemente tutte altrettanto valide.

Uno dei modi più intuitivi di cui si può disporre per restringere le ipotesi di funzionamento di un sistema, è sicuramente quello di analizzare come materialmente questo sia strutturato, entrando nel merito del sostrato materiale che ne permette l'esistenza. Il punto è quindi quello di riuscire a capire come restringere il campo delle interpretazioni possibili, partendo dall'idea che un medesimo comportamento possa essere replicato da infinite strutture diverse, ma viceversa una determinata struttura possa mettere in atto un numero limitato di comportamenti.

La decisione di porre il problema in questi termini, ha due implicazioni. La prima di queste implicazioni riguarda una scelta di campo a favore di un naturalismo materialista, anche se, come cercherò di mostrare in seguito, ciò è meno scontato di quanto non possa sembrare. La seconda implicazione è contestualmente quella di entrare in aperta polemica con la teoria computazionale e rappresentativa di analisi della mente (problema affrontato in modo approfondito nel corso della terza sezione del lavoro); in breve: che la mente umana sia un sistema di elaborazione simbolica, così come supposto dalla teoria computazionale, può essere un'ipotesi valida, ma sviluppare modelli di elaborazione su supporti diversi da quelli neurali biologici non ci consente di avere alcuna

informazione sul fatto, per nulla scontato, che questa ipotesi sia anche materialmente realizzabile da “hardware” di tipo biologico.

Analizzare in modo naturale un sistema (termine generico utilizzato in luogo di “organismo” per comprendere anche sistemi parzialmente artificiali) caratterizzato da reti neurali biologiche vuol dire quindi partire dallo studio di queste strutture: non ogni processo è consentito dalle reti neurali, dotate di una struttura che processa (o elabora) segnali in parallelo, e tra i procedimenti possibili non tutti richiedono lo stesso tempo o le stesse risorse energetiche per essere portati a compimento.

Qui entra in gioco il primo paradosso insito in questo studio: per poter sviluppare un modello valido riguardo al modo in cui le informazioni vengono processate da una rete neurale biologica, è necessario utilizzare delle simulazioni su reti artificiali, strutturate in modo tale da essere il più possibile fedeli alle reti neurali naturali. L’idea che queste stesse reti siano implementate materialmente su calcolatore (ovvero su supporti seriali) porta a cadere nell’errore già imputato all’approccio computazionale, ovvero comporta lo sviluppo di modelli su supporti diversi da quelli neurali biologici. Il problema non è affatto secondario e probabilmente non c’è modo di evitare un simile paradosso: è possibile, però, contenerne gli effetti ricordando che infiniti sistemi permettono lo sviluppo di comportamenti simili, ma non è vero che infiniti comportamenti sono replicabili dal medesimo sistema; la speranza allora è che sia possibile replicare versioni ridotte delle reti naturali in parallelo (e quindi del loro comportamento) su sistemi seriali artificiali, ricavandone una simulazione valida.

L’ambito che più di altri si occupa di questo tipo di simulazioni è quello detto connessionista, ma l’utilizzo delle reti neurali che si sono ormai affermate all’interno di questo approccio presenta diversi problemi. Per motivi di evoluzione storica e per opportunità pratiche di progettazione

le reti neurali artificiali si sono infatti allontanate in modo significativo dal loro modello originale presente in natura: per superare le reti “perceptron” (ovvero costituite dai soli livelli composti da recettori e da neuroni di uscita) passando alle multistrato, di recente è stato proposto un algoritmo, detto di retropropagazione dell’errore. In questo modo è stato possibile addestrare sistemi neurali complessi aprendo le porte ad una gamma di simulazioni sempre più efficaci che oggi vive il suo momento più interessante nella risoluzione di problemi specifici (soprattutto nell’ambito del riconoscimento e della classificazione). Tali risultati eccellenti sono stati ottenuti però al prezzo dell’abbandono del cosiddetto calcolo soglia proprio del neurone biologico, modificando così il tipo di computazione che l’intera struttura è in grado di compiere.

Al di là delle questioni tecniche, affrontate in modo più approfondito nel corso della prima e della terza sezione di questo lavoro, le attuali strutture neurali artificiali sono estremamente potenti e versatili, ma sono divenute meno affidabili in termini di simulazione del comportamento neurale naturale. Una curiosa indicazione in questo senso è data dal fatto che gli strumenti proposti dalle reti multistrato sono ampiamente utilizzati a conferma sia delle tesi moniste che delle tesi funzionaliste, in quanto sistemi in grado di elaborare segni e fornire risposte complesse adeguate ad ampie categorie di stimolazioni.

Il problema della simulazione è stato risolto alla radice riportando in primo piano il riferimento alle reti neurali naturali e ricorrendo ad un modello matematico che ponesse in insiemi di disequazioni il calcolo compiuto da tali sistemi. L’analisi di reti neurali naturali con architetture specifiche si è quindi dotata dell’utilizzo di variabili per contenere i fattori contingenti generati dall’addestramento della rete. In altri termini, data una architettura neurale è possibile individuare quali siano le disequazioni che

ne governano le elaborazioni dei segnali: la fase di apprendimento non è altro allora che una delle infinite possibili assegnazioni relative alle variabili.

I passaggi ed i relativi punti critici sono esposti nella prima parte di questo lavoro: una volta creato un equivalente formale del calcolo neurale biologico è quindi possibile individuare delle regole sempre valide in questo genere di strutture. Al crescere della complessità della rete però, gli insiemi di disequazioni divengono velocemente complessi e difficilmente trattabili: dal momento che lo scopo principale di questo lavoro è quello di delineare uno strumento versatile è divenuto necessario cercare un modo alternativo per esprimere questi stessi termini.

Il passaggio verso le rappresentazioni grafiche è parso immediato (nella seconda sezione della tesi è affrontato con diversi esempi di architetture neurali): ogni disequazione, a certe condizioni, ha una sua rappresentazione analitica su assi cartesiani. Queste rappresentazioni grafiche sono quindi la trasposizione del calcolo compiuto dalle architetture neurali e quindi dei processi di elaborazione dei segnali: in un senso più generale, esse costituiscono una riproduzione su grafico dei processi cognitivi di un sistema biologico dotato di tali strutture. I passaggi matematici e le relative trasposizioni su grafico permettono di giungere alla formulazione di una serie di regole che consentono, partendo dalla struttura della rete neurale in analisi, di ipotizzarne la capacità di calcolo e in modo immediato i termini in base ai quali la rete riesce a suddividere il proprio mondo in categorie diverse. Senza scendere eccessivamente nel dettaglio, possono essere qui brevemente riportate:

- il numero di recettori di un sistema dotato di rete neurale genera un vettore di segnali di ingresso;

- ogni possibile vettore di segnali di ingresso individua uno ed un solo punto in uno spazio n -dimensionale, dove n è il numero di recettori del sistema;
- definita come “neurone di primo livello” quell’unità della rete che esegue una integrazione sui segnali di ingresso tramite calcolo soglia, tale tipologia di neuroni individua graficamente delle frontiere dette “decisionali”;
- le frontiere decisionali suddividono lo spazio n -dimensionale in base a delle regole che seguono parzialmente il calcolo combinatorio degli stati di attivazione dei neuroni di primo livello;
- ogni punto individuato nello spazio è inserito necessariamente dal sistema in una di queste aree in modo che tutti i punti appartenenti alla stessa area siano considerati dal sistema come equivalenti;
- i neuroni di livello successivo al primo possono aggregare aree diverse, riorganizzando quelle generate dalle frontiere decisionali.

Il modello grafico è anch’esso soggetto ad alcune limitazioni non trascurabili: tra queste la prima e più importante è dovuta al fatto che una qualsiasi rappresentazione grafica può godere al più di tre dimensioni (per ragioni pratiche, se rappresentata su carta, conviene addirittura che sia bidimensionale). In base alla prima ed alla seconda regola qui brevemente elencate, si può intuire come la limitazione sul numero di dimensioni renda possibile rappresentare graficamente solo sistemi composti da un numero massimo di tre recettori, portando lontano in questo modo il modello dagli organismi biologici anche più elementari. Il problema ricorre nel corso di tutto lo studio, ma pur non volendolo sottovalutare, può essere ridimensionato in considerazione del fatto che le generalizzazioni compiute sulle due o le tre dimensioni, permettono di ipotizzare cosa accadrebbe in presenza di n dimensioni corrispondenti ad n recettori di sistema.

Un altro ordine di problemi è dovuto al fatto che lo sviluppo di un modello esaustivo che parta dall'analisi della rete neurale propria del cervello umano è oggi impossibile (e probabilmente lo sarà anche in futuro) per via del numero intrattabile tanto dei neuroni quanto delle sinapsi di collegamento. Lo strumento di analisi così configurato può però essere utilizzato con un certo profitto anche nello studio di processi cognitivi complessi umani. Nella terza sezione di questo lavoro il metodo grafico è stato utilizzato per fornire una interpretazione di percezione e riconoscimento, apprendimento, errore, competenza (analizzati sia nel caso di condizioni normali del sistema che in seguito ad alterazioni di carattere endocrino o esterne) ed infine è stata affrontata brevemente la denotazione linguistica.

Non è necessario in questo contesto anticipare come lo strumento grafico sia stato utilizzato nel dettaglio durante l'analisi qui accennata: è possibile invece far emergere un secondo paradosso insito nel modello di mente che emerge contestualmente a questo tipo di interpretazioni. Come era stato anticipato, l'accostamento degli assunti fondanti per la creazione dello strumento alla corrente naturalista e materialista presenta interessanti problemi di natura concettuale: la caratteristica principale della visione materialista è infatti quella di fare riferimento diretto agli oggetti presenti nella realtà e al modo in cui questi interagiscono con la base materiale della mente, generando configurazioni di attivazione neurale. Nell'intero studio, però un tale riferimento diretto ad oggetti reali è presente solo in modo marginale: l'analisi interviene nel momento in cui si origina il segnale di ingresso e si ferma quando le configurazioni di attivazione sono trasformate ed elaborate dal sistema. Manca allora uno studio approfondito dello stimolo generatore del segnale di ingresso ed è totalmente assente una sezione dedicata alle azioni che il sistema compie sull'ambiente o su se

stesso in seguito alle modifiche generate dall'intervento di tali stimoli (o solo dei segnali di ingresso). Stando al modello, il sistema percepisce, attribuisce categorie, elabora segnali e qui si ferma: è autonomo dal punto di vista del rapporto con l'ambiente ed estremamente attivo se visto in senso interiore, ma del tutto decontestualizzato. Il paradosso è quindi dato dal fatto che l'approccio tenda al materialismo (ogni processo cognitivo può essere ricondotto a configurazioni di attivazione e stati del sistema) e all'empirismo (il sistema apprende come elaborare i vettori di segnali di ingresso anche in base alle stimolazioni precedenti), ma ammette come essenziale il fatto che il sistema compia una selezione delle informazioni disponibili nell'ambiente e che possa elaborare segnali parzialmente o totalmente illusori, generati per errore, completamente falsi o indotti in modo artificiale.

Il problema del legame tra segnali di ingresso al sistema ed elementi realmente esistenti nell'ambiente è ovviamente precedente a questo lavoro e profondamente attuale, tanto da essere oggetto di studio in tutti quei settori di ricerca elencati all'inizio di questa introduzione: basti pensare a come alterazioni chimiche indotte al sistema nervoso centrale possano causare (sicuramente nell'uomo, ma probabilmente anche in molti animali) schizofrenia e provocare quindi la percezione di elementi ambientali "illusori" indistinguibili a tutti gli effetti da quelli reali. Come appare chiaro prendendo in considerazione il caso più comune di sogni particolarmente vividi e realistici, il problema, brillantemente espresso già da Cartesio, è quello relativo al dubbio riguardo ogni sensazione che pervenga alla nostra mente tramite gli organi di senso: tutto ciò di cui si può essere certi sembra essere il solo fatto che si sta dubitando.

Così un approccio radicalmente monista ed anticartesiano propone come strumento di analisi un modello grafico matematico epistemicamente

indeterministico e apparentemente conciliabile con l'assunto di fondo di quel dualismo di cui proprio Cartesio è ancora oggi il simbolo. Lo studio tende a riferirsi ad elementi naturali nella fase di elaborazione, ma evita di affrontare il problema di cosa generi praticamente i segnali di ingresso che interessano il sistema: l'apprendimento, ad esempio, è spiegato in termini di contatto con gli stimoli, ma mancando il riferimento agli oggetti, non è detto che i segnali di ingresso siano generati da stimoli ambientali e che quindi vi sia anche un pur minimo apprendimento imputabile a fattori esterni. Si tratta di una sorta di "paradosso empirista" che emerge in modo eclatante negli ultimi paragrafi di questo lavoro, quando cioè si cerca una interpretazione formale secondo il metodo grafico dei processi di denotazione linguistica: in questo contesto lo strumento consente di rendere conto di numerose caratteristiche comunemente osservate da antropologi e linguisti, ma l'interpretazione che offre si presta anche ad una lettura in favore dell'esistenza del linguaggio mentale (ed in effetti è successo che sia stata letta in questo senso) e può essere considerata a sostegno delle tesi innatiste, dato che la struttura neurale permette di ipotizzare l'implementazione di regole di associazione tra configurazioni interne di attivazione neurale. Ancora una volta lo strumento proposto permette di dare una spiegazione di come un sistema basato su reti neurali giunga a formulare categorie e classificazioni dei propri segnali di ingresso, ma cosa abbia creato le configurazioni di attivazione proprie di questi segnali è un altro genere di problema, esterno allo strumento.

Il superamento di questa contraddizione coinvolge il pensiero umano in varie forme a partire dalla filosofia classica ellenica: questo studio ovviamente non poteva proporsi di risolverla e vi è stato ricondotto suo malgrado. Dal punto di vista dello strumento, il paradosso non sembra possa generare problemi o incongruenze: fino a che è possibile confinarlo

al ristretto ambito del processamento dell'informazione nella rete, la coerenza interna ne consente una certa solidità. Si tratta però di una robustezza apparente, dato che, se è possibile dubitare di tutto ciò che raggiunge i sensi, allora è possibile confutare a priori anche gli studi neurofunzionali in base ai quali è stato costruito il modello stesso. Non resta allora che sfuggire al solipsismo innescato dal dubbio cartesiano con un classico atto di fede, sia esso rivolto verso Dio o determinato da una visione pragmatica del mondo che consente di credere nell'esistenza di un reale simile a come lo percepiamo, perché dopotutto questa è l'ipotesi più semplice.

Una volta superato il dubbio cartesiano, è possibile astrarre una serie di conseguenze dall'uso dello strumento grafico: il modo in cui vengono affrontati i processi cognitivi si fa infatti portatore di una concezione della mente che, nella terza sezione della tesi, è stata definita come "mente integra". La visione analitica offerta dall'uso della matematica è simile infatti all'idea che in ambito teoretico è portata avanti da filosofi quali Dennett e per alcuni aspetti si avvicina anche al concetto di abbandono esistenzialista.

Abbandonare il concetto di anima, intesa come mente coerente e perenne, tipicamente umana, non significa negare l'esistenza di quei processi ad essa comunemente ricondotti, quali per primo la coscienza di sé e degli altri. Al contrario, l'abbandono si riferisce ad una concezione della mente per molti versi mistica che implica l'assunzione di un soggetto pensante libero dalle cose e dal corpo, in favore di una visione naturale, ancorata ai cambiamenti materiali che avvengono nell'organismo e in questo senso integra rispetto al sostrato materiale che ne consente l'esistenza. Un tale tipo di mente si modifica nel tempo, è incoerente e mutevole e implica la privazione del senso magico solitamente attribuito a

sé stessi, ovvero di quel concetto di un “io” pensante che, nascosto da qualche parte e da nessuna parte, muove un corpo che solo in modo occasionale lo ospita.

Per capire cosa si intenda in questa formulazione della mente è particolarmente significativa la spiegazione che in base al metodo grafico è stata data del sistema quando è oggetto di una alterazione sensibile: ciò che si è cercato di sottolineare è come in questi casi non venga steso un velo sul normale funzionamento del sistema, non c'è quindi un momentaneo blocco delle funzioni normali tale da generare errori e distorsioni percettive altrimenti normali. La prospettiva è sottilmente diversa: contestualmente all'architettura neurale, oggetto dell'alterazione è il processamento stesso dei segnali, ma dato che vi è identità completa tra elaborazione della rete e mente, così come comunemente intesa, ne segue che la mente in sé non viene oscurata o messa momentaneamente da parte, ma cambia essa stessa in modo più o meno sensibile.

Avere a che fare con persone che hanno subito lesioni fisiche, in seguito ad esempio a malattie come l'Alzheimer, pone in modo brutale di fronte a questo problema. I possibili approcci sono di due nature: si può considerare che da qualche parte vi sia la persona che un tempo si conosceva (il suo animo, la sua essenza spirituale o razionale) e che in qualche modo questa persona non sia più “raggiungibile”; in alternativa, si può accettare la possibilità che quella persona non esista più e ne esista un'altra diversa, che elabora, struttura e concepisce il mondo che la circonda in un modo che, in questo caso specifico, è radicalmente differente.

Un ragionamento simile può essere compiuto anche relativamente alle normali modifiche che interessano la struttura neurale di un qualsiasi organismo vivente con lo scorrere degli anni: soprattutto negli organismi

dotati di sistema nervoso centrale, possono essere registrate modifiche considerevoli. Non è solo una questione di capacità di calcolo, la coscienza stessa dell'individuo, il modo in cui questi distingue gli elementi che compongono la propria realtà cambia, di conseguenza, con il passare del tempo.

Solitamente si pensa a se stessi in un modo tale che permetta di ricavarne un quadro coerente nel corso degli anni, un'idea questa che consente di dare un ordine e concepire il percorso effettuato come voluto o determinato da occasioni che hanno coinvolto sempre lo stesso soggetto, l'homunculus ideale che alberga all'interno dell'involucro del corpo. Non è necessario scomodare il concetto di genealogia in Nietzsche per sostenere come il tentativo di trovare ordine e costanza, origine e percorso definiti sia un fattore comune nella ricerca storica in senso lato: l'idea che sia possibile estendere l'abbandono di una tale concezione agli organismi viventi e al loro modo di comportarsi, di pensare e di rapportarsi al reale è quanto emerge contestualmente a questo studio.

Qui è forse possibile individuare l'ultimo paradosso concettuale del lavoro: la trasformazione delle computazioni neurali in termini matematici, sulla base di una analisi minuziosa per quanto possibile delle architetture delle reti naturali, sembrerebbe fare da fondamenta per un approccio determinista, rivolto verso una spiegazione plausibile e precisa di quelli che sono stati identificati come i principali fenomeni legati alla percezione. Al contrario, lo strumento di indagine delineato offre della mente una concezione destrutturata, temporalmente incoerente ed intrinsecamente approssimativa.

Ringraziamenti. Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza il contributo diretto e indiretto di molte persone. Tra queste non posso non menzionare: la professoressa Anna Maria Aloisi ed il professor Glauco Ambrosi per i preziosi consigli a riguardo della sezione dedicata allo studio della struttura neurale biologica ed i professori Michele Benedetto e Ferdinando Costantini per avermi insegnato come la matematica sia prima di tutto uno strumento.

Infine un ringraziamento particolare va ai miei colleghi studenti con i quali ho potuto condividere ed affinare pensieri ed idee nel corso degli anni di studio.

Prima Parte:

Struttura

1.1 Neuroni: il segnale elettrochimico.

Si definisce come rete neurale una struttura formata da un numero n di unità, chiamate *neuroni* ovvero cellule nervose, interconnesse mediante contatti specializzati, le *sinapsi*, e capaci, ciascuna, di elaborare informazioni in arrivo e di propagare il risultato di questa trasformazione ad altre unità della rete. Quando si pensa al calcolo neurale e quindi al “processamento distribuito in parallelo”, così come inteso da James McLelland e David E. Rumelhart¹, è necessario allora tenere conto di due fattori decisivi per il risultato complessivo: il tipo di calcolo eseguito dal singolo neurone e il livello di trasmissibilità delle sinapsi.

Lo scopo di questa prima parte dello studio è quello di fornire una formalizzazione matematica del calcolo proprio di una rete biologica; per questo motivo è necessario partire dai dati fin qui accettati nel campo della neuroanatomia e della neurofisiologia, tanto nello studio dei singoli neuroni, quanto nello studio delle connessioni sinaptiche.

Esistono molti tipi di neuroni ed ognuno di essi è caratterizzato da una sua particolare forma, ma sono sempre accomunati da tre caratteristiche

funzionali chiave che li contraddistinguono: l'*eccitabilità* e la *conducibilità* (che i neuroni hanno in comune con gli elementi muscolari) e la *polarità elettrica* delle loro sinapsi chimiche, che ne individua un asse di funzionamento. Prima di passare alla descrizione di queste tre importanti qualità è comunque necessario descrivere brevemente la morfologia di tali cellule.

Tutti i neuroni sono forniti di un *corpo* cellulare, ovvero *soma*, e di *prolungamenti*. Il tipo più comune di neurone è il neurone *multipolare*, che possiede un corpo e, come prolungamenti, un *assone* (o neurite) e un numero di *dendriti* vario secondo il tipo di neurone multipolare. Tali prolungamenti si staccano dal corpo in punti vari della sua superficie. Come tutte le cellule anche queste presentano:

- *membrana cellulare* (il *plasmalemma*), che le delimita rispetto allo spazio intercellulare,
- *nucleo*, posizionato nel soma, delimitato dalla *membrana nucleare* e contenente i cromosomi,
- *citoplasma*, che si trova nel soma,
- *somatoplasma* o pericario,
- *dendroplasma* nei dendriti,
- *assoplasma* nell'assone.

Il plasmalemma presenta una differenza di potenziale elettrico tra superficie interna e superficie esterna, che in condizioni di riposo sono caricate rispettivamente negativamente e positivamente. Il potenziale elettrico di riposo è, in genere, di - 70÷90 mV (milliVolt).

Nello schema generale di funzionamento di un neurone, la superficie del corpo e la superficie dei dendriti sono un 'territorio di ricezione' di segnali, che vi possono pervenire per mezzo delle sinapsi chimiche che su di esse stabiliscono assoni di altri neuroni. In modo simmetrico le superfici

dell'assone e dei suoi rami, che fanno parte di sinapsi chimiche, stabilite con corpi e/o dendriti di altri neuroni, sono 'territori di trasmissione' di segnali.

La trasmissione dei segnali per mezzo delle sinapsi chimiche è una trasmissione elettrochimica: in origine infatti vi è la conduzione di segnali elettrici lungo l'assone sino alle sedi in cui questo stabilisce sinapsi, che di solito si trovano alla terminazione dell'assone e dei suoi rami, terminali assonici, molto spesso dilatati a bulbo. Nel citoplasma dei terminali assonici si trovano vescicole caratteristiche, che sono state osservate con il microscopio elettronico, le vescicole sinaptiche, del diametro di circa 50 decimilionesimi di millimetro. Quando il segnale elettrico giunge al terminale assonico, le vescicole sinaptiche aderiscono alla membrana pre-sinaptica, tratto del plasmalemma del terminale, giustapposto alla membrana post-sinaptica, che è invece un tratto del plasmalemma di un dendrite o del corpo del secondo neurone articolato in sinapsi. Un tempuscolo infinitesimale dopo, nelle aree di adesione della membrana delle vescicole sinaptiche alla membrana pre-sinaptica, scompaiono le due membrane adese e le vescicole sinaptiche possono svuotare il loro contenuto nella fessura sinaptica, il sottile spazio, circa 25 decimilionesimi di millimetro, che sempre separa i due neuroni in sinapsi chimica. In questa maniera molecole di neurotrasmettitori, prima contenuti nelle vescicole, possono diffondersi nella fessura sinaptica e andare a fissarsi su siti ben precisi della membrana postsinaptica, i recettori di membrana, modificandone il potenziale elettrico di riposo. Tale alterazione del potenziale può essere di segno negativo e prende allora il nome di depolarizzazione: in questo caso dalla sede circoscritta della sinapsi la depolarizzazione si propaga, come onda di depolarizzazione, progressivamente sul plasmalemma del dendrite e/o del corpo; la sinapsi si

definisce eccitatoria e il segnale elettrico è trasmesso dal primo al secondo neurone, grazie all'intervento delle molecole di neurotrasmettitore (neurotrasmissione elettrochimica). In alternativa la variazione di potenziale può essere nel senso di un innalzamento, iperpolarizzazione, generando questa volta un fenomeno circoscritto alla membrana post-sinaptica: la sinapsi si definisce allora inibitoria e il segnale elettrico non viene trasmesso dal primo al secondo neurone; si parla di blocco della neurotrasmissione attraverso un meccanismo elettrochimico, ma le molecole che provocano tale blocco si chiamano comunque anch'esse di neurotrasmettitore.

Occorre ora descrivere brevemente le differenze che intercorrono tra assoni e fibre nervose e i relativi meccanismi di conduzione dei segnali elettrici. Ciascuna fibra nervosa è formata da un assone e da guaine di rivestimento; fondamentalmente esistono due tipi di fibre nervose: le mieliniche, in cui tra le guaine di rivestimento vi è la guaina mielinica, e le amieliniche, in cui tale guaina manca. Negli assoni, come nelle fibre amieliniche, sulla superficie dei corpi neuronali e sulla superficie dei dendriti, la conduzione del segnale elettrico è del tipo: *da punto a punto* del plasmalemma. Nelle fibre mieliniche, invece, la conduzione del segnale elettrico è la assai più veloce conduzione di tipo saltatorio, ovvero *da nodo a nodo* e cioè dal plasmalemma di un 'nodo di Ranvier' della fibra (zona in cui manca la guaina mielinica) al plasmalemma del nodo successivo.

Le sinapsi chimiche tra neuroni, ovvero interneuroniche, prendono nome dalle parti dei due neuroni tra cui si stabilisce contatto; si parlerà, dunque, di sinapsi: asso-somatica, tra assone di un neurone e corpo di un altro neurone; asso-dendritica, tra assone di un neurone e dendrite di un altro neurone; axo-assonica, tra assone di un neurone e assone di un altro neurone. È opportuno sottolineare come sinapsi chimiche si possano

stabilire anche tra neuroni ed elementi non nervosi, come ad esempio elementi muscolari, fibre muscolari striate, cellule del miocardio, cellule muscolari lisce.

Nel caso di sinapsi con fibre muscolari striate, l'assone può raggiungere la lunghezza di decine di centimetri (ovvero fino a 10'000 volte più lungo del corpo della cellula stessa). I dendriti invece, che si presentano come numerosi e minuscoli rami di un albero, sono generalmente corti ed esili al punto che si usa parlare di "arborizzazione dendritica", tuttavia la superficie interattiva complessiva di queste sinapsi è molte volte più estesa della superficie totale di una cellula media.

In realtà quello appena descritto rappresenta una sorta di 'schema anatomico-funzionale generale', cui si ammettono eccezioni: ad esempio si ammette che i dendriti possano permettere il passaggio di segnali sia in entrata (a livello di sinapsi asso-dendritiche, di tipo chimico), sia in uscita (a livello di sinapsi dendro-dendritiche, di tipo elettrico).

In questo studio, l'analisi della struttura della rete neurale biologica è funzionale alla comprensione delle dinamiche di trasmissione di segnali all'interno della rete stessa, che, a loro volta, sono il perno intorno al quale è stato costruito il modello matematico che sarà presentato nei capitoli successivi. Prima quindi di entrare nel merito delle strutture che permettono o meno la trasmissione dei segnali, le sinapsi, è utile completare brevemente l'analisi già sopra avviata, sul tipo di segnale ricevuto e trasmesso dai singoli neuroni.

Nel caso delle reti neurali naturali, le cellule nervose che le compongono sono attraversate da un flusso continuo di segnali elettrici, che possiamo chiamare anche impulsi nervosi: tali impulsi costituiscono essi stessi tutto il segnale informativo di cui ha bisogno la rete. Per capirne il meccanismo conviene seguire il percorso dei segnali elettrici sin dalla loro

generazione. L'intero corpo umano è disseminato di recettori sensoriali specializzati nell'avvertire la presenza di una gamma di specifici stimoli esterni o interni rispetto al corpo: la struttura di ciascuno di essi permette di rispondere solo a stimoli di una certa natura e anche fra questi solo a quelli che abbiano intensità compresa entro un certo ambito. Per evitare confusioni conviene sottolineare la differenza tra questi recettori in senso neuro-anatomico e quelli in senso biochimico e farmacologico. Questi ultimi infatti sono siti del plasmalemma (o di altre membrane della cellula) specifici per composizione chimica e quindi per la capacità che hanno di legarsi a determinate molecole, i ligandi. Ad ogni tipo di recettore può legarsi un solo tipo, o poche varietà tra loro molto simili, di ligando.

I recettori in senso neuro-anatomico, invece, sono dispositivi anatomici situati in periferia (per esempio, nella cute e nel sottocutaneo, nelle ossa, nelle articolazioni e nei muscoli), di forma, dimensioni, struttura assai varie, ma tutti accomunati da una caratteristica funzionale: su ciascuno di essi agiscono stimoli e, se questi stimoli hanno determinate caratteristiche qualitative (stimoli adeguati) e quantitative (stimoli efficaci), nel recettore insorgono segnali elettrici, che, attraverso fibre nervose sensitive (una o più per recettore), sono trasportati al sistema nervoso centrale.

Il meccanismo di funzionamento dei recettori in senso neuro-anatomico si basa su di una doppia traduzione, ovvero trasduzione: per prima cosa nel recettore si origina, per effetto di uno stimolo adeguato ed efficace, una variazione del potenziale elettrico di recettore, eccitatoria, di durata variabile, che traduce in differenza di tempo le differenze di intensità dello stimolo esterno. Dato che il potenziale di recettore non può però propagarsi in questa forma attraverso l'assone, deve essere trasformato in una serie (tecnicamente detta "treno") di "potenziali di

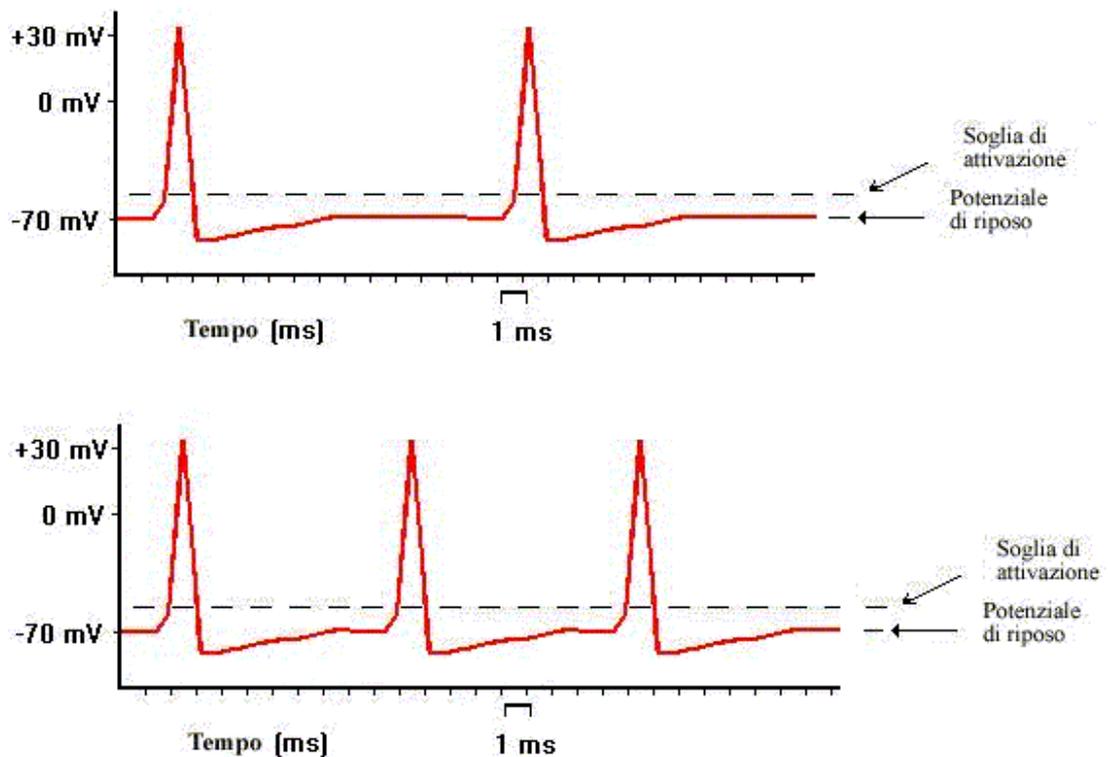


Gráfico 1.1 Schema esemplificativo di due treni di impulsi a frequenza diversa.

azione” standard, variabili solamente nella frequenza. Supponendo di essere in presenza di uno stimolo sensoriale molto intenso, questo originerà un potenziale di recettore superiore al valore soglia e di lunga durata che darà luogo ad un treno di potenziali di azione ad alta frequenza; al contrario, in presenza di uno stimolo di bassa intensità, il potenziale di recettore sarà di breve durata, dando quindi ancora luogo ad un treno di impulsi nervosi, ma a bassa frequenza.

Come descritto per il potenziale esprimibile da un recettore in senso neuro-anatomico, anche le caratteristiche del potenziale d’azione che si genera e si propaga in un assone sono fisse e assolutamente stereotipate. Ricorrendo ad una rappresentazione grafica dell’impulso (grafico 1.1), è facile notare come, quando ha luogo, sia la sua altezza che la sua forma sono fisse, perché queste caratteristiche sono determinate dalla

composizione e dalla geometria della membrana assonale: l'assone non può reagire agli stimoli in nessun'altra maniera. Questa regola è valida anche se si inducono degli impulsi elettrici dall'esterno, utilizzando ad esempio un elettrodo collegato ad un generatore: l'assone può non rispondere, ma se risponde lo fa producendo l'impulso suo proprio o per meglio dire, il treno di impulsi standard. Le caratteristiche fisiche del plasmalemma assonale condizionano la conduzione degli impulsi anche nelle fibre nervose di tipo amielinico (per la differenza tra assoni e fibre nervose); nelle fibre nervose di tipo mielinico, sono importanti anche le caratteristiche fisiche della guaina mielinica.

Seguendo il percorso del segnale elettrico, ogni singolo impulso, dopo essere stato generato, si propaga praticamente senza decremento lungo l'assone, o lungo la fibra nervosa, con una certa velocità (variabile da 0.5-2 metri per secondo, negli assoni e nelle fibre nervose amieliniche, a 70-120 m/s nelle fibre mieliniche di maggior calibro). Nel suo percorso il singolo impulso non si attenua, come avverrebbe lungo un qualsiasi altro conduttore: quello che può invece succedere è che si perdano singoli impulsi nel treno complessivo, venendosi così a creare una variazione nel discreto e mai nel continuo (possono arrivare 10 o 11 impulsi ma non 10.6 o 10.2): ancora una volta occorre ribadire che tutti gli impulsi che arrivano a destinazione sono assolutamente dello stesso tipo. Una volta ricevuto, ogni impulso sarà "letto" per la sua sola presenza, senza quindi farsi portatore di altro messaggio che non sia il fatto che è arrivato.

1.2 Sinapsi, neurotrasmettitori e neuromodulatori.

Nella trasmissione del segnale elettrico attraverso il sistema nervoso esiste infine un altro elemento in grado di influenzare la propagazione

dell'informazione attraverso la rete: si tratta di particolari sostanze chimiche dette neurotrasmettitori e neuromodulatori.

Una volta percorso il canale costituito dall'assone, il segnale nervoso deve attraversare lo spazio sinaptico che lo separa dal neurone successivo. In alcuni casi la struttura delle due superfici è tale da permettere il passaggio dell'onda elettrica come tale, ma nella maggior parte dei casi il passaggio dei segnali è mediato da trasformazione a carattere chimico: nel primo caso si parla di sinapsi elettriche; le seconde, più comuni, sono invece dette sinapsi chimiche.

Le membrane cellulari poste nei pressi dello spazio sinaptico sono dette rispettivamente membrana presinaptica e membrana postsinaptica: quando il segnale nervoso raggiunge la prima (pre-sinaptica), appartenente al neurone-trasmettitore, questa rilascia nello spazio sinaptico una certa quantità di molecole neuroattive. La seconda membrana (post-sinaptica), appartenente al neurone-ricevente, è invece dotata di microrecettori specifici (si tratta dei recettori in senso biochimico o farmacologico a cui si è già accennato) che riconoscono e catturano le molecole presenti nello spazio, modificando così lo stato della cellula ricevente. Queste modificazioni possono essere tali da causare un potenziale elettrico (potenziale post-sinaptico), oppure possono avere degli effetti metabolici a lungo termine.

Trattandosi di potenziali elettrici, esistono due tipi di potenziale postsinaptico, rispettivamente potenziale postsinaptico eccitatorio (EPSP) e il potenziale postsinaptico inibitorio (IPSP): nel primo caso il potenziale di riposo del plasmalemma (-70-90 mV) si abbassa, eventualmente sino ad invertirsi (depolarizzazione), nel secondo caso il potenziale di riposo del plasmalemma aumenta (iperpolarizzazione). Si tratta comunque di potenziali elettrici di modesta entità: un unico potenziale postsinaptico non

è in grado di suscitare un “potenziale di azione”, cioè di scatenare la partenza di un treno di impulsi dal neurone ricevente, ma, come si è detto, ogni neurone è connesso con molte migliaia di altri suoi pari e quindi riceve molte sollecitazioni, alcune a carattere eccitatorio ed altre a carattere inibitorio. Se la “somma” dei vari potenziali postsinaptici provocherà una reazione nel neurone ricevente, allora si determinerà la partenza di un treno di impulsi verso altri neuroni.

Questa capacità di elaborazione di ogni singolo neurone rappresenta un passaggio chiave delle potenzialità computazionali dell’intera rete neurale naturale: solo dopo aver compiuto tale elaborazione il segnale sarà nuovamente trasformato, trasmesso attraverso l’assone e ricevuto dai neuroni-bersaglio attraverso i dendriti. Qui il segnale sarà sottoposto agli stessi passaggi ed ancora una volta, se possibile, si propagherà nella rete attraversando vie e nodi.

Più che sommare semplicemente i potenziali postsinaptici, *“In realtà [...] il neurone ricevente ed in particolare il suo corpo cellulare, fanno piuttosto un’integrazione dei vari segnali ricevuti [...]. Non è sempre chiaro che cosa significhi integrare i vari impulsi, ma l’operazione dovrà tenere conto di almeno due ordini di fattori: l’insieme dei potenziali elettrici postsinaptici, sia eccitatori che inibitori, in arrivo e lo stato metabolico della cellula che può essere più o meno incline a dare origine a un segnale nervoso in uscita. I due tipi di fattori sono regolati dai segnali in ingresso provenienti dai neuroni a monte attraverso le sinapsi e in parte anche dalla storia precedente del neurone e di tutto l’organismo a cui appartiene”*².

Un tempo si pensava che ciascuna determinata sinapsi chimica funzionasse con l’intervento di un solo tipo di molecola di neurotrasmettitore (cosiddetto principio di Dale, dal nome del farmacologo

inglese che lo formulò). Oggi si sa con certezza che il funzionamento delle sinapsi chimiche è assai più complesso e vi intervengono molti tipi di molecole: i neurotrasmettitori, innanzitutto, cioè sostanze le cui molecole vengono liberate da vescicole sinaptiche nella fessura sinaptica, quando l'impulso nervoso giunge al terminale assonico e vanno a fissarsi su recettori della membrana postsinaptica, determinandone modificazioni funzionali. È possibile che vi sia più di un tipo di molecola di neurotrasmettitori in una determinata sinapsi ed è quindi possibile la co-trasmissione.

Il secondo tipo di molecole che interviene nelle sinapsi chimiche è costituito dai cosiddetti neuromodulatori, sostanze che partecipano anch'esse al funzionamento della sinapsi e alle comunicazioni tra i due neuroni in collegamento, ma con meccanismi differenti: vengono liberati da altre vescicole che li diffondono nella fessura sinaptica, ma non vanno ad agire su recettori della membrana post-sinaptica, bensì escono dalla zona di sinapsi, potendo influenzare così, con un meccanismo paracrino, sia il secondo neurone sia altri neuroni vicini. Esempi di neurotrasmettitori molto diffusi sono l'acetilcolina e la nor-adrenalina, mentre esempi di neuromodulatori molto diffusi sono i neuropeptidi.

Durante la propagazione del segnale attraverso la rete neurale, possono, infine, intervenire alcune sostanze che, interferendo con neurotrasmettitori e/o neuromodulatori, attenuano o accentuano l'effetto provocato dai treni di impulsi in arrivo nel neurone ricevente.

Un semplice esempio consiste nel supporre che l'organismo interessato riconosca una situazione esterna come potenzialmente molto pericolosa e che quindi debba compiere uno sforzo fisico per allontanarsene: contemporaneamente all'azione, l'organismo inizierà la produzione di determinate sostanze (per semplicità, si supponga solo

endorfine). Ad un certo punto dello sforzo, i recettori posti sui muscoli del corpo potrebbero segnalare dolore dovuto alla fatica e il segnale sarebbe allora trasmesso fino al sistema nervoso centrale per propagarsi nella corteccia cerebrale. La membrana presinaptica delle sinapsi chimiche continuerà a svolgere il suo normale lavoro, essendo sempre in grado di liberare neurotrasmettitori e neuromodulatori che le sono propri, ma il legame di questi con i recettori posti sulla membrana postsinaptica sarà ostacolato. Il risultato è che l'organismo potrà continuare il suo sforzo senza subire le conseguenze della trasmissione di sensazioni quali fatica o dolore dai muscoli interessati: una sorta di analgesia naturale.

Gli organismi complessi possono produrre molte sostanze volte ad influenzare le sinapsi chimiche, inibendo la ricezione di un neurotrasmettitore o di un neuromodulatore specifico: le potenzialità di questo meccanismo sono molto elevate e gli organismi vi fanno ricorso continuamente³.

In conclusione, nella trasmissione elettrochimica dei segnali nelle reti neurali naturali vi sono almeno tre passaggi critici:

1 - i recettori trasformano differenze di intensità dello stimolo in differenze di durata del potenziale elettrico e quindi le differenze temporali in una determinate frequenze di impulsi nervosi;

2 - ogni singola sinapsi chimica può essere modulata in maniera complessa da molecole regolatrici, in parte agenti a livello locale, in parte agenti su aree anche consistenti dell'intero sistema nervoso, in modo che queste riflettano le condizioni fisiologiche generali dell'organismo;

3 - ogni neurone può integrare gli effetti dei suoi diversi ingressi ed effettuare un calcolo computazionale.

1.3 Rappresentazioni simboliche del calcolo neurale tramite insiemi⁴ di disequazioni.

Nel momento in cui si cerca di replicare in via artificiale, grazie ad una formalizzazione matematica, il calcolo fin qui esposto, il singolo neurone può virtualmente essere concepito per elaborare l'informazione che lo raggiunge secondo una qualsiasi funzione interna. L'area di studio dovrebbe risultare ristretta nel momento in cui si concentrano gli sforzi per replicare il più fedelmente possibile il solo calcolo neurale biologico, ma così non è: se gli studi fisiologici sui neuroni naturali non lasciano molti dubbi sul calcolo soglia effettuato da ogni singolo neurone, c'è poco accordo su come questo calcolo debba essere simulato correttamente in una rete artificiale.

Il problema non è secondario. Si parta da una ipotetica situazione minimale: un neurone biologico, sottoposto a stimolo derivante dalle sue sinapsi, raggiunta una certa "soglia", scarica il proprio impulso elettrochimico in direzione degli altri centri neurali, propagando così il segnale.

La rappresentazione matematica di questo calcolo soglia è abbastanza banale: per renderla chiara, si supponga di poter isolare in una rete complessa un singolo neurone e di lasciare integre le sinapsi che conducono ad esso il segnale elettrochimico proveniente da altri neuroni. La schematizzazione proposta (immagine 1.1) mostra appunto un neurone (rappresentato da un cerchietto) Ω , raggiunto da n sinapsi (rette di congiunzione) provenienti da altrettanti recettori di ingresso (rappresentati da frecce cerchiate). In questo modo otteniamo una rete strutturalmente

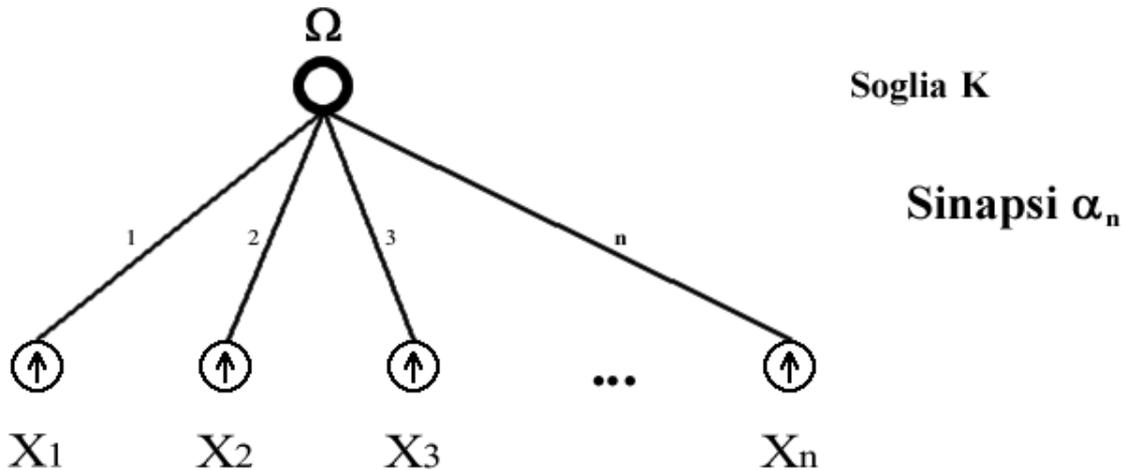


Immagine 1.1 Visione schematica di una rete modello Perceptron dotata di n segnali di ingresso e relative sinapsi di trasmissione del segnale verso l'unico neurone di uscita Ω .

semplice, nota come perceptron, nella quale vediamo il solo neurone Ω effettuare un calcolo soglia.

In termini di operatori matematici per rappresentare l'operazione eseguita è sufficiente utilizzare un insieme di disequazioni di questo genere:

$$\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \dots + \alpha_n X_n < K \rightarrow \Omega = 0$$

$$\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \dots + \alpha_n X_n \geq K \rightarrow \Omega = 1$$

Insieme 1.1/A

Ovvero: supponendo che il neurone Ω sia raggiunto da n sinapsi, quando la somma degli impulsi in entrata, data dall'informazione propagata dai neuroni connessi ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) moltiplicata per il livello di trasmissibilità delle singole sinapsi ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$), supera un valore K arbitrario allora il neurone si "accende" propagando a sua volta il proprio impulso alle sue ipotetiche connessioni più a valle nella struttura, altrimenti il neurone resta inattivo, "spento".

Volendo utilizzare un operatore diverso, che esprima però lo stesso calcolo appena esposto, si può ricorrere al concetto di sommatoria \sum . L'insieme con due disequazioni marcato come 1.1/A diventa allora:

$$\begin{aligned}\sum_n \alpha_n x_n < K &\rightarrow \Omega = 0 \\ \sum_n \alpha_n x_n \geq K &\rightarrow \Omega = 1\end{aligned}$$

Insieme 1.1/B

Con n che varia da 1 al numero di neuroni di ingresso fissati. La sommatoria esprime in modo meno dispendioso le somme esplicitate nell'insieme di disequazioni 1.1/A: quando necessario, si tenderà allora ad utilizzare questa seconda scrittura per ragioni di praticità espositiva.

Come si è visto, uno stimolo particolarmente elevato genera nel neurone bersaglio un “treno” di impulsi, ovvero una serie di impulsi identici tra loro e molto ravvicinati nel tempo, ciò che in codice binario è possibile definire come una “stringa di 1” consecutivi. Il modello appena proposto non è sufficientemente elastico e non può fornire una buona rappresentazione del fenomeno se non limitandosi a fotografare lo stato di attivazione dei singoli neuroni in un istante arbitrario T .

In questo senso, per rendere possibili le rappresentazioni dinamiche che tengano conto del reale comportamento del neurone biologico nel tempo è fondamentale inserire un parametro aggiuntivo: un intervallo temporale sufficientemente breve, che consideri i tempi fisiologicamente necessari ad un neurone biologico per ricaricarsi e “sparare” l'impulso successivo nel treno complessivo, potrebbe consentire di elaborare modelli basati su calcoli soglia come quello presentato, specificando i diversi istanti in cui è avvenuto il calcolo neurale e differenziandoli gli uni dagli altri. In senso analitico, quanto detto si traduce nell'utilizzo di una ulteriore dimensione di cui tenere conto nel calcolo neurale: le rappresentazioni

grafiche si fanno allora decisamente complesse, pur restando gestibili. In termini di disequazioni il risultato può essere espresso come segue:

Nell'istante T_1 :

$$\sum_n \alpha_n x_n < K \rightarrow \Omega = 0$$

$$\sum_n \alpha_n x_n \geq K \rightarrow \Omega = 1$$

Nell'istante T_2 :

$$\sum_n \alpha_n x_n < K \rightarrow \Omega = 0$$

$$\sum_n \alpha_n x_n \geq K \rightarrow \Omega = 1$$

...

Nell'istante T_t :

$$\sum_n \alpha_n x_n < K \rightarrow \Omega = 0$$

$$\sum_n \alpha_n x_n \geq K \rightarrow \Omega = 1$$

Insieme 1.2

Non si tratta d'altro quindi, che di replicare il calcolo soglia così come trattato in precedenza in ogni intervallo temporale T e registrare il comportamento del neurone in ogni dato istante. L'unico indice aggiunto in questo caso è quello relativo al tempo: faccio riferimento all'istante ipotetico T_t , con t appartenente all'insieme dei Numeri Naturali, variabile da 1 ad infinito.

Si nota subito come il modello matematico non sia propriamente "compatto" nella sua rappresentazione in termini formali: ad ogni istante corrisponde una diversa configurazione complessiva di sistema e un diverso stato di eccitazione dei singoli neuroni. Tuttavia quello della compattezza non è il problema principale di questa formalizzazione: il modello è soggetto ad un errore sistematico dal momento in cui non può esserci certezza che tutti i neuroni di una rete biologica complessa computino l'informazione ricevuta nello stesso istante. Osservando i due treni di impulsi rappresentati in precedenza (Grafico 1.1) si può cogliere come il rischio sia quello di scegliere un intervallo temporale troppo breve o troppo lungo finendo con il considerare alcuni neuroni "spenti" quando

invece hanno appena scaricato un impulso o al contrario di contare un solo impulso dove ne sono stati invece emessi due.

Esiste un terzo insieme di disequazioni concepito per conservare la vicinanza con il tipo di calcolo soglia proposto da un neurone biologico, ma più “compatto” in termini di insiemi di disequazioni e privo del problema temporale se considerato solo nel senso appena esposto. Secondo questo modello è possibile associare un treno di impulsi ad un output numerico discreto:

$$\begin{aligned} \sum_n \alpha_n x_n < K_1 &\rightarrow \Omega = 0 \\ K_1 \leq (\sum_n \alpha_n x_n) < K_2 &\rightarrow \Omega = 1 \\ K_2 \leq (\sum_n \alpha_n x_n) < K_3 &\rightarrow \Omega = 2 \\ \dots & \\ K_{p-1} \leq (\sum_n \alpha_n x_n) < K_p &\rightarrow \Omega = n \end{aligned}$$

Insieme 1.3

Come si vede, questo insieme di disequazioni ha il vantaggio di non dover fare riferimento ad intervalli di tempo, puntando invece ad una rappresentazione degli intervalli di risposta tra le soglie. In questo caso infatti più che un'unica soglia K , abbiamo un numero arbitrario p di soglie (con p appartenente all'insieme dei Numeri Naturali, variabile da 1 ad infinito): il valore di uscita del neurone Ω sarà calcolato quindi solo dopo aver fissato gli intervalli descritti dalle soglie e aver individuato all'interno di quale di questi intervalli si collochi di volta in volta il risultato offerto dalla sommatoria già esposta negli insiemi di disequazioni precedenti.

A differenza del primo modello in cui il neurone può solo propagare l'informazione semplice “acceso/spento”, qui il neurone conta su una funzione con più punti di discontinuità che associa valori discreti diversi a differenti valori di input (nell'esempio proposto in particolare i valori di input sono considerati sempre crescenti). Il valore discreto assunto dal neurone Ω rappresenta il numero di impulsi emessi in una rete biologica: il

precedente problema legato al tempo è stato quindi eluso, ma contestualmente ne sorge un secondo imputabile alla staticità dell'insieme 1.3. L'analisi dello stato di ogni singolo neurone è possibile solo dopo che questi è stato raggiunto da tutto il potenziale disponibile: il calcolo eseguito dalla sommatoria viene eseguito solo in un secondo momento per permettere di stabilire in modo accurato in quale intervallo delle soglie si collochi il valore della sommatoria $\sum_n \alpha_n x_n$ e conseguentemente quale sia il valore di Ω .

Il modello prevede quindi che il neurone resti inattivo finché il segnale che lo raggiunge non si è esaurito: la limitazione può apparire tollerabile quando si è in presenza di una rete modello "perceptron" come rappresentata schematicamente nella figura 1.1, ma non appena si cominciano ad analizzare reti multistrato occorre tenere conto del fatto che i neuroni naturali, superata la soglia, iniziano immediatamente a propagare segnali nella rete, continuando nella loro azione nel tempo ed eventualmente modificando la frequenza degli impulsi entro i limiti strutturali, finché gli stimoli di ingresso non vanno a cadere sotto la soglia di attivazione.

Paradossalmente l'unico modo efficace per evitare questo problema sarebbe quello di inserire una variabile legata ad intervalli di tempo in base ai quali analizzare lo stato della rete: a differenza che nell'insieme 1.2 gli intervalli dovrebbero essere scelti in questo caso non eccessivamente brevi, per non vanificare l'utilizzo della funzione di calcolo con molte soglie. Questo passaggio aggiuntivo farebbe ricadere il modello matematico negli stessi inconvenienti già esposti, non essendoci la possibilità di individuare un intervallo di tempo sufficientemente lungo da comprendere sicuramente qualsiasi treno di impulsi e tale da escludere anche la possibilità che vengano accorpati due o più treni di impulsi brevi emessi

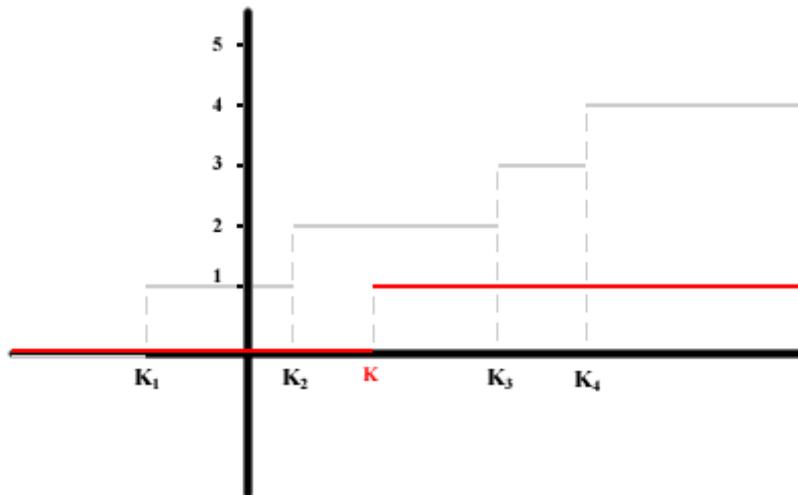


Grafico 1.2 Rappresentazione grafica di due funzioni discontinue cosiddette “a scalino”. La retta discontinua di colore rosso identifica un calcolo soglia semplice: superato il valore assegnato a K , il corrispondente valore delle ordinate passa da 0 a 1. La retta discontinua di colore grigio rappresenta la possibilità da parte di un neurone di propagare valori discreti di impulsi in un determinato arco di tempo: ad ogni superamento di una soglia K_n , il neurone reagirà emettendo una serie di n impulsi.

contemporaneamente da un secondo neurone ed intervallati da un certo tempo di inattività. Da un punto di vista computazionale infatti è diverso affermare che un neurone ha emesso due differenti treni di tre impulsi invece che un unico treno da sei, anche qualora si volesse ignorare l'importanza della frequenza, così come è stata esposta nelle prime pagine di questo lavoro.

Per maggiore chiarezza è stata eseguita una rappresentazione grafica delle due tipologie di insiemi di disequazioni (grafico 1.2): i due assi cartesiani presentano in ascissa la somma dei segnali di arrivo (ovvero: $\sum_n \alpha_n x_n$), e sulle ordinate il valore Ω del segnale di uscita del neurone.

Si noterà che, se da un lato è vero che le ascisse possono avere un valore negativo, in base all'azione per esempio di alcuni inibitori, questo

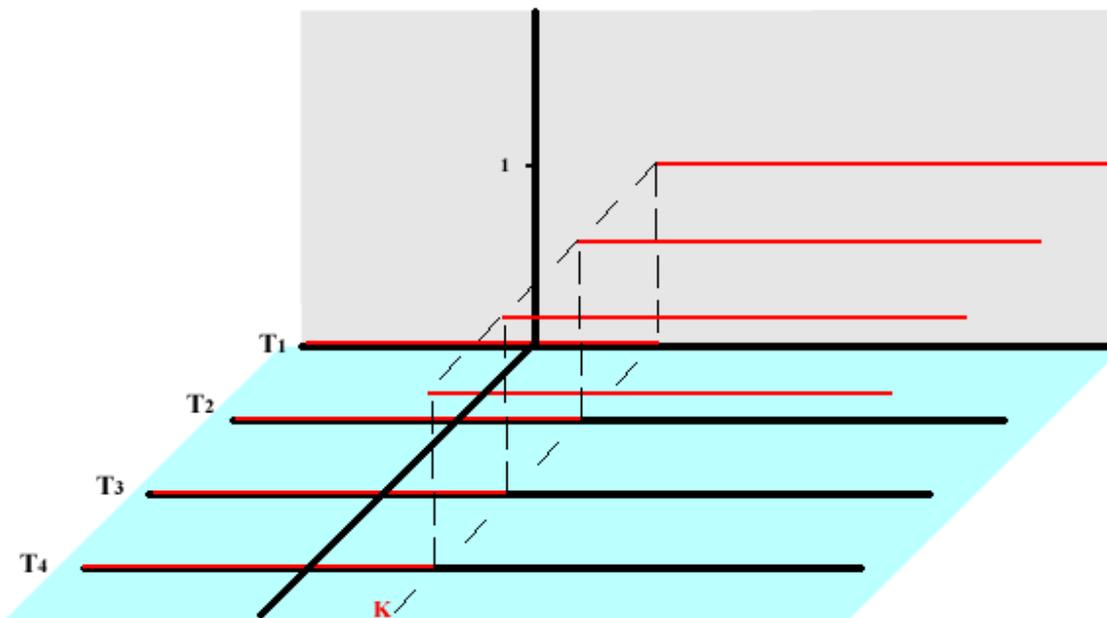


Grafico 1.3 Rappresentazione grafica di una funzione discontinua cosiddetta “a scalino”, che tenga in considerazione la dimensione del tempo, rendendo così possibile raffigurare il comportamento neurale tipico della propagazione di un treno di impulsi. Assumendo che in ogni istante T_n il calcolo soglia eseguito dal neurone sia sempre il medesimo, non si avranno spostamenti nel valore di attivazione fissato in K .

non è invece possibile per il valore Ω : un neurone non può propagare un numero negativo di impulsi.

Nel secondo grafico proposto (marcato 1.3) è stato aggiunto un terzo asse per permettere una rappresentazione degli insiemi legati agli istanti di tempo T . In questa particolare rappresentazione dell'insieme 1.2 la soglia K è mantenuta stabile, ma non si tratta di una necessità; non è invece rappresentato graficamente l'insieme 1.3, modificato secondo intervalli di tempo, perché da un punto di vista grafico non vi sarebbero differenze significative rispetto alla rappresentazione su assi cartesiani dell'insieme 1.2.

Prima di procedere verso la seconda fase di questo studio è necessaria una precisazione: è possibile impostare un neurone in una rete neurale artificiale in modo che trasformi i dati di ingresso secondo una funzione

continua di un qualsiasi genere. In effetti le reti neurali artificiali multistrato sono solitamente programmate in modo tale che la funzione di calcolo espressa da un neurone sia appunto continua, caratterizzata dalla forma di un sigmoide in modo da avvicinarsi il più possibile al primo insieme di disequazioni qui presentato (insieme 1.1). I motivi di questa scelta sono però di natura pratica: una funzione continua permette l'addestramento di una rete neurale artificiale tramite gli algoritmi di retropropagazione dell'errore. Nel momento in cui si cerca però di sviluppare un modello valido per le reti neurali biologiche e non si ha la necessità di dover sottoporre ipotetiche reti ad un addestramento, allora è possibile scartare questa vasta gamma di funzioni, concentrandosi solo sulle funzioni discontinue che per la loro natura sono più fedeli al modello biologico originale.

1.4 Rappresentazioni simboliche del calcolo delle reti tramite insiemi di disequazioni.

Fin qui si è limitato il campo al solo studio di quei modelli di reti neurali definiti "perceptron": occorre allora mostrare come si modifichino gli insiemi di disequazioni in corrispondenza dell'aggiungersi di neuroni di uscita e di livelli di elaborazione nascosti. Sono stati presentati però tre modelli diversi di calcolo per un singolo neurone: come si è visto le differenze non costituiscono un problema nelle loro formule simboliche tramite operatori matematici; obiezioni possono essere invece sollevate quando si cerca di sostenere un parallelo con il modello originale biologico, che è la struttura ultima che si intende analizzare in questo studio.

In base a quanto affermato nei paragrafi precedenti, qui di seguito si privilegerà l'insieme di disequazioni marcato come 1.2 poiché presenta meno inconvenienti restando coerente in modo apprezzabile con la struttura

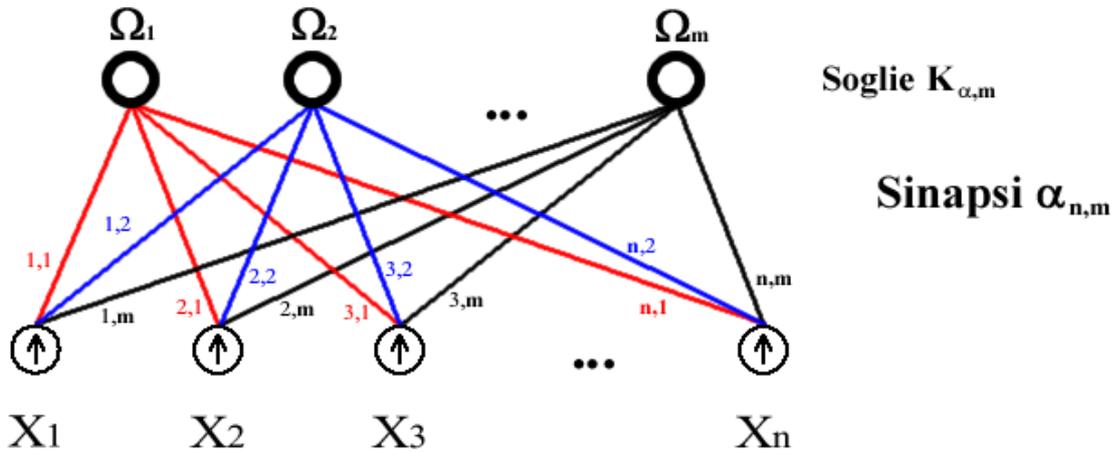


Immagine 1.2 Visione schematica di una rete modello perceptron dotata di n segnali di ingresso e relative sinapsi di trasmissione del segnale verso m neuroni di uscita Ω .

originale neurale. Questo modello matematico vede riproporre l'insieme di disequazioni di base 1.1 in ogni intervallo costante di tempo assunto arbitrariamente: per evitare una forma di ridondanza nel testo, causata dal ripetere di volta in volta le medesime strutture di calcolo al solo scopo di specificare il tempo ipotetico T_t , negli insiemi di disequazioni che seguono, a meno che non sia strettamente necessario, verrà dato per sottinteso il riferimento ad un intervallo di tempo.

Per prima cosa è necessario presentare le differenze a cui si va incontro quando si passa ad analizzare reti anterograde (ovvero che processano e diffondono il segnale in una sola direzione) caratterizzate da più di un neurone di uscita. Nell'immagine 1.2 ancora una volta i cerchietti simboleggiano i nodi della rete, ovvero i suoi neuroni e le rette di congiunzione tra neuroni e recettori sostituiscono le sinapsi della struttura.

La differenziazione in tre colori dovrebbe rendere subito palese come questa nuova rete neurale sia in realtà solo apparentemente diversa da quella già illustrata nell'immagine 1.1. In questo caso abbiamo ancora n (X_1, X_2, X_3 ecc.) neuroni d'ingresso, ognuno dei quali connesso con m neuroni di uscita (Ω_1, Ω_2 ecc.) tramite sinapsi denominate $\alpha_{n,m}$: i due indici

di queste ultime consentono di individuare la singola connessione tra uno degli n neuroni di ingresso ed uno degli m neuroni di uscita (per cui ad esempio la sinapsi $\alpha_{1,2}$ connette il neurone X_1 con il neurone Ω_2).

Ogni neurone di uscita è caratterizzato da una propria soglia $K_{\alpha,m}$: in questo caso l'indice α rappresenta l'appartenenza del neurone alla categoria dei neuroni di "primo livello", ovvero neuroni raggiunti direttamente dal segnale emesso dai neuroni di ingresso. Il secondo indice, m , indica ancora il numero ordinale del neurone di uscita in esame a cui la soglia si riferisce.

Come nella prima rappresentazione schematica del perceptron, i neuroni di primo livello e neuroni di uscita vengono a coincidere, per cui concettualmente possiamo paragonare la struttura rappresentata nell'immagine 1.2 come una serie di m perceptron distinti, che condividano solo le informazioni di ingresso. Ecco quindi le disequazioni di calcolo proprie di questa rete:

$$\sum_n \alpha_{n,1} X_n < K_{\alpha,1} \rightarrow \Omega_1 = 0$$

$$\sum_n \alpha_{n,1} X_n \geq K_{\alpha,1} \rightarrow \Omega_1 = 1$$

$$\sum_n \alpha_{n,2} X_n < K_{\alpha,2} \rightarrow \Omega_2 = 0$$

$$\sum_n \alpha_{n,2} X_n \geq K_{\alpha,2} \rightarrow \Omega_2 = 1$$

...

$$\sum_n \alpha_{n,m} X_n < K_{\alpha,m} \rightarrow \Omega_m = 0$$

$$\sum_n \alpha_{n,m} X_n \geq K_{\alpha,m} \rightarrow \Omega_m = 1$$

Insieme 1.4

Con la sola differenza dell'aumento degli indici, si tratta di una replica dell'insieme originale 1.1 per tutti gli m neuroni di uscita. In questo modo è possibile calcolare per ognuno di essi quando la somma di tutti gli impulsi derivanti dai neuroni di ingresso (identici per tutti gli m neuroni), moltiplicata per i modificatori delle sinapsi (differenti per ogni coppia di neuroni connessi), riesca a superare la soglia K (anch'essa unica per ogni

singolo neurone) necessitando il neurone di uscita ad attivarsi, scaricando un impulso.

Come anticipato, l'insieme 1.4 dovrebbe inoltre essere ripetuto per ogni istante T_t : in questo caso non è necessario replicare le formule in t insiemi identici, dato che l'operazione resta intuitivamente comprensibile. È invece utile far notare come tanto le sinapsi, quanto le soglie di attivazione, non siano necessariamente stabili nel tempo nel loro modello originale naturale. Il modello matematico qui rappresentato non risente di questo inconveniente poiché fissa solo una "etichetta" per ogni costante: così come istante per istante si dovrà tenere conto delle variabili immesse nell'insieme dagli n neuroni di ingresso, andranno anche considerati i possibili cambiamenti nelle altre due voci (soglie e modificatori sinaptici) delle disequazioni.

Differenze significative rispetto al modello iniziale sorgono non appena si aggiungano dei livelli intermedi di elaborazione: per cominciare si continueranno ad analizzare reti anterograde con collegamenti sinaptici che coinvolgano sempre tutti i neuroni di uno strato con tutti i neuroni dello strato successivo, reti quindi prive di collegamenti che consentano il ritorno del segnale nella direzione dei neuroni di ingresso o il "salto" di uno o più strati.

Qui di seguito la rappresentazione schematica di una rete multistrato con tre livelli distinti di organizzazione neurale: in questo caso neuroni di primo livello e neuroni di uscita non coincidono più. Come per la struttura precedente, l'indice n è associato ai neuroni di ingresso X e ne rappresenta il numero di unità. Le informazioni sono trasmesse verso i neuroni di primo livello tramite le sinapsi $\alpha_{n,i}$: questi indici stanno a significare che si tratta di connessioni tra gli n neuroni di ingresso e gli i neuroni di primo livello, denominati qui A neuroni. Fin qui, rispetto alla struttura analizzata in

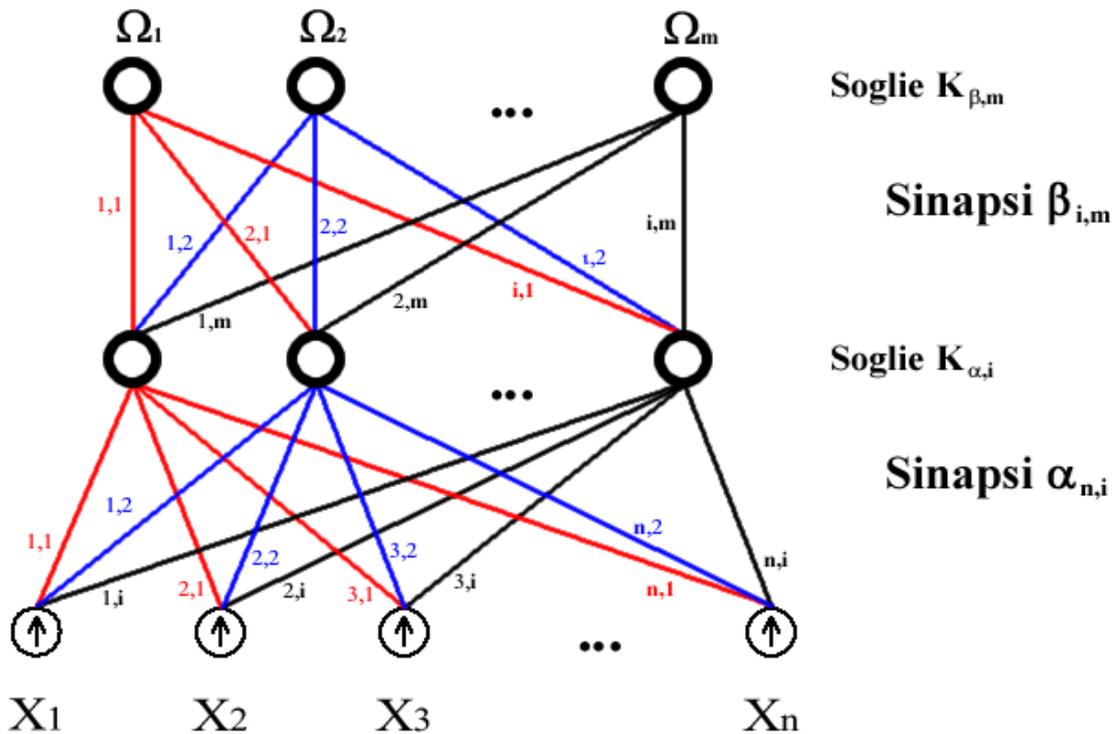


Immagine 1.3 Visione schematica di una rete multistrato anterograda dotata di n segnali di ingresso e relative sinapsi di trasmissione del segnale verso gli i neuroni di primo livello. Questi a loro volta sono connessi con gli m neuroni di uscita Ω .

precedenza (immagine 1.2), è stata solo modificata l'assegnazione degli indici relativi ai neuroni di primo livello infatti con A_i (usato poi nell'insieme 1.5) si farà riferimento allo stato di attivazione del singolo neurone di primo livello: indice in tutto simile a quello utilizzato fin qui per i neuroni di uscita Ω_m . Su questa base si innestano i neuroni che possiamo definire di secondo livello (immagine 1.3).

Se i segnali che raggiungono ogni i neurone di primo livello A sono sufficientemente intensi da superare la relativa soglia di attivazione $K_{\alpha,i}$, allora il neurone di questo livello invierà un impulso ad ogni m neurone di uscita Ω tramite le sinapsi $\beta_{i,m}$. Infine se il segnale, eccitato o inibito dalle sinapsi, sarà sufficientemente elevato da superare le singole soglie $K_{\beta,m}$, il neurone Ω emetterà a sua volta un impulso. È interessante sottolineare

come questa volta i neuroni di uscita elaborino informazioni già processate da un livello precedente della rete e non siano raggiunti dal segnale diretto proveniente dall'esterno del sistema. L'insieme 1.5 descrive in termini formali questi stessi passaggi.

$$\begin{aligned}
 \sum_n \alpha_{n,1} X_n < K_{\alpha,1} &\rightarrow A_1 = 0 \\
 \sum_n \alpha_{n,1} X_n \geq K_{\alpha,1} &\rightarrow A_1 = 1 \\
 \sum_n \alpha_{n,2} X_n < K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 0 \\
 \sum_n \alpha_{n,2} X_n \geq K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 1 \\
 &\dots \\
 \sum_n \alpha_{n,i} X_n < K_{\alpha,i} &\rightarrow A_i = 0 \\
 \sum_n \alpha_{n,i} X_n \geq K_{\alpha,i} &\rightarrow A_i = 1 \\
 &\quad \sum_i \beta_{i,1} A_i < K_{\beta,1} \rightarrow \Omega_1 = 0 \\
 &\quad \sum_i \beta_{i,1} A_i \geq K_{\beta,1} \rightarrow \Omega_1 = 1 \\
 &\quad \sum_i \beta_{i,2} A_i < K_{\beta,2} \rightarrow \Omega_2 = 0 \\
 &\quad \sum_i \beta_{i,2} A_i \geq K_{\beta,2} \rightarrow \Omega_2 = 1 \\
 &\quad \dots \\
 &\quad \sum_i \beta_{i,m} A_i < K_{\beta,m} \rightarrow \Omega_m = 0 \\
 &\quad \sum_i \beta_{i,m} A_i \geq K_{\beta,m} \rightarrow \Omega_m = 1
 \end{aligned}$$

Insieme 1.5

In questa fase dello studio può essere utile l'analisi di una ulteriore rete neurale anterograda, aggiungendo un ulteriore strato nascosto rispetto alla precedente: gli indici n ed m sono come sempre attribuiti rispettivamente ai neuroni di ingresso X e di uscita Ω : questa scelta consentirà di gestire in modo più ordinato le rappresentazioni grafiche nella seconda parte di questo lavoro. L'immagine 1.4 rappresenta in modo schematico questa diversa struttura neurale: gli i neuroni A di primo livello, come nel caso precedente, sono connessi agli ingressi tramite le sinapsi $\alpha_{n,i}$, ma in questa nuova rappresentazione sono anche connessi con j neuroni B di secondo livello (che in precedenza coincidevano con i neuroni di

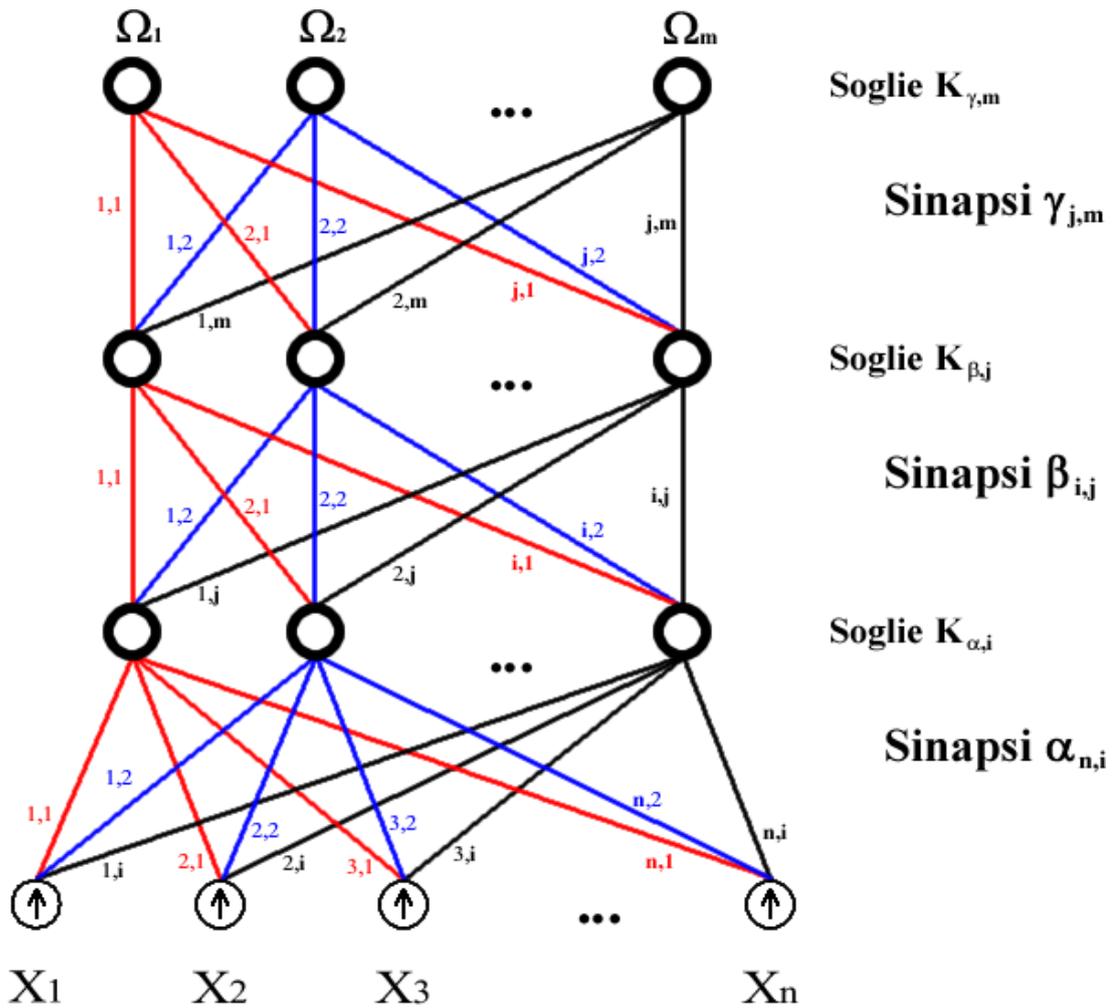


Immagine 1.4 Visione schematica di una rete multistrato anterograda dotata di due livelli neurali nascosti: il segnale si propaga a partire dagli n segnali di ingresso verso gli i neuroni di primo livello. Da qui agli j neuroni di secondo livello ed infine verso gli m neuroni di uscita Ω .

uscita) tramite le sinapsi $\beta_{i,j}$. Infine i neuroni di secondo livello B sono connessi a loro volta con gli m neuroni di uscita Ω tramite le sinapsi $\gamma_{j,m}$.

Ogni neurone è caratterizzato dalla propria soglia: rispetto al modello precedente sono state introdotte in questo caso le soglie $K_{\beta,j}$, riferite ai neuroni di secondo livello B. Le soglie K_m dei neuroni di uscita, che ora coincidono con neuroni di terzo livello, assumono quindi l'indice di $K_{\gamma,m}$.

Il procedimento è ricorsivo, come apparirà chiaro dall'insieme di disequazioni 1.6: una volta fissati gli indici, si procede partendo da ogni

singolo m neurone di uscita Ω , verificando a quali condizioni il segnale che questi riceve sarà sufficiente a superare la soglia di attivazione. Poiché è evidente che se questi neuroni non ricevono alcun segnale, allora non potrà verificarsi uno stato di eccitazione con conseguente trasmissione dell'impulso: si dovrà esaminare lo stato neurale precedente, per stabilire a quali condizioni ogni singolo neurone di questo livello sia in grado di emettere un segnale. Procedendo a ritroso si raggiungerà quindi lo stato di neuroni di ingresso, da cui è partito il segnale e che consente all'intero sistema di attivarsi.

$$\sum_n \alpha_{n,1} x_n < K_{\alpha,1} \rightarrow A_1 = 0$$

$$\sum_n \alpha_{n,1} x_n \geq K_{\alpha,1} \rightarrow A_1 = 1$$

$$\sum_n \alpha_{n,2} x_n < K_{\alpha,2} \rightarrow A_2 = 0$$

$$\sum_n \alpha_{n,2} x_n \geq K_{\alpha,2} \rightarrow A_2 = 1$$

...

$$\sum_n \alpha_{n,i} x_n < K_{\alpha,i} \rightarrow A_i = 0$$

$$\sum_n \alpha_{n,i} x_n \geq K_{\alpha,i} \rightarrow A_i = 1$$

$$\sum_i \beta_{i,1} A_i < K_{\beta,1} \rightarrow B_1 = 0$$

$$\sum_i \beta_{i,1} A_i \geq K_{\beta,1} \rightarrow B_1 = 1$$

$$\sum_i \beta_{i,2} A_i < K_{\beta,2} \rightarrow B_2 = 0$$

$$\sum_i \beta_{i,2} A_i \geq K_{\beta,2} \rightarrow B_2 = 1$$

...

$$\sum_i \beta_{i,j} A_i < K_{\beta,j} \rightarrow B_j = 0$$

$$\sum_i \beta_{i,j} A_i \geq K_{\beta,j} \rightarrow B_j = 1$$

$$\sum_j \gamma_{j,1} B_j < K_{\gamma,1} \rightarrow \Omega_1 = 0$$

$$\sum_j \gamma_{j,1} B_j \geq K_{\gamma,1} \rightarrow \Omega_1 = 1$$

$$\sum_j \gamma_{j,2} B_j < K_{\gamma,2} \rightarrow \Omega_2 = 0$$

$$\sum_j \gamma_{j,2} B_j \geq K_{\gamma,2} \rightarrow \Omega_2 = 1$$

...

$$\sum_j \gamma_{j,m} B_j < K_{\gamma,m} \rightarrow \Omega_m = 0$$

$$\sum_j \gamma_{j,m} B_j \geq K_{\gamma,m} \rightarrow \Omega_m = 1$$

Il riproporsi delle disequazioni di calcolo della rete in sostanza sempre simili a se stesse non ha particolari interessi se non quello di mostrare il tipo di procedimento che è possibile seguire nell'analisi della struttura. Ad ogni strato aggiunto corrispondono insiemi di disequazioni più lunghi, ma non più complessi e come si vedrà nella seconda parte di questo studio, l'aumentare delle disequazioni di calcolo è più comodamente gestibile tramite rappresentazioni grafiche piuttosto che in questo genere di insiemi: una rappresentazione analitica del calcolo eseguito dalla rete non è però possibile senza prima aver individuato le funzioni da rappresentare e questa prima parte dello studio è stata appunto volta alla loro formalizzazione.

1.5 Variazioni degli insiemi di disequazioni in corrispondenza di alterazioni fisiche degli elementi della rete.

Il passo successivo in questo lavoro è quindi quello di mostrare come le modifiche nella struttura di una rete comportino modifiche nelle disequazioni di calcolo. L'immagine 1.5 rappresenta una rete diversa dalle precedenti sotto vari aspetti, il primo dei quali appare immediatamente evidente: a differenza delle precedenti, questa struttura presenta un numero di neuroni finito e ben determinato: dove le immagini da 1.1 a 1.4 mostravano per ogni "strato" neurale un numero ipoteticamente infinito di neuroni, qui invece è possibile contare tre neuroni di ingresso, due neuroni (o tre, come si vedrà) di primo livello e ulteriori tre neuroni di uscita. L'esigenza di utilizzare questa volta a titolo di esempio una struttura ben definita è dovuta al fatto che in questo caso la rete non è anterograda e non presenta connessioni complete tra i livelli neurali. Mostrare i generici insiemi di disequazioni sotto queste premesse, si sarebbe rivelato

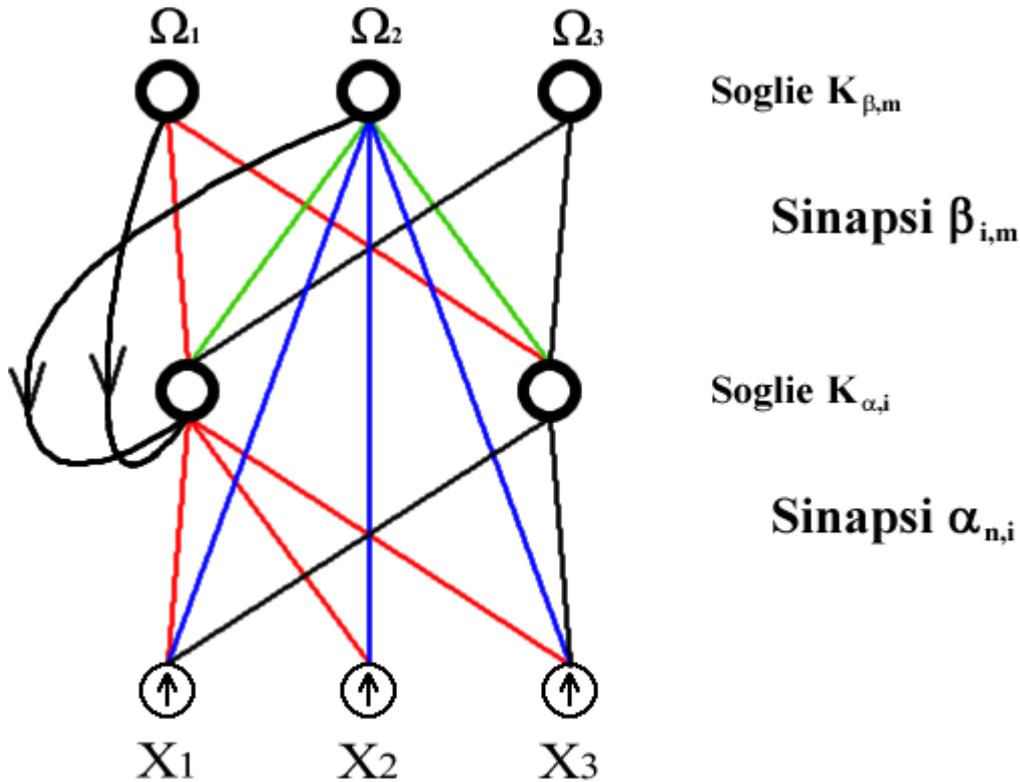


Immagine 1.5 Visione schematica di una rete multistrato non anterograda. I tre segnali di ingresso si propagano, quando connessi tramite sinapsi, verso i neuroni dei livelli successivi. Si noti in particolare il circuito generato dalle sinapsi di connessione di due dei tre neuroni di uscita Ω con un neurone di primo livello

inutilmente complicato ai fini della comprensione del fenomeno nel suo complesso.

Le generalizzazioni esposte sugli indici fin qui utilizzati restano però valide, per cui indicheremo con: X_n , A_i e Ω_m rispettivamente i neuroni di ingresso, di primo livello e di uscita; $\alpha_{n,i}$, $\beta_{i,m}$, $\gamma_{m,n}$ individueranno le sinapsi di congiunzione in modo che il primo indice determini il neurone di partenza ed il secondo quello di arrivo della sinapsi; infine con $K_{\alpha,i}$ e $K_{\beta,m}$ si intenderanno le soglie di attivazione dei neuroni di primo e secondo livello.

Entrando nel dettaglio vediamo come i tre neuroni di ingresso siano collegati con i neuroni A_1 e Ω_2 , mentre il neurone A_2 riceva i segnali

inviatigli solamente dai neuroni di ingresso X_1 e X_3 . I neuroni di primo livello devono essere considerati tre, uno dei quali (Ω_2) è anche neurone di uscita. I neuroni di primo livello A_1 e A_2 sono entrambi connessi con tutti e tre i neuroni di uscita Ω_m , per cui Ω_2 riceve impulsi sia dai neuroni di ingresso che dagli altri neuroni di primo livello. Come ultima importante differenza rispetto alle reti neurali precedentemente analizzate, i neuroni di uscita Ω_1 e Ω_2 trasmettono il loro segnale all'esterno come risultato del processamento delle informazioni in entrata, ma sono a loro volta connessi anche con il neurone di primo livello A_1 che quindi in questa fase può essere considerato anche come neurone di terzo livello.

La rappresentazione formale tramite insieme di disequazioni di questa struttura non può questa volta prescindere dall'utilizzo degli intervalli di tempo T_t necessari per distinguere le varie fasi di trasmissione di segnali tra i nodi della rete. In particolare può essere utile immaginare la rete in uno stadio iniziale come fosse "spenta" ovvero una condizione di attivazioni che vede ogni singolo neurone non emettere alcun segnale. L'inizio dell'intervallo di tempo descritto da T_1 coinciderà quindi con l'ingresso nel sistema degli impulsi di input tramite i neuroni di ingresso: l'informazione si propagherà quindi verso i tre neuroni di primo livello incontrando l'"ostacolo" del calcolo soglia. Se gli impulsi, eccitati o inibiti dalle rispettive sinapsi percorse, riescono a superare la soglia, il segnale si propagherà al livello successivo. Al termine dell'intervallo di tempo T_1 , l'unico neurone di uscita potenzialmente attivo è Ω_2 , per cui in termini informatici al termine di questo intervallo temporale potremo avere come segnale di uscita la stringa (0,0,0) oppure (0,1,0): i neuroni di uscita Ω_1 e Ω_3 non possono essere stati raggiunti da alcun segnale, per cui sotto queste condizioni non è possibile che abbiano superato la soglia di attivazione.

All'inizio dell'intervallo di tempo T_2 nuovi input vengono immessi nella rete, mentre il segnale eventualmente trasmesso dai neuroni di primo livello è contemporaneamente propagato ai livelli successivi. Il neurone di primo livello A_2 torna a comportarsi come nell'intervallo di tempo T_1 , al contrario gli altri due neuroni di primo livello sono raggiunti, oltre che dal segnale di entrata, anche dal segnale di altri neuroni se attivi in seguito agli input registrati durante il primo intervallo di tempo. In particolare il neurone A_1 è raggiunto contemporaneamente dai nuovi segnali di input e dal segnale emesso dal neurone di uscita Ω_2 (il neurone Ω_1 potrà attivarsi solo al termine di T_2), contemporaneamente il neurone di uscita Ω_2 è anch'esso raggiunto dai segnali di ingresso nella rete, ai quali somma gli impulsi provenienti dai neuroni di primo livello A_1 e A_2 . Al termine del secondo periodo di tempo, tutti e tre i neuroni di uscita potranno aver superato la soglia di attivazione e le stringhe di uscita potranno essere notevolmente diversificate (una analisi più approfondita in merito sarà compiuta nella seconda parte del lavoro).

L'intervallo T_3 segna il chiudersi del ciclo: i neuroni di primo livello A_2 e Ω_2 si comportano come descritto per il periodo T_2 , mentre il neurone A_1 è raggiunto dal segnale emesso dai neuroni di ingresso e dal segnale propagato dai neuroni di uscita Ω_1 e Ω_2 . Con questo ultimo passaggio il segnale chiude il circuito che porta la rete ad "autoalimentarsi": non bisogna dimenticare tuttavia che sinapsi e soglie non consentono sempre il passaggio del segnale per cui non è detto che il circuito tenda a restare "acceso", una volta che si sia riusciti ad innescarlo. Questa è la rappresentazione formale della descrizione appena conclusa:

tempo T_1

$$\alpha_{1,1}x_1 + \alpha_{2,1}x_2 + \alpha_{3,1}x_3 < K_{\alpha,1} \rightarrow A_1 = 0$$

$$\alpha_{1,1}x_1 + \alpha_{2,1}x_2 + \alpha_{3,1}x_3 \geq K_{\alpha,1} \rightarrow A_1 = 1$$

$$\begin{aligned}
\alpha_{1,2}X_1 + \alpha_{3,2}X_3 < K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 0 \\
\alpha_{1,2}X_1 + \alpha_{3,2}X_3 \geq K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 1 \\
\Omega_1 &= 0 \\
\alpha_{1,3}X_1 + \alpha_{2,3}X_2 + \alpha_{3,3}X_3 < K_{\beta,2} &\rightarrow \Omega_2 = 0 \\
\alpha_{1,3}X_1 + \alpha_{2,3}X_2 + \alpha_{3,3}X_3 \geq K_{\beta,2} &\rightarrow \Omega_2 = 1 \\
\Omega_3 &= 0
\end{aligned}$$

tempo T₂

$$\begin{aligned}
\alpha_{1,1}X_1 + \alpha_{2,1}X_2 + \alpha_{3,1}X_3 + \gamma_{2,1}\Omega_{2,T1} < K_{\alpha,1} &\rightarrow A_1 = 0 \\
\alpha_{1,1}X_1 + \alpha_{2,1}X_2 + \alpha_{3,1}X_3 + \gamma_{2,1}\Omega_{2,T1} \geq K_{\alpha,1} &\rightarrow A_1 = 1 \\
\alpha_{1,2}X_1 + \alpha_{3,2}X_3 < K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 0 \\
\alpha_{1,2}X_1 + \alpha_{3,2}X_3 \geq K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 1 \\
\beta_{1,1}A_{1,T1} + \beta_{2,1}A_{2,T1} < K_{\beta,1} &\rightarrow \Omega_1 = 0 \\
\beta_{1,1}A_{1,T1} + \beta_{2,1}A_{2,T1} \geq K_{\beta,1} &\rightarrow \Omega_1 = 1 \\
\beta_{1,2}A_{1,T1} + \beta_{2,2}A_{2,T1} + \alpha_{1,3}X_1 + \alpha_{2,3}X_2 + \alpha_{3,3}X_3 < K_{\beta,2} &\rightarrow \Omega_2 = 0 \\
\beta_{1,2}A_{1,T1} + \beta_{2,2}A_{2,T1} + \alpha_{1,3}X_1 + \alpha_{2,3}X_2 + \alpha_{3,3}X_3 \geq K_{\beta,2} &\rightarrow \Omega_2 = 1 \\
\beta_{1,3}A_{1,T1} + \beta_{2,3}A_{2,T1} < K_{\beta,3} &\rightarrow \Omega_3 = 0 \\
\beta_{1,3}A_{1,T1} + \beta_{2,3}A_{2,T1} \geq K_{\beta,3} &\rightarrow \Omega_3 = 1
\end{aligned}$$

tempo T₃

$$\begin{aligned}
\alpha_{1,1}X_1 + \alpha_{2,1}X_2 + \alpha_{3,1}X_3 + \gamma_{1,1}\Omega_{1,T2} + \gamma_{2,1}\Omega_{2,T2} < K_{\alpha,1} &\rightarrow A_1 = 0 \\
\alpha_{1,1}X_1 + \alpha_{2,1}X_2 + \alpha_{3,1}X_3 + \gamma_{1,1}\Omega_{1,T2} + \gamma_{2,1}\Omega_{2,T2} \geq K_{\alpha,1} &\rightarrow A_1 = 1 \\
\alpha_{1,2}X_1 + \alpha_{3,2}X_3 < K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 0 \\
\alpha_{1,2}X_1 + \alpha_{3,2}X_3 \geq K_{\alpha,2} &\rightarrow A_2 = 1 \\
\beta_{1,1}A_{1,T2} + \beta_{2,1}A_{2,T2} < K_{\beta,1} &\rightarrow \Omega_1 = 0 \\
\beta_{1,1}A_{1,T2} + \beta_{2,1}A_{2,T2} \geq K_{\beta,1} &\rightarrow \Omega_1 = 1 \\
\beta_{1,2}A_{1,T2} + \beta_{2,2}A_{2,T2} + \alpha_{1,3}X_1 + \alpha_{2,3}X_2 + \alpha_{3,3}X_3 < K_{\beta,2} &\rightarrow \Omega_2 = 0 \\
\beta_{1,2}A_{1,T2} + \beta_{2,2}A_{2,T2} + \alpha_{1,3}X_1 + \alpha_{2,3}X_2 + \alpha_{3,3}X_3 \geq K_{\beta,2} &\rightarrow \Omega_2 = 1 \\
\beta_{1,3}A_{1,T1} + \beta_{2,3}A_{2,T1} < K_{\beta,3} &\rightarrow \Omega_3 = 0 \\
\beta_{1,3}A_{1,T1} + \beta_{2,3}A_{2,T1} \geq K_{\beta,3} &\rightarrow \Omega_3 = 1
\end{aligned}$$

Insieme 1.7

1.6 Cenni sulla struttura dell'encefalo.

Nel corso della storia la sede della mente umana è stata indicata in vari punti o organi del corpo umano tra i quali anche il cervello sin da tempi antichi, ma la speculazione sulla sede dell'animo umano era molto spesso

affiancata da una visione dicotomica che postulava la mente in contrapposizione con la natura materiale fisica del corpo e quindi individuava in un organo più che altro la capacità di fare da “ponte” tra due mondi considerati per ogni aspetto non solo distinti, ma inconciliabili.

In epoca moderna l’espressione più alta ed influente di questa visione dualista è stata offerta dalla separazione Cartesiana tra *res cogitans* (il pensiero) e *res extensa* (la materia). Come è noto Cartesio riconosceva al sistema nervoso un ruolo cardine nella trasmissione meccanica degli stimoli ambientali, ma localizzava la mente nella ghiandola pineale, attribuendole quindi la facoltà di convertire i movimenti meccanici in entità immateriali che potessero essere elaborate dalla mente.⁵

Una ricostruzione storica dell’evolversi delle riflessioni teoretiche in questo ambito sarebbe molto complessa ed esula dagli scopi di questo studio, tuttavia è interessante notare come l’influenza in particolare del dualismo cartesiano nel nostro pensiero sia stata così forte da resistere alle scoperte scientifiche compiute in ambito medico nell’ultimo secolo. Oggi infatti nessuno metterebbe più in dubbio che sia il cervello l’organo in cui vadano individuate le facoltà cognitive in tutti i loro aspetti (sensazioni, coscienza di sé e degli altri, memoria ecc.) tuttavia, nonostante questa sia oggi una conoscenza più che radicata, in pochi si sorprendono del fatto che buona parte degli studi ancora oggi condotti sul comportamento e sui processi cognitivi in genere non appaiono in alcun modo collegati a studi di stampo neurologico o biologico.

Uno dei motivi più semplici che hanno portato in passato a postulare tale distacco tra le discipline che si occupano di studiare l’organo-cervello e quelle che invece si concentrano sulla mente, può essere ricercato nelle difficoltà materiali che è necessario affrontare quando si cerca di portare avanti una indagine biologica approfondita. L’assenza di strumenti in grado

di evidenziare l'intreccio strutturale della rete neurale o di analizzare correttamente funzione e qualità delle singole componenti del tessuto cerebrale ha certamente giocato un ruolo importante in questo senso.

Lo sviluppo del microscopio elettronico ha rappresentato quindi un momento importante rendendo possibile uno studio anatomico puntuale, ma ancor più di recente, le nuove tecniche di registrazione degli stati di attivazione delle reti neurali biologiche, in riferimento ad aree e regioni corticali, hanno permesso di aggirare quelle tecniche invasive (come l'impianto di elettrodi attraverso la scatola cranica) che ovviamente limitavano la sperimentazione sui soli animali ed anche in questi casi non senza molte e motivate polemiche.

Il distacco tra le scienze biologiche e gli studi teoretici, dovuto quindi anche a mere ragioni pratiche, si è però perpetuato fino ai nostri giorni soprattutto all'interno di quei paradigmi teorici che postulano il dualismo mente-cervello in una chiave contemporanea della separazione Cartesiana. L'analogia di fondo del cognitivismo non fa altro che aggiornare tecnologicamente questo stesso dualismo quando paragona il cervello animale all'hardware di un computer e la mente al software. Accettata la premessa ne consegue che è possibile studiare la mente a prescindere dal supporto biologico che la sviluppa, così come chi cerca di comprendere il funzionamento e le regole proprie di un programma software non necessariamente deve conoscere come sia stato disegnato il processore che permette allo stesso software di funzionare.

Questo quadro d'insieme qui tratteggiato solo per grandi linee è utile soprattutto per collocare il presente studio all'interno dell'ambito pur ampio noto come "connessionismo"⁶. È questa una corrente che si fonda proprio sull'idea che mente e cervello vadano studiati necessariamente in modo uniforme e coeso: inizialmente dedicata solo ad un aspetto più

pratico rivolto alla soluzione di problemi in ambito artificiale, questa concezione si sta lentamente affermando in contrapposizione all'impianto cognitivista classico, attaccando in particolare l'antico dualismo mente-corpo.

“L'identificazione, su varie scale spaziali, dell'architettura funzionale dei sistemi nervosi va di pari passo con le ipotesi sul ruolo di una data struttura e sul modo in cui, a costituire i meccanismi che svolgono tale ruolo, occorrono le sottocomponenti della struttura stessa. In verità, l'architettura funzionale alle varie scale spaziali è indissolubilmente parte di una macchina biologica integrata e unitaria. La funzione di un neurone dipende cioè dalle sinapsi che recano ad esso informazione e il neurone, a sua volta, elabora l'informazione interagendo con altri neuroni in reti locali, le quali svolgono un ruolo particolare in virtù della posizione che occupano nella geometria globale del cervello.

Di conseguenza quali siano le strutture che effettivamente costituiscono un livello di organizzazione nel sistema nervoso è una questione empirica, non a priori. Prima di aver studiato il sistema nervoso, non è possibile dire quanti livelli vi siano, né quali siano i caratteri strutturali e funzionali di ciascun livello. [...] Quando ne sapremo di più sul cervello e sul suo funzionamento potranno essere introdotti nuovi livelli di organizzazione. Ciò è specialmente probabile ai livelli superiori, molto meno conosciuti dei livelli inferiori.”⁷

Nella prima parte dello studio l'analisi della struttura neurale mira quindi a fissare alcuni punti cardine di origine biologica in base ai quali poter costruire uno strumento efficace di analisi di alcuni processi cognitivi noti. I pochi modelli di reti analizzate sono strutturalmente limitati sotto molti punti di vista, ma potranno servire a tentare delle generalizzazioni nella terza parte di questo lavoro, se saranno correttamente inseriti nel

contesto della struttura generale dell'encefalo: in questo senso è utile cercare di dare uno sguardo d'insieme, prima di procedere oltre.

In rapporto alle dimensioni del corpo, la corteccia umana sembra essere quella più grande e complessa in natura. Un tempo divisa in sole quattro parti distinte per la relativa posizione all'interno della scatola cranica (frontale, temporale, parietale e occipitale), la corteccia è stata in seguito suddivisa in una cinquantina di aree funzionali grazie anche allo studio delle lesioni post-traumatiche. Oggi ognuna di queste è a sua volta oggetto di studio approfondito grazie alla risonanza magnetica funzionale ed è stato così possibile individuare un livello organizzativo inferiore che ha condotto alla localizzazione di un numero elevato di sottoregioni corticali.

Un esempio esplicativo della relazione tra la periferia del corpo e le relative aree di elaborazione nella corteccia può essere individuato nella mano: in essa ci sono alcuni recettori specializzati nell'avvertire una pressione, altri recettori capaci di segnalare un'intrusione e altri sensibili alla temperatura esterna. Il segnale nervoso generato da questi terminali risale lungo il prolungamento assonale dei neuroni sensoriali fino al suo corpo cellulare e viene da qui ritrasmesso ad altri neuroni in direzione centripeta, nel senso complessivo dell'encefalo.

La regione specifica della corteccia cerebrale verso cui questo genere di stimoli converge è chiamata area somatosensoriale. Si tratta di un'area relativamente stretta e lunga a cui giungono i segnali inviati dai recettori posti sulla superficie del corpo. Tali sensazioni non si disturbano però a vicenda, ma confluiscono in quelle sottoregioni a cui si è accennato: ad esempio quelle provenienti dalla testa convergono verso l'estremità più laterale dell'area somatosensoriale, mentre le sensazioni provenienti dalle gambe convergono verso una sottoarea più centrale.

Nella corteccia cerebrale di un essere umano adulto si trovano circa 10^{11} neuroni, ognuno dei quali dotato in media di circa 10^4 connessioni: si tratta quindi 10^{15} (un milione di miliardi) connessioni sinaptiche complessive. Le sinapsi rappresentano la componente principale del peso e della massa corticale e dato che la distanza media tra le cellule nervose è nell'ordine dei milionesimi di millimetro, è intuibile perché l'intera struttura della corteccia sembrasse un tempo compatta ed uniformemente densa. La caratteristica che rende unica la corteccia cerebrale e ciò che ne fa l'elemento più importante ai fini dello studio della mente, non va ricercata nel semplice numero di neuroni che la compongono: anche quando è paragonata ad altre parti componenti l'encefalo, ciò che rende davvero unica la corteccia è l'altissimo numero di connessioni.

Al contrario di quanto si riteneva un tempo, le connessioni sinaptiche non sono distribuite in maniera uniforme ed è quindi possibile distinguere le molte aree corticali grazie a caratteri anatomici specifici che riguardano la morfologia della rete così come la struttura dei singoli neuroni e alcune caratteristiche peculiari delle sinapsi. È importante sottolineare come queste differenze di natura anatomica siano accompagnate dalle differenze funzionali che si risolvono nella specializzazione dell'area ad assolvere ad una determinata facoltà cognitiva.

Fatte salve queste differenziazioni, non è errato affermare che il principio alla base delle singole connessioni e del funzionamento delle cellule neurali resti quello fin qui descritto per vie generali: è opportuno allora immaginare cosa accadrebbe se si volesse analizzare la struttura neurale biologica con gli strumenti matematici fin qui presentati.

Nell'ultimo esempio schematico di rete neurale (immagine 1.5) è stato mostrato come l'aggiungere o il sottrarre sinapsi di congiunzione tra i centri nervosi modifichi l'insieme di disequazioni incrementando o

riducendo le variabili di cui è necessario tenere conto nel calcolo soglia. Passando allo studio del modello biologico diventa subito evidente come la corteccia appena descritta per grandi linee, ovvero una massa costituita principalmente da ramificazioni dendritiche, sia una struttura che consente la propagazione e l'elaborazione dei segnali in modo significativamente elevato. In termini di insiemi simbolici di disequazioni la portata delle capacità di calcolo consentite da questa struttura superano senza dubbio le nostre possibilità di rappresentazione. Optare per degli strumenti più semplici e trattabili diventa allora una necessità nel momento in cui si decide di affrontare il problema partendo dal punto di vista del calcolo neurale.

1.7 Sinaptogenesi ed elasticità della rete.

Quanto detto a riguardo del funzionamento e della struttura della rete neurale biologica umana, deve essere inteso come un quadro proprio di un organismo adulto, che non sia stato colpito da particolari traumi fisici. Come tutti i sistemi complessi, però il cervello non è una realtà statica: si usa infatti parlare di sistemi elastici perché in grado di adattarsi alle modifiche continue che coinvolgono l'ambiente in cui sono immersi. L'adattamento all'ambiente in termini evolutivi è certamente il principale fattore vincente di una rete neurale biologica: il sistema nervoso umano (così come in varia misura quello animale) non solo consente l'apprendimento nel corso dell'intera vita dell'individuo, ma entro certi limiti riesce anche a sopperire ad eventuali traumi fisici che vadano ad alterare con violenza la struttura di una parte dell'encefalo.

Il periodo più interessante dal punto di vista dell'elasticità del sistema è certamente individuato nella fase iniziale dello sviluppo fisico dell'individuo. La straordinaria specificità osservabile nelle aree corticali è

conseguita grazie ad una combinazione di processi genetici ed epigenetici: le cellule staminali dell'embrione generano una popolazione di cellule precursori neurali che proliferano e diventando "neuroni immaturi". Questi migrano fino alla loro destinazione e qui formano assoni e dendriti grazie ai quali potranno dare vita ai contatti sinaptici con le cellule bersaglio.

Poco prima della nascita dell'organismo, la corteccia umana ha già raggiunto un suo assetto vicino a quello definitivo dal punto di vista del numero e della posizione relativa dei neuroni; tuttavia, come è stato mostrato, la semplice esistenza dei neuroni non è da sola un buon indice delle capacità della rete neurale di processare l'informazione. La vera chiave di volta è quindi quel fenomeno detto di arborizzazione che inizia lentamente nel periodo perinatale ed aumenta bruscamente portando il numero delle sinapsi a crescere in modo esponenziale nei primi mesi di vita del bambino.

Anche in questo caso il cambiamento strutturale è attribuito a cause di tipo genetico in concorrenza con altre di natura ambientale: le seconde in particolare iniziano ad avere effetto sul sistema non appena in utero l'encefalo è raggiunto da segnali provenienti dai recettori. È difficile quantificare quali siano i rapporti in percentuale tra le sinapsi stabilite geneticamente e quelle dovute agli stimoli ambientali, ma le ricerche indicano che queste ultime non possono essere trascurabili.

Il numero di connessioni aumenta molto rapidamente per i primi nove-dodici mesi, a seconda dell'area oggetto d'esame, quindi continua a crescere a ritmo inferiore fino ai circa ventuno mesi, quando cioè il cervello raggiunge il suo apice dal punto di vista del numero di connessioni neurali attive. Una immagine chiara dell'entità di questa crescita ci è offerta dalle variazioni del peso complessivo del cervello: entro i primi nove mesi questo più che raddoppia rispetto al momento della nascita per poi

raggiungere più lentamente il 90% del suo peso definitivo entro il sesto anno di vita.

Un approfondimento meriterebbe il fatto che molti psicologi dell'infanzia vedono nei nove mesi di vita un momento di svolta comportamentale del bambino. In uno studio recente, M. Tomasello⁸ individua in questa età il momento in cui l'apprendimento umano si differenzia da quello degli scimpanzé per via di una serie di atti che ruotano intorno alla comprensione dell'esistenza del sé e degli altri come agenti intenzionali. Nello studio in particolare si fa riferimento ad una forma di attenzione condivisa che sembra emergere tra i nove ed i quindici mesi: è piuttosto semplice ipotizzare allora che queste facoltà siano precluse prima dei nove mesi a causa delle ancora limitate capacità di elaborazione del cervello, cosa che spiegherebbe anche perché nei primi mesi di vita le prestazioni di esseri umani e scimpanzé appaiano tanto simili.

Bisogna sottolineare che il numero di connessioni complessivo che un cervello umano, in particolare la sua corteccia, esprime è pressoché stabile da individuo ad individuo, ovvero, da questo punto di vista, indipendente dall'esperienza a cui è soggetto l'organismo. Per questo motivo si suppone che una parte dei collegamenti sinaptici sia di natura più o meno casuale: se un essere umano, per esempio, si trovasse più spesso di fronte a stimoli tattili durante i primi anni di vita, il suo cervello tenderebbe a privilegiare l'arborizzazione dell'area corticale dedicata al movimento dei muscoli interessati ed alla ricezione degli stimoli. Da un certo punto di vista l'organismo adulto avrebbe una sorta di specializzazione strutturale, prima che culturale, a ricevere informazioni da determinati recettori e a rispondere in modo elaborato agli stimoli a lui più familiari. Se però l'organismo preso in considerazione fosse al contrario sottoposto ad un numero poco consistente di stimoli di natura tattile, il suo cervello non

risulterebbe dotato complessivamente di meno connessioni sinaptiche poiché queste devono necessariamente formarsi entro una certa età: nel caso preso in considerazione è possibile allora che le connessioni si formino seguendo uno schema di tipo casuale.

Superata la fase di arborizzazione dei primi due anni di vita, il numero di sinapsi comincia gradualmente a diminuire. Per quello che è possibile sapere oggi sembra che vi sia un rafforzamento di quelle sinapsi effettivamente attivate dagli stimoli esterni e contemporaneamente una *caduta* delle connessioni che al contrario non sono utilizzate. Il processo, ampiamente documentato, dipenderebbe così prevalentemente dagli stimoli esogeni e dovrebbe avere l'effetto di provvedere ad accentuare il livello di specializzazione cognitiva in accordo con gli stimoli offerti dall'ambiente.

Superata anche questa fase, che dura fino ai quindici anni circa, il sistema nervoso rimane più o meno stabile per il resto della vita dell'organismo subendo solo un lento degrado in alcuni suoi settori.

Disponendo di così tanti dati sullo sviluppo del sistema nervoso e la sinaptogenesi nei primi anni di vita, appare strano che invece non ci sia accordo su quale sia l'entità o addirittura se esista una certa capacità della rete di continuare nel corso di tutta la vita dell'organismo a creare sinapsi a ritmo ridotto.

Chi sostiene l'esistenza della sinaptogenesi anche durante la fase adulta dell'organismo se ne serve soprattutto per trovare una spiegazione plausibile al fatto che anche in età avanzata la mente umana continui a mostrarsi elastica reagendo correttamente a stimoli nuovi, continuando ad apprendere. Anche la realtà sperimentale indicata dal recupero posttraumatico sembra essere una prova di sinaptogenesi in fase adulta: in seguito al danneggiamento di aree funzionali della corteccia, capita infatti che un soggetto riesca a sopperire lentamente al malfunzionamento

dell'area danneggiata, come se il tessuto cerebrale si fosse almeno parzialmente rigenerato.

Tuttavia è possibile spiegare questi stessi fenomeni senza fare ricorso alla sinaptogenesi durante la fase adulta: l'apprendimento può essere infatti giustificato da modifiche nella struttura neurale così come da cambiamenti nei valori di assegnazione delle sinapsi, come cercherò di spiegare nell'ultima sezione di questo lavoro. Allo stesso modo un'area funzionale danneggiata può essere sostituita parzialmente da modifiche minime nel funzionamento di altre aree funzionali o addirittura da strategie adottate più o meno consapevolmente dal soggetto colpito dal trauma⁹.

Ai fini del modello che qui si cerca di sviluppare il dubbio non è trascurabile: una modifica strutturale delle sinapsi comporta cambiamenti negli insiemi di disequazioni e di conseguenza nelle loro rappresentazioni grafiche. Il modello grafico dovrebbe comunque permettere una analisi esaustiva che riesca a comprendere entrambe le ipotesi in campo in modo da poter essere adattato ove evidenze sperimentali si pronunciassero definitivamente pro o contro la sinaptogenesi in fase adulta.

Seconda Parte:

Rappresentazione grafica del calcolo neurale

2.1 Dalle disequazioni alle rappresentazioni grafiche.

Gli insiemi di disequazioni presentati nella prima parte di questo lavoro, come si è visto, sono potenzialmente soggetti e diventare intrattabili quando si ha a che fare con strutture neurali complesse. Cosa anche più importante, essi non costituiscono uno strumento di semplice utilizzo per effettuare osservazioni sul funzionamento della mente, ma solo sulla struttura di una rete neurale: simboli ed operatori matematici in sé presentano i pregi e gli svantaggi dell'astrazione.

Ciononostante, la lunga esposizione degli insiemi di disequazioni non è stata fine a se stessa: come cercherò di mostrare, la rappresentazione grafica analitica di quegli stessi insiemi può divenire uno strumento interessante ed immediato per lo studio del calcolo effettuato da una rete. Da qui in avanti questo studio, profondamente avverso al dualismo cartesiano, utilizza come suo strumento principale la geometria analitica, che ironicamente deve la sua nascita proprio al filosofo francese: fu proprio lui infatti ad introdurre il concetto di piano Cartesiano, nel quale ad ogni

punto geometrico è associata una coppia ordinata di numeri reali (le coordinate cartesiane del punto) e ad ogni figura geometrica è associata una equazione algebrica.

Prendiamo per esempio una versione semplificata del primo insieme di disequazioni presentato:

$$\begin{cases} \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 < K \rightarrow \Omega = 0 \\ \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \geq K \rightarrow \Omega = 1 \end{cases}$$

Insieme 2.1

Come abbiamo visto queste due disequazioni descrivono il comportamento di un neurone raggiunto da due segnali arbitrari moltiplicati per il peso attribuito alle rispettive sinapsi di collegamento. Facendo riferimento allo stesso calcolo soglia, queste due disequazioni “elaborano” i valori attribuiti alle variabili x_1 e x_2 secondo i medesimi valori della costante K e dei pesi sinaptici. Ogni disequazione su due variabili delimita una parte di un piano per cui, in considerazione del fatto che le due qui esposte differiscono solo per i simboli di maggiore e minore, ne segue che i due piani descritti e le disequazioni stesse sono complementari.

La funzione che separa linearmente i due piani individuati dalle disequazioni è data allora dall'equazione:

$$(E 2.1) \quad \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 = K$$

questa, finché non sono fissate le costanti α_1 , α_2 e K , non è che la forma normale di un fascio generico di rette in un piano.

Il procedimento resta valido aumentando le variabili: con tre variabili avremo ovviamente un piano di separazione tra due spazi tridimensionali la cui funzione sarà descritta dalla seguente equazione:

$$(E 2.2) \quad \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 = K$$

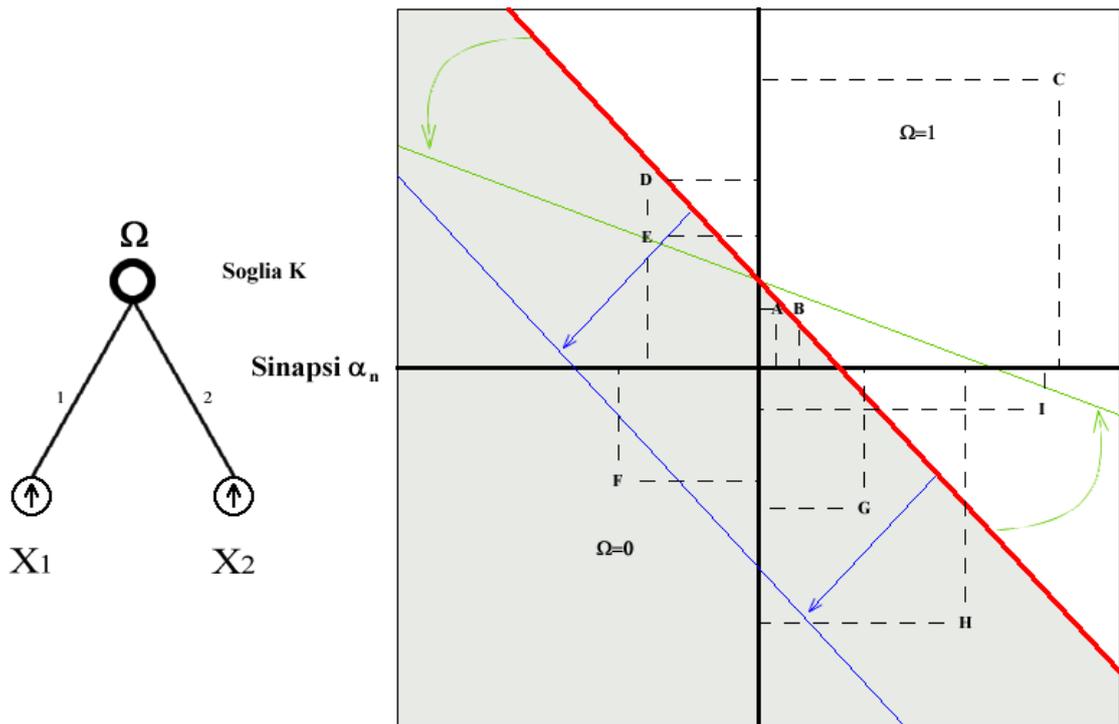
Le prime quattro reti neurali presentate nella prima parte di questo studio erano caratterizzate da un numero n di segnali di ingresso; dato che

ogni segnale di ingresso genera una dimensione, la funzione di separazione tra le due aree n -dimensionali descritte dalle disequazioni degli insiemi 1.1, 1.2 e 1.3 è una ipotetica figura n -dimensionale descritta dalla solita equazione:

$$(E\ 2.3) \quad \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \dots + \alpha_n x_n = K$$

Se nella prima parte di questo studio si potevano trattare n dimensioni semplicemente usando l'artificio dei puntini di sospensione, quando si cerca invece di dare una rappresentazione grafica non è possibile superare le tre dimensioni. Questo studio si limiterà perciò nella maggior parte dei casi a grafici sul piano, bidimensionali, per semplicità sia grafica che espositiva, anche se in modo intuibile il principio generale non risente di questo limite. Non c'è differenza tra il ruolo della retta separatrice nel piano e quello assunto da una ipotetica funzione n -dimensionale in un mondo ad n dimensioni: da un punto di vista analitico quindi le conclusioni che si raggiungeranno grazie agli studi sul piano non saranno diverse da quelle ipoteticamente ottenibili ove fosse possibile concepire uno studio grafico su n dimensioni.

Alla sinistra della rappresentazione grafica 2.1 è raffigurata l'architettura della rete soggetta ad analisi: in questo caso si intuisce facilmente come si tratti di una versione semplificata della rete modello perceptron già vista con l'immagine 1.1. Ogni coppia di valori numerici assegnati alle due variabili x_1 e x_2 individua un punto nello spazio dove x_1 rappresenta le ascisse e x_2 rappresenta le ordinate. La linea rossa, data dall'equazione (E 2.1), è definita come *frontiera decisionale* perché per ogni coppia di numeri arbitraria assegnata alle variabili, una volta che questa venga individuata in un punto sul piano, è possibile grazie alla retta "decidere" quando il punto appartenga alla parte di piano *bianca* o a quella *grigia* (nel nostro esempio). Per tornare all'analogia con il calcolo soglia



Rappresentazione Grafica 2.1

Architettura di una rete neurale modello perceptron e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dall'unico neurone di primo livello.

del neurone, una coppia di valori corrisponde ad una coppia di segnali di ingresso, generata da uno stimolo proveniente dall'esterno: se la somma di questi segnali, modificata dall'intervento dei neurotrasmettitori e neuromodulatori lungo le sinapsi, supera la soglia fissata K , allora il neurone emette un segnale. La parte di piano bianca individua quindi tutte le possibili combinazioni di segnali di ingresso grazie ai quali il neurone riesce a superare la soglia K , propagando così un impulso.

In questa prima rappresentazione grafica (2.1) sono stati inserite una serie di lettere in modo che possano simboleggiare delle generiche coppie di segnali di ingresso (i valori attribuiti alle variabili): tutto il potere di calcolo di questa rete minimale è riassumibile quindi nella capacità di dividere in due parti il proprio mondo sensibile di coppie numeriche. Essa

accoglie solo due tipi di segnali: quelli legati ad x_1 e quelli legati ad x_2 , quindi divide le coppie in chi sta *al di sopra* e chi *al di sotto* della retta.

La retta denominata come frontiera decisionale svolge un ruolo determinante: se per esempio prendessimo in considerazione la retta verde invece di quella rossa e dividessimo il piano (e quindi il mondo di coppie di segnali) in base a questa nuova frontiera, i punti B, D ed E si troverebbero a cambiare categoria di attribuzione. Conservando l'analogia con il sistema nervoso, uno spostamento della frontiera decisionale implica che un segnale precedentemente sufficiente al neurone per trasmettere un impulso (poniamo il punto D), possa divenire ora invece insufficiente: ciò che con un tipo di frontiera è inserito nella categoria *appartenente all'area bianca* potrebbe in seguito al cambiamento essere quindi incluso nell'*area grigia*. E' importante notare sin d'ora che al medesimo segnale di ingresso, causato da uno stimolo esterno, può quindi essere attribuita una categoria diversa, ovvero una sezione di piano differente, a seconda delle oscillazioni della frontiera decisionale.

Il vantaggio di lavorare su questo genere di rappresentazioni simboliche è quello di avere accesso completo e immediato a tutti i fattori concorrenti al risultato finale: non è infatti difficile determinare esattamente quali cause potrebbero comportare uno spostamento o una oscillazione della frontiera decisionale, partendo dalla sua equazione (E2.1). Questa infatti può essere posta nella seguente forma:

$$(E\ 2.1/B) \quad x_2 = (K/\alpha_2) - (\alpha_1/\alpha_2)x_1$$

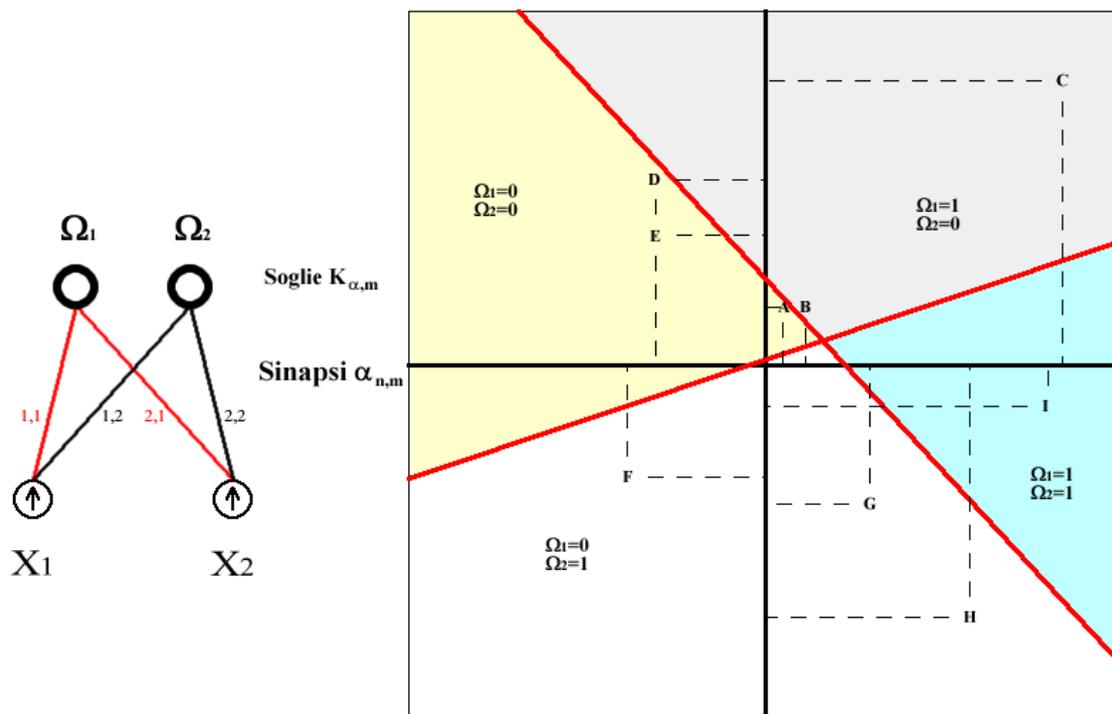
Dato che il modello di riferimento è sempre quello biologico, (K/α_2) rappresenta il rapporto tra la soglia di attivazione e l'intervento di neurotrasmettitori o neuromodulatori sulla sinapsi relativa ad x_2 . In base a questo rapporto, che individua l'intercetta della retta sull'asse delle ordinate, la frontiera decisionale può *salire* o *scendere* come rappresentato

nell'esempio dalla retta blu nella rappresentazione grafica (2.1). Il rapporto negativo tra i due pesi relativi alle sinapsi (α_1/α_2) costituisce invece il coefficiente angolare della retta di frontiera: una variazione di questo rapporto, in questo caso imputabile a modifiche di trasmissione dei segnali nelle sinapsi relative sia a x_1 che a x_2 , comporterebbe una oscillazione della frontiera decisionale come mostrato dalla retta verde nell'esempio della rappresentazione grafica (2.1). Nell'esempio i due eventi sono presi in considerazione separatamente, ma questo non è affatto necessario: come si vedrà con l'aggiungersi dei neuroni di primo livello, le rette ipoteticamente fissate come frontiere decisionali possono assumere qualsiasi inclinazione e qualsiasi intercetta sull'asse delle ordinate.

2.2 Il ruolo dei neuroni di primo livello.

Come si è visto ogni segnale di ingresso costituisce una dimensione del grafico che si vuole rappresentare; pesi sinaptici e soglia del neurone raggiunto dai segnali di ingresso sono invece determinanti nel fissare una singola frontiera decisionale nel fascio di rette generico individuato dalla equazione (E2.1).

Il passo successivo è quello di provare ad aggiungere elementi e sviluppare le potenzialità di calcolo della rete, così come già fatto nella prima parte di questo studio. Come già esposto non possono essere aggiunti elementi tra i segnali di ingresso senza dover poi essere costretti ad aumentare di conseguenza gli assi cartesiani necessari alla rappresentazione: non resta quindi che aggiungere un elemento tra i neuroni di uscita. Compiere questa operazione significa affiancare alla prima unità Ω una seconda unità di calcolo soglia che elabori contemporaneamente alla prima i medesimi segnali di ingresso senza condividere però con questa (se non per motivi casuali) la soglia di



Rappresentazione Grafica 2.2

Architettura di una rete neurale modello perceptron e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dai due neuroni di primo livello. Le due rette generate suddividono il piano in quattro aree (corrispondenti agli stati di attivazione dei neuroni Ω) evidenziate con colori diversi.

attivazione o i pesi delle sinapsi. Assegnati due valori alle variabili x_1 e x_2 , questi si propagano lungo i canali di congiunzione modificati dai pesi relativi; una volta raggiunto il neurone, i segnali saranno integrati determinando l'emissione di un impulso nel caso del superamento della soglia di attivazione.

Rispetto alla rappresentazione grafica 2.1, la 2.2 sarà allora caratterizzata da due frontiere decisionali: da un punto di vista grafico questo implica che la stessa coppia di valori, ovvero lo stesso punto individuato sul piano, sarà analizzata da due differenti punti di vista e potrà esserle attribuita una coppia di valori binari 0 e 1. Potenzialmente la rete sarà in grado di dividere il proprio mondo di segnali bidimensionali in un numero di categorie diverse variabile da due a quattro distinte categorie.

Le singole equazioni di calcolo delle frontiere sono dello stesso genere di quelle già presentate e il ruolo assunto dalle soglie e dai pesi delle sinapsi non cambia. In effetti, come era già stato mostrato nell'insieme 1.4, la nuova rete può essere paragonata a due perceptron distinti che operino contemporaneamente sugli stessi segnali: non essendoci trasmissione orizzontale dell'informazione (ovvero tra neuroni degli stessi strati) non vi è neanche alcuna possibilità di influenza reciproca.

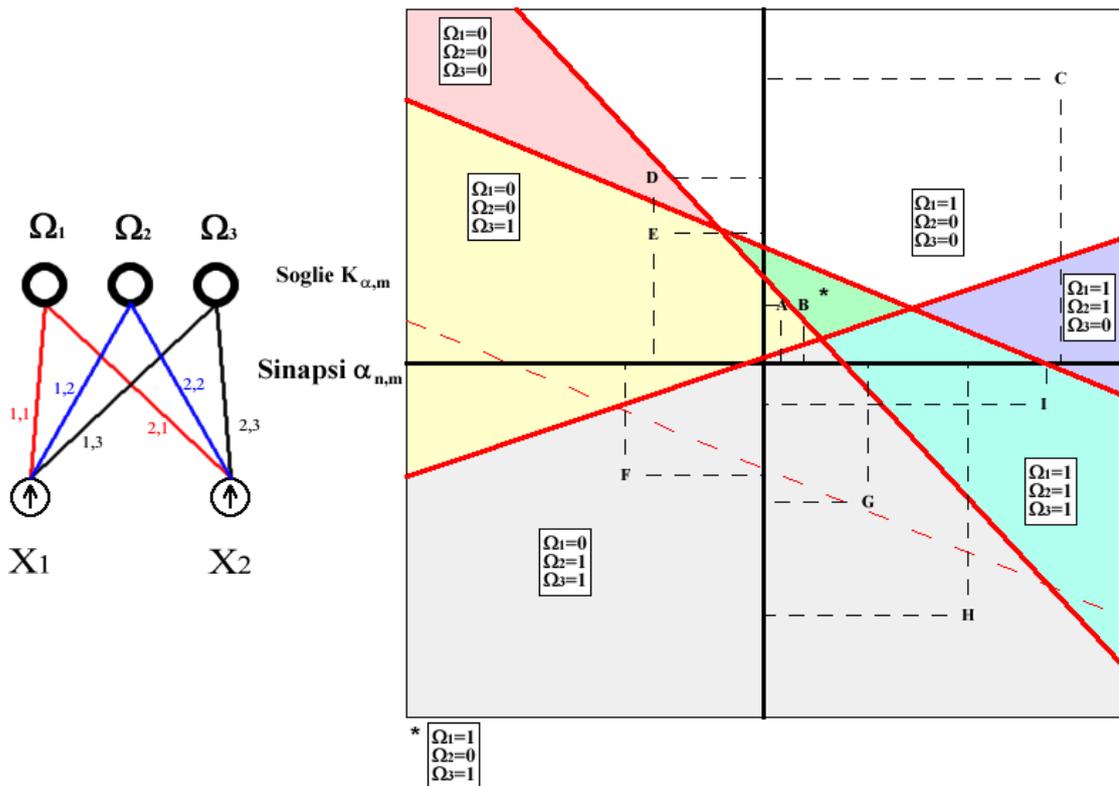
Tuttavia questa nuova rete ha delle potenzialità computazionali maggiori se paragonata alla precedente: in precedenza i nove punti individuati a titolo di esempio erano suddivisi unicamente in due gruppi o categorie. La nuova rete, come è evidente immediatamente osservando il grafico, riesce invece a distinguere non solo quale punto sia al di *sopra* o al di *sotto* della frontiera generata dal calcolo neurale di A_1 , ma anche contestualmente come questo stesso punto sia collocabile rispetto alla seconda frontiera generata dal calcolo soglia relativo ad A_2 . Se ne può dedurre la generalizzazione che, a prescindere dal numero di impulsi e quindi di dimensioni che si decide di trattare, ogni nuovo neurone di primo livello genera graficamente una nuova frontiera decisionale, aumentando le potenzialità computazionali della rete e permettendo la suddivisione dei segnali di ingresso in più categorie.

Tornando all'analogia con la rete biologica, la rete raffigurata nella rappresentazione grafica 2.2 elabora i segnali di ingresso offerti dal proprio mondo bi-dimensionale, ma può stabilire per ogni coppia di valori il comportamento tenuto questa volta da due neuroni di primo livello che quindi potranno superare la rispettiva soglia di attivazioni entrambi o singolarmente o restare inattivi (0,0), (0,1), (1,0), o (1,1): quattro possibili reazioni relative a quattro possibili categorie secondo le quali organizzare il vettore di segnali di ingresso.

La rappresentazione grafica è uno strumento intuitivo per comprendere questo genere di calcolo e ci aiuta anche a formulare delle ipotesi operative interessanti. È possibile infatti che una coincidenza dei fasci di funzioni porti a creare dei “doppioni” tra le frontiere decisionali riducendo le potenzialità di calcolo: nel caso in cui le rette frontiera coincidessero, ci sarebbe ugualmente una coppia di valori in uscita, ma il piano risulterebbe diviso in sole due aree e quindi la rete potrebbe attribuire ai suoi segnali di ingresso nuovamente solo la categoria *al di sopra* di ambo le rette o *al di sotto* di ambo le rette. Un secondo caso limite è offerto dall’ipotesi che vede le due frontiere costituite da rette parallele: mancando un punto di intersezione, il piano risulterebbe così diviso in tre parti e di conseguenza le categorie a cui la rete potrebbe ricondurre il proprio mondo sensibile sarebbero necessariamente tre; ovvero usando ancora un linguaggio informale le categorie: *al di sopra* di ambo le rette, *tra* le due rette ed *al di sotto* di ambo le rette.

I limiti computazionali espressi da una rete, ovvero la quantità di categorie sviluppate all’atto pratico, possono non coincidere quindi con il semplice calcolo combinatorio degli stati di attivazione ipoteticamente possibili per i neuroni di uscita. Non che venga a cadere la corrispondenza tra gli stati di attivazione e le categorie possibili, ma semplicemente esistono architetture neurali nelle quali non esistono vettori di segnali di ingresso in grado di determinare tutte le possibili sequenze di attivazione nei neuroni di livello successivo, come è già possibile notare a partire dalla rappresentazione grafica 2.3.

Con l’aumentare dei neuroni di primo livello aumentano le frontiere decisionali: anche in questo caso non occorre riproporre le equazioni delle frontiere decisionali e ruolo relativo di pesi e soglie, ma si può invece osservare come, nonostante non ci sia coincidenza tra nessuna delle tre



Rappresentazione Grafica 2.3

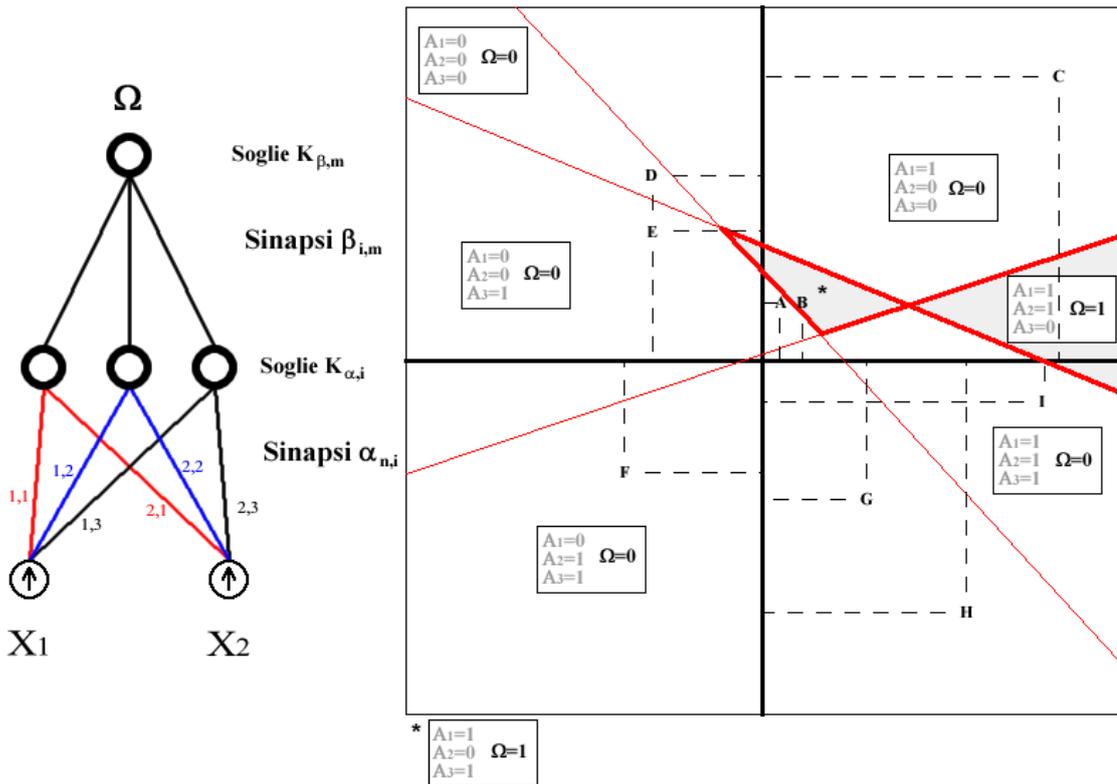
Architettura di una rete neurale modello perceptron e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dai tre neuroni di primo livello. Le rette generate suddividono il piano in sette aree, ma lo slittamento delle frontiere decisionali permette la scomparsa di quelle esistenti o la comparsa di un'ottava.

rette, il piano non sia diviso in otto parti (ovvero 2^3 ove fosse stato valido il calcolo combinatorio). Il limite computazionale sviluppato da questa rete, a condizioni fisse di soglie e pesi sinaptici, è quello di sette categorie, ovvero data una qualsiasi coppia di assegnazioni alle due variabili, le rete assocerà questo segnale ad una delle sette aree così come rappresentate graficamente.

Nell'esempio in particolare è assente un'area di piano a cui possa essere associata la stringa di valori (0,1,0) poiché le posizioni relative delle frontiere decisionali, nella configurazione ipotizzata di pesi e soglie, non consente, data una qualsiasi coppia di valori attribuiti alle variabili, che ci

possa essere una risposta di quel tipo da parte dei tre neuroni di primo livello.

Graficamente è possibile immaginare cosa accadrebbe se la frontiera decisionale sviluppata dal calcolo neurale A_3 dovesse spostarsi più “in basso” ovvero ad esempio fino ad individuare una intercetta negativa sull’asse delle ordinate (si supponga fino a coincidere con la linea rossa tratteggiata). In questo spostamento l’area colorata di verde e contrassegnata da un singolo asterisco (*) si ridurrebbe fino a scomparire: una volta che la frontiera abbia superato il punto di intersezione tra le altre due frontiere decisionali, si genererebbe l’ottava categoria corrispondente alla mancante (0,1,0). Come detto un simile movimento di una frontiera decisionale non è affatto un’eventualità remota: l’intercetta con l’asse delle ascisse nel caso del neurone A_3 è data dal rapporto $K_{\alpha,3}/\alpha_{2,3}$ (utilizzando gli stessi indici adottati nella prima parte di questo studio); di conseguenza una minore resistenza al passaggio dell’informazione lungo la sinapsi individuata ($\alpha_{2,3}$) o un abbassamento della soglia di attivazione del neurone dovuti all’intervento di sostanze chimiche (siano esse endocrine o assunte dall’esterno) comporterebbero per la rete delle differenze rilevanti. In seguito all’intervento di questi fattori chimici ad esempio, lo stimolo esterno costituito dalla coppia di valori che individuano le coordinate del punto B non sarebbe più riconosciuto come appartenente all’area *verde* del piano e qualsiasi altro stimolo non potrebbe più essere ricondotto a questa categoria e quindi essere riconosciuto come tale. Al contrario il punto G, dopo la traslazione della frontiera decisionale sviluppata dal neurone A_3 , sarebbe riconosciuto come appartenente alla categoria (0,1,0), in precedenza neppure prevista, invece che (0,1,1) e non apparterrebbe più a quell’area *grigia* alla quale era ricondotto prima dell’intervento dei supposti fattori chimici.



Rappresentazione Grafica 2.4

Architettura di una rete neurale multistrato e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dai tre neuroni di primo livello e dall'unico neurone di secondo livello. Le rette generate suddividono il piano in sette aree, ma il neurone Ω può suddividere queste aree in sole due categorie, evidenziate dalla differenza di colore.

2.3 Rappresentazione grafica di reti multistrato.

Non resta ora che mostrare la rappresentazione analitica di una rete multistrato nella quale i neuroni di primo livello siano distinti dalle unità di calcolo neurale in uscita. Nella rappresentazione grafica 2.4, per semplicità espositiva, sono state mantenute costanti le frontiere decisionali, ovvero si è supposto che soglie e pesi sinaptici siano rimasti gli stessi già descritti nelle precedenti reti: generato il segnale di ingresso costituito da una coppia ordinata di valori qualsiasi i tre neuroni di primo livello risponderanno quindi in questa rete come avrebbero fatto nella precedente struttura neurale. Il singolo neurone di uscita impone invece un cambiamento

drastico rispetto alle potenzialità di calcolo della rete rappresentate graficamente in precedenza (rappresentazione grafica 2.3): l'unica unità Ω ora presente infatti non può attribuire sette (o otto) categorie diverse alle possibili coppie di segnali di ingresso. Il neurone si comporterà come sempre, reagendo solo quando verrà superata la sua soglia di attivazione ed in quel caso emettendo un singolo impulso. Tuttavia il sostrato composto dalle tre frontiere decisionali resta decisivo: dato che i neuroni di primo livello hanno mantenuto le rispettive condizioni di attivazione, quello che cambia è il modo in cui le categorie possono essere composte. Il neurone di uscita infatti elaborerà non il segnale di ingresso, ma il segnale emesso dai neuroni di primo livello e dividerà questo suo mondo nelle proprie due categorie: volendo usare una metafora è come se il neurone Ω assegnasse un'etichetta alle categorie già sviluppate dai neuroni di ingresso.

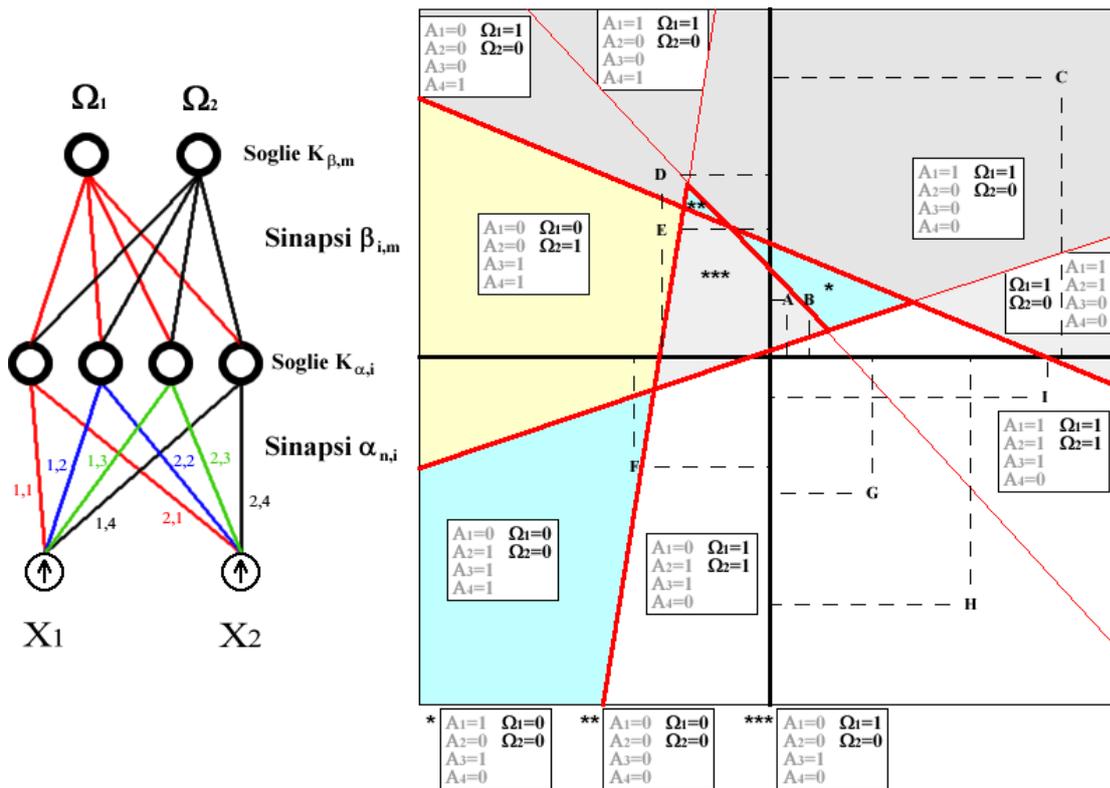
In conclusione una assegnazione di valori alle variabili di ingresso comporterà una doppia elaborazione ed una doppia assegnazione di categoria: se nella rappresentazione grafica 2.3 si prende in esame il primo livello neurale e due coppie di assegnazioni di valori alle variabili quali ad esempio i punti sul piano E e F, questi saranno interpretati dalla rete come due segnali distinti. Se, al contrario, si prende in considerazione l'unico neurone di secondo livello, quegli stessi punti saranno considerati come appartenenti ad un'unica categoria, divenendo così indistinguibili dal punto di vista della rete. In futuro distinguerò quindi le categorie individuate dalle configurazioni di attivazione relative ad uno stesso strato neurale facendo riferimento a categorie di "primo livello", di "secondo livello" e così via: in questo senso la rappresentazione grafica 2.4 individua fino ad otto categorie di primo livello e fino a due categorie di secondo livello.

Prima di procedere oltre, con grafici più complessi, occorre ricordare il parallelismo effettuato con le reti neurali biologiche: se il modello è

corretto se ne deve concludere che un identico vettore di segnali di ingresso, corrispondente ad uno stimolo esterno al sistema, può non essere riconosciuto dallo stesso individuo come tale a distanza di tempo a causa di modifiche nelle soglie di attivazione e dell'intervento dei neurotrasmettitori e neuromodulatori. Tali alterazioni possono portare anche alla creazione o alla sparizione di intere categorie, come visto nello studio della rappresentazione grafica 2.3: dal punto di vista del sistema che recepisce il segnale quindi vi è una *priorità di struttura* in base alla quale poter attribuire una categoria ad uno stimolo esterno. Allo stesso modo due segnali fisicamente simili (come il punto A ed il punto B nei grafici) possono essere considerati diversi tra loro e simili ad altri fisicamente molto distanti per via della categoria o regione n -dimensionale a cui sono ricondotti. Infine a seconda del livello della rete preso in considerazione, due segnali distinti possono essere considerati come appartenenti alla stessa categoria o come diversi, anche senza che intervengano fattori ad alterare il calcolo soglia e contestualmente ad esso le relative frontiere decisionali.

La rappresentazione grafica 2.5 propone una ulteriore evoluzione nelle reti a carattere anterogrado: un quarto neurone di primo livello ha permesso di generare la quarta frontiera decisionale, aumentando ulteriormente le categorie visibili e quelle ipotizzabili in seguito a spostamenti delle singole frontiere. Un secondo neurone di secondo livello infine consente alla rete di suddividere le categorie espresse dalle frontiere in un numero massimo di quattro aree di piano.

Questa rappresentazione grafica in particolare è stata concepita in modo da mostrare come, nonostante le molte aree in cui è stato suddiviso il piano, una singola frontiera decisionale possa essere comunque decisiva nell'attribuzione finale della categoria di appartenenza alla coppia di valori



Rappresentazione Grafica 2.5

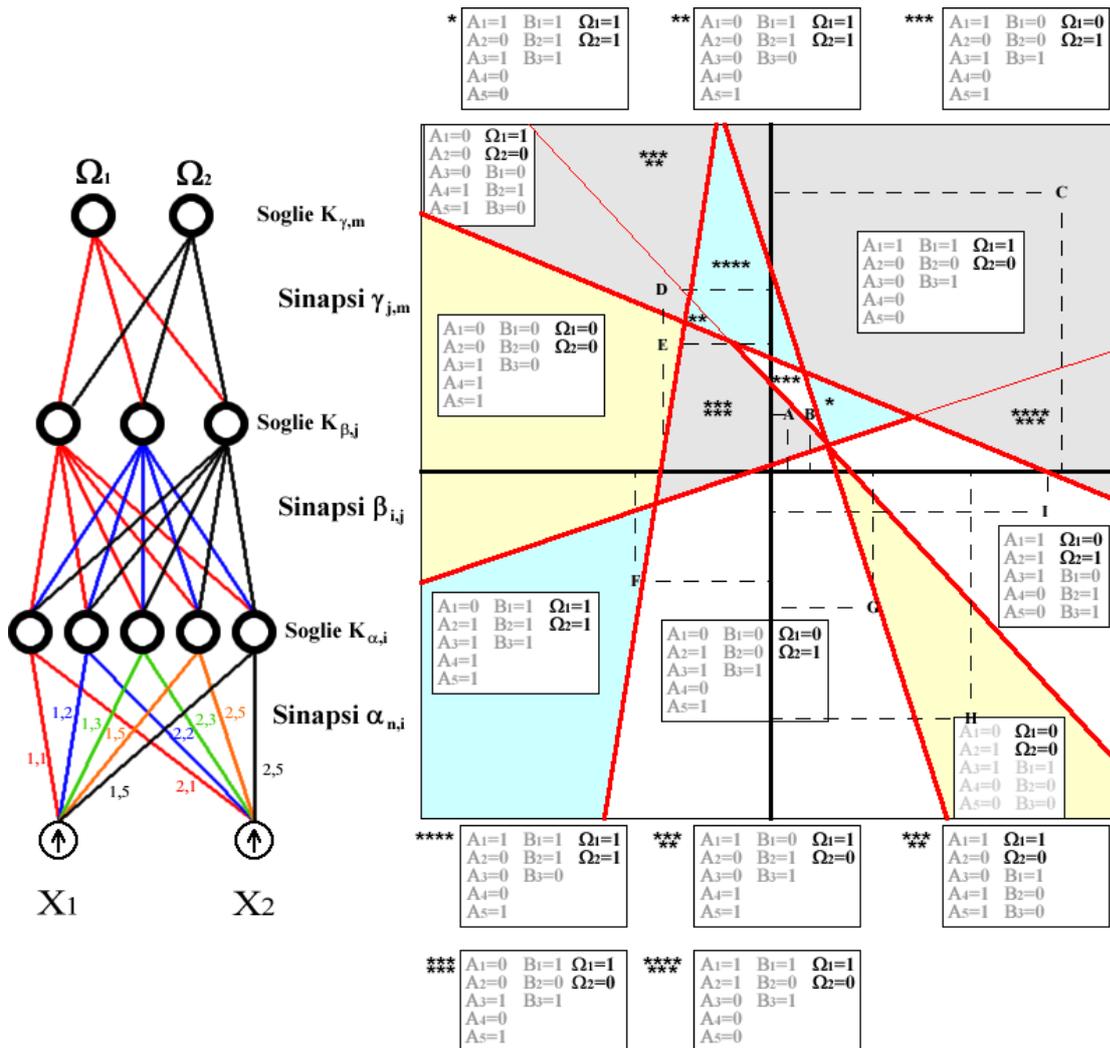
Architettura di una rete neurale multistrato e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dai quattro neuroni di primo livello e dai due neuroni di secondo livello. Le aree del piano individuate dalle frontiere decisionali, generate dai neuroni di primo livello, sono a loro volta suddivise in un massimo di quattro categorie diverse, rese qui evidenti dalla differenza di colorazione.

arbitraria assunta come segnale di ingresso (in questo caso specifico si tratta della frontiera espressa dal neurone A_3).

Le aree del piano “etichettate” con la stessa coppia di valori per i neuroni di uscita, possono anche essere contigue fino al punto da coincidere completamente (o quasi come si vede nell’esempio per via della piccola area contrassegnata con due asterischi **) con le aree individuate da una delle frontiere fissate dai neuroni di primo livello. Se infatti il numero massimo di aree in cui può essere suddiviso il piano è imputabile unicamente al calcolo svolto da questi neuroni, niente impedisce ai neuroni dei livelli successivi, come in parte già si è visto, di suddividere il piano in

modo tale da non sfruttare a pieno la ricchezza di aree eventualmente presente. A differenza però di una rete perceptron, che non ha altra alternativa se non quella di dividere linearmente lo spazio n-dimensionale che costituisce il proprio mondo di stimoli, una rete multistrato può optare per questa suddivisione, ma può anche compiere un calcolo non lineare giungendo fino ad una raffinazione del segnale di ingresso, come visto già anche nella rappresentazione grafica 2.4, che per un modello perceptron sarebbe impossibile.

Una ultima rappresentazione grafica (2.6) di questo genere di reti può servire infine per evidenziare in modo definitivo come ogni strato successivo al primo possa limitare il numero di categorie sviluppate dai neuroni di livello precedente, ma mai accrescere tale limite computazionale. Nell'esempio che segue i tre neuroni di secondo livello possono suddividere le quindici aree individuate dalle frontiere decisionali (di cui una fuori scala) in un numero di massimo otto (le 2^3 combinazioni possibili di 0 e di 1 anche a prescindere da spostamenti eventuali delle frontiere) categorie di secondo livello. Il terzo livello, però, si basa in questo esempio solo sul segnale che gli giunge dal livello precedente, per cui il suo mondo è composto da sole otto configurazioni di attivazione neurale diverse e queste possono a loro volta essere ricondotte a non più di quattro categorie di terzo livello. Se per ipotesi immaginassimo che i neuroni di secondo livello fossero riusciti a suddividere i propri segnali di ingresso in sole due categorie (ipotizziamo per esempio che i neuroni superino la soglia di attivazione tutti insieme oppure non la superi nessuno dei tre), allora i neuroni di livello successivo potrebbero a loro volta offrire come risultato solo una o al più due categorie poiché dal livello neurale che li precede giungerebbero loro solo due tipi di segnali corrispondenti alle stringhe (0,0,0) o (1,1,1).



Rappresentazione Grafica 2.6

Architettura di una rete neurale multistrato e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dai cinque neuroni di primo livello, tre neuroni di secondo livello e due di terzo. Le aree del piano individuate dalle frontiere decisionali, generate dai neuroni di primo livello, sono a loro volta suddivise in un massimo di otto categorie diverse, a queste a loro volta vengono assegnati valori corrispondenti ad un massimo di quattro categorie, sviluppate dai neuroni di uscita Ω .

Il grafico permette di effettuare un'altra osservazione: anche in questo caso infatti si è scelto di mantenere intatte le frontiere decisionali viste nella rappresentazione grafica precedente (2.5), ma aggiungendone una quinta si incrementano le possibilità della rete di compiere una distinzione più "raffinata" in categorie. Il risultato finale di questa architettura, come

nella 2.5, prevede quattro categorie individuate al solito dalle configurazioni di eccitazione dei neuroni di ultimo livello; l'area "grigia" posta al di sopra della retta individuata dal calcolo soglia del neurone A_3 , però è ora visivamente diversa da quella che era individuata dalla rete presentata nella rappresentazione grafica 2.5.

Nella 2.6 infatti, la rete dispone della nuova sezione di piano contrassegnata da quattro asterischi (****) e può attribuire a questa una configurazione di eccitazioni neurali diversa da quella attribuita all'area di piano grigia che comprende il punto C. Si può immaginare come in precedenza, per approssimazione, la rete attribuisse all'intera area l'etichetta "essere grigia", interpretando quindi in modo erroneo tutti i punti individuati sul piano in quella che nella rappresentazione grafica 2.6 diventa una "area gialla" marcata da quattro asterischi. Un procedimento identico avviene nel quarto quadrante delimitato dagli assi cartesiani: il punto H, precedentemente attribuito all'area bianca di piano, ora può essere distinto dal punto G e dal punto I perché solo con l'aggiunta di una frontiera decisionale è possibile individuare una nuova sezione di piano e solo quando vi è la possibilità materiale di effettuare una distinzione la rete può attribuire alle varie sezioni l'appartenenza ad una diversa categoria tra quelle sviluppate dall'ultimo livello neurale. Minore è il numero di aree in cui è diviso il piano, più facile è per la rete essere soggetta ad errori, anche qualora dovesse distinguere nel suo ultimo livello sempre lo stesso numero di categorie: il punto H nell'esempio in analisi verrebbe ricondotto necessariamente ad una categoria "sbagliata", rientrando nell'insieme dei segnali di ingresso fisicamente diversi, ma riconosciuti come simili dal sistema.

2.4 Variazioni in corrispondenza di alterazioni fisiche degli elementi della rete.

Le reti fin qui analizzate hanno il vantaggio di essere comprensibili anche in un senso intuitivo, ma è necessario ricordare come in natura non esistano reti biologiche anterograde strutturate nel modo esposto. Se per definizione è sempre possibile individuare i neuroni di primo livello in quelli raggiunti dai segnali provenienti dai recettori, la situazione si fa molto più confusa quando si cerca di tracciare un confine netto tra il secondo ed il terzo livello o i successivi che di norma sono connessi tra loro orizzontalmente e in generale in modo massiccio con tutti i neuroni nella propria area corticale. Come è stato esposto, durante gli stadi iniziali della crescita dell'individuo le fasi di arborizzazione vanno a costituire una rete molto complessa ed estesa in grado di propagare l'informazione secondo un percorso tutt'altro che lineare; al contrario la norma è costituita da forme particolari di circuiti che convogliano i segnali nervosi in alcune aree e li diffondono verso altre seguendo dei percorsi complessi e apparentemente ridondanti.

Passando allo studio delle reti biologiche il metodo grafico si complica di conseguenza, ma risulta ancora utile per compiere generalizzazioni. Si consideri ad esempio una rete che riceva in ingresso un vettore a due dimensioni come negli esempi precedenti e che sia costituita da due neuroni di primo livello e tre di secondo livello.

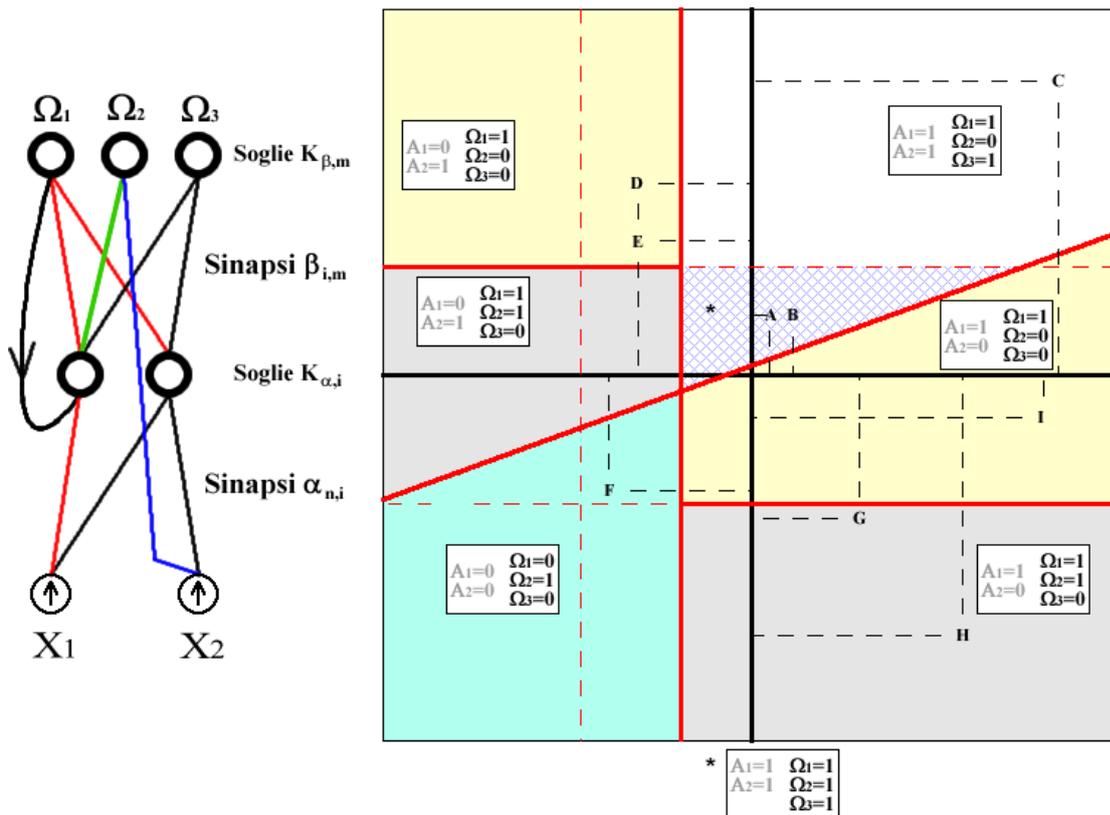
Supponiamo quindi di intervenire fisicamente sulle sinapsi di congiunzione della rete, recidendo il collegamento che porta il segnale di ingresso da x_2 ad A_1 e quello che conduce il segnale da A_2 a Ω_2 . A questo punto aggiungiamo invece due collegamenti: il primo permetterà al segnale di ingresso x_2 di propagarsi fino al neurone di uscita Ω_2 , il secondo congiungerà il neurone di uscita Ω_1 con il neurone di primo livello A_1 . E'

da sottolineare come quest'ultima sinapsi dia vita ad un piccolo circuito nella propagazione del segnale, portando lo studio oltre l'analisi delle sole reti anterograde.

Come si è visto nella prima parte del lavoro (insieme 1.7), questo genere di rete andrebbe correttamente analizzata tenendo conto della componente temporale, cosa che si adatta anche perfettamente alla reale natura delle connessioni neurali naturali, le quali, per quanto rapide, necessitano comunque di alcune frazioni di secondo per la trasmissione del segnale, in particolare nel caso di segnale di natura elettrochimica. Considerare la variabile del tempo significherebbe però aggiungere un terzo asse nelle rappresentazioni grafiche: su carta questo si concretizzerebbe in un modello isometrico piuttosto che tridimensionale e l'effetto che ne conseguirebbe sarebbe quello di perdere la chiarezza e l'immediatezza fin qui mantenuta, privando lo strumento analitico del suo vantaggio più importante.

Necessariamente quindi si deve aggirare il problema con una sovrapposizione delle rappresentazioni sullo stesso piano, prendendo in esame delle condizioni relative all'architettura descritta che siano particolarmente favorevoli.

Come negli esempi precedenti, la rappresentazione grafica 2.7 comprende anche una schematizzazione dell'architettura della rete, in questo caso di particolare interesse viste le differenze con i precedenti modelli classici. Nell'eseguire la rappresentazione grafica il primo problema che si pone riguarda come sempre quello relativo al numero ed all'entità delle frontiere decisionali: in questo caso per prima cosa bisogna osservare come la rete modificata non presenti più soli due neuroni di primo livello, ma tre, in quanto al computo va aggiunto, secondo definizione, il neurone Ω_2 poiché riceve segnali direttamente dall'esterno



Rappresentazione Grafica 2.7

Architettura di una rete neurale multistrato non anterograda e rappresentazione su assi cartesiani della computazione realizzata dai tre neuroni di primo livello e dagli strati successivi. E' interessante notare in questo caso come il circuito interno alla rete modifichi aspetto e posizione delle rette relative alle frontiere decisionali, cosa che si ripercuote ovviamente nella generazione di categorie corrispondenti alle aree individuate sul piano.

del sistema, oltre che dal neurone di primo livello A_1 . Anche in questo tipo di architettura è valida la regola che vuole una frontiera decisionale per ogni neurone di primo livello, per cui le rette di divisione del piano saranno necessariamente tre, come i neuroni che eseguono un calcolo soglia a partire dai segnali di ingresso.

La seconda osservazione importante riguarda ovviamente il comportamento tenuto da queste rette di frontiera una volta che siano state "recise" determinate sinapsi. In particolare possiamo osservare che la normale equazione di calcolo:

$$(E\ 2.1) \quad \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 = K$$

Non può più essere utilizzata se non come equazione individuante il fascio di rette espresso dal neurone di ingresso A_2 : una sua rappresentazione è offerta dalla retta rossa obliqua che attraversa il primo, secondo e terzo quadrante del piano cartesiano 2.7 appena presentato. Per quanto riguarda A_1 , dato che questo non riceve il segnale di ingresso offerto da x_2 , l'equazione del fascio di rette individuanti la frontiera decisionale dovrà essere della forma:

$$(E\ 2.4) \quad \alpha_{1,1} x_1 = K$$

Ovvero la trascrizione formale del fatto che il neurone A_1 propaga un segnale ai neuroni a cui è connesso, solo quando il segnale proveniente da x_1 , moltiplicato per lo stato della sinapsi (eccitatorio o inibitorio), è sufficiente a superare la soglia $K_{\alpha,1}$. Graficamente questo genere di rette è rappresentato con delle parallele all'asse delle ordinate: nella rappresentazione grafica 2.7 l'attivazione iniziale del neurone di primo livello A_1 sarà quindi determinata dalla retta verticale tratteggiata che attraversa secondo e terzo quadrante. L'intersezione di questa retta con l'asse delle ascisse segna infatti il valore di x_1 superato il quale lo stato di attivazione del neurone in esame cambia: nell'esempio rappresentato, una coppia di valori attribuiti alle variabili di ingresso che individui un punto nel piano collocato alla sinistra di questa retta vedrebbe A_1 spento; al contrario una coppia di valori che individui un punto nel piano alla destra della retta comporterebbe l'attivazione del neurone e la successiva propagazione del segnale.

Un ragionamento simmetrico è valido anche per il neurone di uscita Ω_2 , poiché questi in un primo tempo (intervallo temporale T_1) riceve segnali unicamente dall'esterno limitatamente al valore associato alla variabile x_2 . La retta che costituisce la frontiera decisionale è in questo caso

parallela all'asse delle ascisse ed è stata rappresentata con la retta rossa in parte continua ed in parte tratteggiata che attraversa il primo ed il secondo quadrante.

Se ci si fermasse a questo livello di analisi, la rappresentazione grafica 2.7 non presenterebbe caratteristiche degne di nota: le rotazioni delle frontiere decisionali sono infatti già state affrontate nel primo paragrafo di questa seconda sezione dello studio: fasci di rette parallele agli assi costituiscono semplicemente dei casi limite di quanto già in quell'occasione affermato. Le cose invece si complicano nel passo successivo, quando la trasmissione del segnale è già iniziata ovvero nell'intervallo di tempo denominato T_2 in occasione dell'analisi dell'insieme di disequazioni 1.7.

Una volta che il segnale ha raggiunto i neuroni di primo livello, può infatti propagarsi verso i tre neuroni di uscita: nel caso di Ω_1 ed Ω_3 si ha la normale rielaborazione delle categorie sviluppate dallo strato neurale precedente; per il neurone Ω_2 invece, l'essere raggiunto da un segnale che si aggiunge a quello di ingresso al sistema vuol dire modificare le condizioni che consentono l'attivazione del neurone stesso, ovvero un cambiamento nel proprio calcolo soglia. Da un punto di vista grafico questo implica che la frontiera decisionale dovrà in qualche modo modificarsi in base ai nuovi valori.

Studiando l'architettura della rete si nota come lo stato di attivazione di A_1 sia l'unica causa di segnali che possano intervenire modificando il calcolo soglia del neurone Ω_2 : se infatti il primo è messo in condizioni di propagare un impulso, lo stato di attivazione di Ω_2 sarà determinato dal fatto che la soglia di attivazione $K_{\beta,2}$ sia o meno superata dalla somma data dal segnale di ingresso x_2 moltiplicato per la propria sinapsi di congiunzione (come già descritto in precedenza) e il segnale derivante dal

neurone di primo livello A_1 , anche questo trasmesso e modificato dalla sinapsi relativa. Assunto che in un tempo scelto sufficientemente breve, un neurone possa inviare un impulso singolo, A_1 potrà influenzare lo stato di attivazione di Ω_2 solo comunicando o meno la propria presenza: in assenza di una eccitazione o inibizione lungo la sinapsi, Ω_2 sarebbe quindi raggiunto unicamente da un 1 o da uno 0. L'equazione relativa a questa frontiera decisionale modificata appare infine in questa forma:

$$(E 2.5) \quad \beta_{1,2}A_1 + \delta_{2,2}x_2 = K_{\beta,2}$$

dove con $\delta_{2,2}$ si vuole indicare la sinapsi di congiunzione tra il segnale di ingresso x_2 ed il secondo neurone Ω (la congiunzione di colore blu nella schematizzazione dell'architettura) e con A_1 si intende lo stato di attivazione del primo neurone di primo livello che può quindi assumere i soli valori 0 o 1. In altri termini allora l'equazione può essere espressa con un insieme:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = 0 \rightarrow \delta_{2,2}x_2 = K_{\beta,2} \\ A_1 = 1 \rightarrow \beta_{1,2} + \delta_{2,2}x_2 = K_{\beta,2} \end{array} \right.$$

Insieme 2.2

Il peso relativo alla sinapsi $\beta_{1,2}$ va considerato come una costante, di conseguenza graficamente si ottiene la rappresentazione di una retta "spezzata" in cui i due segmenti saranno paralleli all'asse delle ascisse. Supponendo che il carattere della sinapsi $\beta_{1,2}$ sia di tipo eccitatorio, quando A_1 dovesse inviare un segnale, sarà sufficiente un impulso meno intenso fornito da $\delta_{2,2}x_2$ perché si riesca ugualmente a superare la soglia di attivazione. La rappresentazione grafica quindi consisterà in una retta parallela alle ascisse che si interrompe nel punto di intersezione con la retta che costituisce la frontiera decisionale di A_1 : alla destra del punto di intersezione infatti il neurone di primo livello in questione risulterà attivo e di conseguenza le condizioni di attivazione del neurone Ω_2 saranno più

favorevoli alla trasmissione del segnale (stando all'ipotesi di $\beta_{1,2}$ a carattere eccitatorio) comportando uno slittamento verso il basso della frontiera decisionale relativa. La rappresentazione grafica 2.7 mostra infatti una retta rossa orizzontale divisa in due parti che attraversa secondo, terzo e quarto quadrante e si interrompe esattamente quando intercetta la retta verticale, frontiera decisionale di A_1 .

Come si vede il sistema è diventato dinamico: la frontiera decisionale cambia in modo drastico con il passaggio dell'informazione all'interno della rete pur senza che sia necessario una modifica dovuta all'intervento di neurotrasmettitori e neuromodulatori. Nell'esempio specifico lo slittamento della frontiera presa in esame non solo modifica le categorie di attribuzione nel modo classico già analizzato con le reti più semplici, ma comporta anche la scomparsa di una categoria (marcata con un singolo asterisco *) in un modo diverso dal solito. In questo caso il grafico rende infatti palese come venga a scomparire il punto di intersezione tra la frontiera decisionale relativa ad A_2 e quella relativa ad Ω_2 : senza le intersezioni tra le rette di frontiera il sistema perde di capacità computazionali.

Resta da esaminare un ultimo passaggio corrispondente a quello che nell'insieme di disequazioni 1.7 sarebbe stato denominato il tempo T_3 . Il segnale si è a questo punto propagato fino al secondo ed ultimo livello della rete, ma il neurone Ω_1 è connesso a sua volta con il neurone di primo livello A_2 , cosa che gli permette di trasmettere il segnale a ritroso nell'architettura della rete. Anche in questo caso si tratta di un segnale semplice che, moltiplicato per il peso relativo alla sinapsi di collegamento tra i due centri nervosi, potrà solo essere di tipo "tutto o niente".

Le conseguenze sono quindi simili a quelle già analizzate: l'aggiunta di una costante, che in questo caso supporremo inibitoria per contrasto, comporta una modifica nei valori necessari perché si attivi il neurone

bersaglio. Trattandosi di un segnale inibitorio, nel momento in cui è raggiunto dal segnale, il neurone A_1 necessiterà di un segnale più intenso proveniente dall'esterno per poter superare la propria soglia di attivazione: da un punto di vista analitico questo comporterà uno slittamento della retta rappresentante la frontiera decisionale verso destra, ovvero verso valori maggiori relativi alle ascisse (supponiamo che la frontiera originale offerta dalla retta rossa tratteggiata parallela alle ordinate si sposti in parallelo fino a raggiungere la retta rossa continua). Non deve sfuggire come questo spostamento porterà con sé delle modifiche anche relativamente alla frontiera decisionale collegata allo stato di attivazione del neurone A_1 : la retta spezzata parallela alle ascisse seguirà la traslazione della frontiera decisionale parallela alle ordinate poiché il punto di intersezione tra queste due rette mantiene il proprio ruolo cardine nel fissare il cambiamento dello stato di attivazione del neurone Ω_2 .

Supponendo infine che il neurone Ω_1 superi la propria soglia di attivazione ogni qual volta risulti attivo almeno uno dei due neuroni di primo livello A_1 o A_2 , ne conseguirà una situazione in perenne disequilibrio qualora si abbia a che fare con coppie di segnali di ingresso che individuino punti quali nella rappresentazione grafica 2.7 sono ad esempio D, E e F. Sottoposta a questi segnali, infatti, la rete vedrebbe il neurone A_1 in uno stato eccitatorio nel tempo iniziale e di conseguenza, per quanto ipotizzato, anche il neurone Ω_1 non potrebbe che propagare il proprio segnale. Questo segnale però contribuirebbe a modificare il calcolo soglia in seguito compiuto dal neurone A_1 ed i punti presi in esame non sarebbero quindi più in grado di eccitare il neurone; in particolare se ci si sofferma a studiare il grafico, si noterà che il punto F è localizzato nell'area di piano corrispondente allo stato di attivazione neurale di primo livello (0,0): in altri termini attribuendo la coppia di valori individuata dal punto F alle

variabili di ingresso, nessuno dei neuroni di primo livello A_1 e A_2 potrebbe attivarsi (si attiverebbe invece il neurone Ω_2 che in questo caso non consideriamo perché influente ai fini del calcolo soglia compiuto da Ω_1). Una volta che i due neuroni A abbiano cessato di propagare segnale, anche il neurone Ω_1 cesserebbe di inviare il proprio a ritroso e di conseguenza la frontiera decisionale relativa ad A_1 tornerebbe al suo stato originale facendo sì che i valori relativi ad F siano nuovamente sufficienti all'attivazione del neurone A_1 .

Come si vede il circuito creato segue dei cicli: lo stesso segnale di ingresso, se mantenuto costante, provocherà una concatenazione di configurazioni di attivazione dei neuroni di ambo i livelli disponibili in questa architettura, con le conseguenze ormai chiare dal punto di vista dell'attribuzione delle categorie. In precedenza si è fatto riferimento a quella che è stata definita come *priorità di struttura* in base alla quale poter attribuire una categoria ad un segnale di ingresso: per contrasto quindi in questo caso si parlerà di *priorità di segnale*. Se infatti nel primo caso si poneva l'accento sul fatto che fosse la struttura ad offrire i parametri in base ai quali poter effettuare il calcolo neurale, in questo caso si deve constatare come anche la struttura sia soggetta a modifiche in base agli stimoli derivanti dall'esterno del sistema: non c'è in realtà un contrasto tra questi due fenomeni propri del calcolo neurale, al contrario essi si integrano e concorrono al risultato finale attribuendo ad un segnale di ingresso vettoriale n -dimensionale offerto al sistema dall'ambiente una sezione specifica dello spazio ad n dimensioni.

2.5 Visione d'insieme.

Fin qui si è cercato di definire uno strumento di analisi del calcolo neurale: come si vedrà nella terza ed ultima parte di questo lavoro, il procedimento

analitico, compiute alcune generalizzazioni, sarà utilizzato per cercare di delineare un modello interpretativo dei processi cognitivi. Prima di compiere questo passo, conviene però che non vada persa la visione d'insieme del lavoro fin qui svolto.

Nel momento in cui si passa all'analisi di reti neurali biologiche, composte dalla enorme quantità di neuroni e sinapsi a cui si è accennato, è richiesta una certa astrazione perché non è più possibile visualizzare esattamente l'architettura della rete neurale e quindi individuare in modo puntuale quale frontiera corrisponda a quale neurone di primo livello. Allo stesso modo, eventuali alterazioni nel comportamento delle frontiere o nell'attribuzione delle categorie non potranno essere ricondotte ad un particolare circuito così come invece è avvenuto nell'ultima rappresentazione grafica. Infine è importante sottolineare ancora una volta come un'architettura complessa non consenta di individuare livelli successivi e di conseguenza renda difficoltoso l'utilizzo del concetto di categoria di livello, così come esposto fin qui: già considerando ad esempio la piccola architettura neurale schematizzata nella rappresentazione grafica 2.7, si nota come non sia facile stabilire in un circuito, anche se ridotto, quale livello sia da porre temporalmente come precedente.

Ciononostante l'impianto generale resta utile: una rete neurale biologica estremamente complessa si baserà comunque su quelle regole di fondo individuate in questa sezione del lavoro.

Riportiamo allora l'attenzione sulle regole principali:

- 1) La dimensione del vettore che costituisce il segnale di ingresso è data dal numero di recettori dedicati a ricevere segnali dall'ambiente.
- 2) Ogni centro che compia un calcolo soglia sui segnali derivanti dall'esterno del sistema individua una frontiera decisionale.

- 3) Le potenzialità di calcolo sviluppate dalla rete tendono al limite offerto dal calcolo combinatorio relativo agli stati di attivazione dei neuroni di primo livello.
- 4) Ogni configurazione di stati di attivazione corrisponde ad una categoria, per cui nel momento stesso in cui si presenta un vettore di assegnazione di variabili di ingresso, la rete neurale riconduce ad almeno una categoria lo stimolo a cui è sottoposta.
- 5) Uno stesso vettore può essere ricondotto in tempi diversi a categorie diverse per l'intervento di neurotrasmettitori o neuromodulatori che intervengano sulla sinapsi o sulla soglia di attivazione del neurone.
- 6) I neuroni di livello successivo al primo rielaborano le categorie sviluppate dai neuroni di primo livello in modo semi-autonomo potendo ricondurre alla stessa categoria stimoli in precedenza visti come diversi, ma senza la possibilità di separare quei segnali elaborati come appartenenti alla stessa categoria.
- 7) L'eliminazione di sinapsi comporta una minore elasticità del sistema ed in linea di massima una riduzione delle categorie computabili. Al contrario l'aggiunta di sinapsi può comportare un arricchimento della capacità di calcolo della rete.
- 8) Reti non anterograde, costituite da circuiti, possono aggiungere alla priorità di struttura una priorità di segnale in modo tale che alcuni stimoli comportino una trasformazione nelle frontiere decisionali.

Terza Parte:

Mente integra

3.1 Mente o cervello computazionale: due paradigmi a confronto.

Nelle prime due sezioni di questo studio si intendeva delineare un nuovo strumento di analisi, all'interno di un quadro e di una concezione della mente necessariamente embrionale che può essere ricondotta alla più ampia rosa dei paradigmi materialisti. In quest'ottica, nelle pagine successive sarà affrontata in particolare l'analisi della percezione, confrontando quando possibile il modello classico connessionista con quello che emerge dall'uso dello strumento matematico delineato. Si spera così che il secondo possa risultare più aderente alla base biologica di riferimento, sia essa propria di un sistema nervoso centrale o distribuito, riuscendo comunque a sfruttare i punti di forza del paradigma classico, evitandone alcune debolezze.

Il primo problema che si pone in questo genere di studi è quello relativo al linguaggio, ovvero al significato che si intende attribuire a determinate parole chiave. La situazione attuale nell'ambito della filosofia della mente sembra, però, essere stata concepita da Lakatos come prova per le proprie teorie sulla coesistenza di paradigmi scientifici contrapposti:

anche restringendo quindi il campo di ricerca, come in questo caso, a percezione e processi cognitivi ad essa collegati, non solo è necessario fissare un unico significato per il termine stesso di “percezione”, ma si dovrà distinguere cosa costituisca il campo di azione in cui possano agire i sensi (ovvero cosa sia la realtà, ammesso che esista, con cui un organismo è in relazione), quanto sia importante in questo rapporto tra organismo e reale l’intervento eventuale del linguaggio, dei fenomeni di selezione delle informazioni e se questi siano o meno influenzati da una volontà (a sua volta cosciente o meno). Non si può inoltre non prendere in considerazione se e quanto siano necessari lo sviluppo di modelli mentali spaziali o di altro genere ed infine quale ruolo svolgano apprendimento e memoria e di conseguenza quale sia il senso da attribuire a competenza, riconoscimento e categorizzazione.

Ognuno di questi termini può essere utilizzato in accezioni diverse che ne modificano la priorità all’interno di un quadro più generale, a sua volta determinante nell’attribuire riferimento e contesto ad altri termini fortemente evocativi quali: immaginazione, intelligenza e creatività (per non menzionare sensazioni, sentimenti, emozioni o fenomeni sociali quali comunicazione e assunzione di ruoli). Questi infatti richiamano significati diversi anche a causa del loro utilizzo corrente effettuato in contesti vaghi o ambigui e per questo sfuggono facilmente ad una definizione rigida.

Tuttavia non è affatto necessario ricorrere a termini di uso comune per mostrare le difficoltà che si affrontano nell’indirizzare un’analisi su di un processo cognitivo. Un caso esemplare e significativo ai fini di questo studio è rappresentato dal termine “computazionale” in riferimento al modo in cui la mente o il sistema nervoso elaborano le informazioni che raggiungono l’organismo.

La teoria computazionale della mente è alla base del paradigma funzionalista fondato da Putnam e oggi portato avanti, tra gli altri, da Fodor che ne è uno dei suoi più accesi sostenitori: in questo approccio l'idea di stato funzionale è concepita in modo analogo agli stati descrivibili da una macchina di Turing. Questo è un dispositivo astratto, ovvero concepito in modo indipendente da eventuali vincoli fisici, ideato dal logico inglese Turing negli anni trenta: la sua funzione è quella di applicare rigidamente un determinato insieme finito di istruzioni nella risoluzione di un problema dato e così replicare una procedura che valga da equivalente formale di un algoritmo.

Una Macchina di Turing si avvale di una tavola, ovvero l'insieme delle sue istruzioni, per poter elaborare dei dati iniziali che le vengono forniti tramite nastro, di capacità potenzialmente illimitata. Lo stato iniziale della macchina, determinato quindi dai dati di ingresso, input, è costituito da un insieme di simboli che vengono trasformati in base alle istruzioni contenute nella tavola fino a raggiungere uno stato finale desiderato in cui la macchina si "ferma", producendo un output simbolico su nastro.

Ognuno di questi dispositivi è concepito per seguire un unico schema di istruzioni e quindi per replicare un solo algoritmo di calcolo, tuttavia sugli stessi presupposti è possibile costruire la cosiddetta macchina di Turing universale. Questa è in grado di simulare il comportamento di ogni altra macchina di Turing, leggendo su nastro le relative tavole simboliche di trasformazione opportunamente rappresentate come segnali di input. Data la tesi di Church, secondo cui ogni funzione calcolabile mediante algoritmo è replicabile in una macchina di Turing, ne segue che la sua versione universale è in grado di replicare qualsiasi algoritmo di calcolo. Vista con lo sguardo odierno la macchina di Turing universale è un dispositivo programmabile che consente l'implementazione di un software

che ne cambia le istruzioni in base alle quali i simboli di input possono essere trasformati (o meglio computati): si tratta infatti della progenitrice dei moderni computer e dei programmi software, quali gli attuali sistemi operativi, concepiti per sfruttare dei supporti fisici (come un microprocessore ed una memoria hard drive al posto del nastro) in modo da consentire l'utilizzo di altri programmi.

Il passaggio all'astrazione successiva, che vede una mente umana paragonata ad uno di questi dispositivi, deve la sua fortuna ad una ipotesi che, già a partire dagli anni venti grazie a Wittgenstein, si andava sempre più diffondendo in ambito logico, ovvero che fosse possibile applicare le regole di composizione degli enunciati, così come formalizzate nell'ambito dell'allora nascente logica matematica, anche ai linguaggi naturali. Se quindi la mente umana è basata su regole di composizione di tipo linguistico-cognitive ed in ultima analisi sulla computazione di segni (o meglio, come si vedrà tra poco, di stati mentali), allora il suo modo di operare non è diverso da quello descritto per le macchine di Turing universali.

Le conclusioni che se ne traggono sono drastiche: come per i dispositivi ipotizzati da Turing, il supporto fisico che ne permette l'implementazione diventa inutile ed è ipotizzabile riuscire a costruire una macchina pensante in grado anche di ingannare un osservatore umano in un "gioco di imitazione" fino a far credere di avere a che fare con un altro essere umano (il cosiddetto "Test di Turing" da un articolo del suo ideatore nel 1950).

In questo modo nasce quindi la teoria funzionalista della mente che si pone in contrapposizione ai due paradigmi allora dominanti rappresentati dal comportamentismo (o behaviorismo) e dalla teoria materialista dell'identità. Dando un quadro per grandi linee, rispetto al

comportamentismo la teoria funzionalista condivideva l'approccio di studio basato sulla negazione dell'importanza del sostrato biologico nello studio della mente; tuttavia il comportamentismo negava anche l'esistenza degli stati mentali, incontrando così grandi difficoltà nel tentativo di spiegare in particolare due fenomeni legati al comportamento: per prima cosa, senza l'intervento di un qualche fattore interiore, non si riusciva a comprendere come fosse possibile che una componente emozionale riuscisse a modificare le prestazioni osservate in laboratorio; in secondo luogo non si riusciva a dare una spiegazione convincente della caratteristica non solo umana di poter fingere un comportamento¹.

Nel periodo successivo alla seconda guerra mondiale, la proposta funzionalista si presentò quindi per risolvere queste incongruenze ipotizzando l'esistenza di stati mentali, visti però unicamente sulla base delle loro relazioni funzionali e delle relazioni con gli input sensoriali. Il comportamento esibito dall'organismo è allora inteso come l'output del sistema: il processo di elaborazione degli stati mentali, in luogo degli enunciati per la logica formale, diventa il vero oggetto di studio della filosofia teoretica confermando in quest'ottica l'idea che il supporto fisico sia irrilevante.

Rispetto al materialismo invece il funzionalismo si poneva in una prospettiva considerata meno antropocentrica: l'identificazione di uno stato mentale con una specifica configurazione di attivazioni neurali poteva infatti lasciare intendere che solo gli esseri umani fossero interessati da questi fenomeni. L'emergere dell'intelligenza artificiale, da principio basata sulle macchine di Turing, ma poi sviluppatasi velocemente restando concorde con l'approccio funzionalista, stava invece ottenendo risultati molto interessanti nella soluzione di problemi pur non usufruendo di una base materiale che simulasse il sostrato biologico neurale naturale. In

aperto contrasto con gli assunti cardine del materialismo dell'identità, Putnam è arrivato ad affermare che in linea di principio sarebbe stato possibile implementare una mente con del formaggio svizzero, se si fosse trovato il modo di implementare su questo un software adeguato.

Potrebbe sorprendere, alla luce di questa breve ricostruzione del paradigma computazionale funzionalista, il fatto di trovare il termine "computazionale" legato a quello di cervello quando si entra in contatto con gli odierni oppositori del paradigma funzionalista, ovvero con i fondatori della teoria connessionista (siano essi eliminativisti o materialisti classici); eppure uno dei testi più completi che espongano questo modello in rapporto alla filosofia teoretica ha come titolo "Il cervello Computazionale"². Si vede in realtà come il termine sia qui usato in accezione completamente diversa: l'essere computabile è attribuito non già alla mente, ma direttamente al sistema nervoso e questa differenza incarna perfettamente lo spostamento dell'attenzione rispetto al modello funzionalista. L'analisi deve infatti in questo caso partire dallo studio del funzionamento delle reti neurali e solo in un secondo tempo cercare di comprendere come queste strutture consentano il presentarsi dei processi cognitivi.

Non è solo una questione formale di studio del supporto fisico: ci sono una serie di processi che un sistema in parallelo come una rete neurale non può computare e quindi non c'è modo di poterli implementare su questo genere di struttura. L'esempio classico in questo caso è quello che vede la velocità di trasmissione degli impulsi all'interno della rete. Il dispositivo evolutosi come sistema nervoso centrale non può superare i cento passi al secondo, ovvero non è possibile che in un secondo uno stimolo che permetta l'insorgere nel sistema di una serie di impulsi nervosi si propaghi raggiungendo una "profondità" che superi le cento unità. Questo implica

che è necessario tenere conto di tempi tecnici: in un tempo dato le capacità di elaborazione di una rete neurale biologica sono limitate e notevolmente inferiori alle potenzialità di processamento del sistema appena qualche istante dopo. Non si afferma quindi che sia impossibile sviluppare una mente anche su tipi di strutture diverse da quelle neurali, “hardware” differenti per usare l’analogia cognitivista, ma un simile sviluppo non fornirebbe informazioni di alcun tipo sulla mente umana così come su qualsiasi processo cognitivo legato ad un organismo vivente. Ciò che si intende far rilevare quindi, è come sia possibile immaginare che il cervello elabori simboli, ma è necessario verificare materialmente come questo possa avvenire; in alternativa è il caso di accettare l’assunto come un articolo di fede, cosa che renderebbe il paradigma funzionalista analogo a quello che presuppone l’intervento divino dell’anima nello sviluppo della mente.

Anche l’ottica materialista basata sul connessionismo non è tuttavia esente da problemi concettuali e pratici: lo studio diretto della struttura neurale naturale, in particolare quando analizzato come sistema dinamico complesso, è limitato fortemente dalle dimensioni numeriche che la caratterizzano, di portata talmente vasta da risultare solitamente intrattabili. Classicamente la volontà di riduzione dell’approccio connessionista si arrende di fronte alla complessità del biologico rispondendo con lo sviluppo di esperimenti in ambiente controllato: buona parte degli studi pratici sono quindi condotti su simulazioni, analizzando reti neurali artificiali e lasciando intendere che queste possano consentire lo sviluppo di un modello attendibile che rappresenti correttamente il funzionamento delle reti neurali biologiche, nonostante le differenze non trascurabili di cui si è consapevoli.

In effetti questo è decisamente il punto più debole del paradigma connessionista, la base su cui si concentrano buona parte degli attacchi di funzionalisti e buona parte dei cognitivisti: ciò che viene chiesto con insistenza è quanto sia vasto il margine che separa il comportamento che è possibile verificare su di una rete neurale artificiale e quello che è solo possibile immaginare a riguardo delle elaborazioni permesse dalle strutture naturali. L'utilizzo delle reti neurali artificiali pone quindi serie domande sulla plausibilità dei risultati ottenuti, ma ha il vantaggio chiaro di porsi come obiettivo quello di condurre gli studi a partire dalle strutture.

Inoltre, nonostante i successi avuti in questo campo, soprattutto nell'ambito di riconoscimento, categorizzazione, rappresentazione e apprendimento, una serie di altri fenomeni, prima fra tutti la coscienza, appaiono talmente complessi da sembrare epistemicamente irriducibili al funzionamento elementare di una serie di neuroni che di per sé possono unicamente computare segnali chimici ed elettrici semplici.

In questo senso si spiegano l'affermarsi in campo connessionista delle tesi legate all'eliminativismo che tendono a tagliare il nodo gordiano negando l'esistenza stessa di coscienza e stati mentali, definiti come un prodotto indesiderabile. Sbarazzandoci di queste errate concezioni della mente, dovute in buona parte alla percezione del sé, si è sostenuto, sarà possibile raggiungere finalmente un approccio naturalista creando così un legame inscindibile tra filosofia della mente e neuroscienze.

Quindi da una parte i funzionalisti negano il fatto che, anche se si costruisse un automa dotato di una mente artificiale intelligente, basandolo su software che compia elaborazioni sintattiche su simboli, questo non proverebbe affatto che il cervello umano (e un sistema nervoso biologico in generale) funzioni seguendo le regole di questo automa. Allo stesso modo è del tutto aleatoria l'astrazione secondo la quale, partendo da una macchina

di Turing che computa segni elaborandoli, si possa affermare che questo sia l'unico sistema di elaborazione possibile o "l'unico di cui valga la pena parlare" (secondo le parole di Fodor).

Sul versante opposto, invece le difficoltà materiali hanno portato in alcuni casi alla negazione di fenomeni che però sembrano essere funzionali alla spiegazione di comportamenti osservabili, come in parte già sostenuto per quanto riguarda il comportamentismo classico.

3.2 Materialismo e abbandono.

Questo studio si pone apertamente nell'ottica della ricerca materialista, nel tentativo di rendere possibile la distinzione tra fenomeni psicologici coerenti con l'architettura neurale naturale da quelli fisicamente impossibili. D'altra parte è necessario trarre le conseguenze dall'assunto che i processi cognitivi in natura siano implementati di fatto da una struttura nervosa centrale o distribuita (a seconda degli organismi in esame) e che quindi tutti i processi cognitivi debbano trovare in essa origine, senza che sia necessario compiere una selezione eliminativista.

Sembra poco giustificabile quell'atteggiamento che vorrebbe limitare gli ambiti di studio ai soli in cui le simulazioni su reti artificiali stanno ottenendo eccellenti risultati: nella pratica l'approccio eliminativista non fa che classificare come illusori quei processi cognitivi per i quali non si è riusciti ad ammettere un modello trattabile di analisi. Sembra una comoda scorciatoia: parafrasando Sartre si potrebbe invece sostenere come l'eliminazione dell'anima dallo studio della mente sia nei fatti estremamente scomoda e non possa essere liquidata in modo sommario. Quando si decide di farlo, "bisogna accettarne le conseguenze fino in fondo".

Privare l'uomo dell'anima non rappresenta un concetto nuovo nella filosofia teoretica, tuttavia in questo caso non si tratta di ingabbiare il comportamento umano in un rigido determinismo di stampo hobbesiano o in un associazionismo che leghi in modo immutabile catene di stimolo-risposta per ogni organismo. Questa privazione infatti vuole tenere conto della ricchezza degli organismi: sistemi evolutisi in senso darwinista, con ridondanze, approssimazioni, costruzioni ed architetture non necessariamente "razionali", ma eccezionalmente efficaci. Si tratta di sistemi basati su reti neurali che, con l'aumentare della complessità, consentono l'emergenza di processi creativi, emozioni, linguaggio, coscienza del sé e degli altri. Abbandonare il concetto di anima, o di mente come entità lontana e astratta in una prospettiva atea, significa quindi conservare la ricchezza dei processi cognitivi, ma allontanarsi dalla metafora dell'"homunculus" che risiede nella nostra testa e guida le azioni del corpo con coerenza e costanza nel tempo, una metafora generata dall'idea che non si è il proprio corpo, ma il suo proprietario.

Come dimostrano gli studi di Damasio sulle emozioni, l'"errore" di Cartesio va ricercato alla base del suo impianto teorico, proprio in quell'"io" pensante immaginato come separato dal corpo e conseguentemente come incorruttibile, monolitico nella sua indivisibilità e costanza nel tempo. Ancora oggi la percezione che si ha di se stessi non è molto distante: si ammette la possibilità di perdere una parte del proprio corpo, come un arto, o di perdere la capacità di recepire il mondo attraverso uno dei sensi (divenendo ad esempio ciechi), ma non è concepibile l'idea di perdere una parte della propria coscienza in modo definitivo fino al punto di divenire a tutti gli effetti "qualcun altro", con emozioni e sentimenti o una vita sociale completamente diversi. Anche nel caso di una malattia degenerativa del sistema nervoso centrale o in seguito a lesioni fisiche, la

sensazione che ne hanno gli osservatori comuni è quella che da qualche parte sia nascosta, intrappolata, la coscienza originaria della persona malata che un tempo si conosceva (si conosce un ente immaginario quindi, non la persona fisica): la stessa idea della cura è quella della liberazione, del “ritorno” in sé dopo un temporaneo allontanamento dello stesso “sé” dal corpo che lo ospita. Una coerenza interna appare indispensabile: in riferimento a noi stessi ci vediamo come fossimo sempre la medesima entità, prima ancora che persona. Dal momento che il corpo nel suo aspetto fisico muta nel tempo, si sente la necessità di ancorarsi all’idea di una essenza che possa al contrario restare costante e per questo non possa essere riducibile a ciò che è organico.

Le cose sembrano invece essere assai più prosaiche: gli esseri umani (così come gli animali) possono perdere tanto l’uso di un arto, quanto parti della propria coscienza, subire alterazioni nei modi di percepire il mondo attraverso i sensi o nel modo in cui ciò che è percepito viene riorganizzato. L’immaginazione, il sentire e provare emozioni, ogni processo cognitivo è lontano dall’essere cristallizzato nel tempo e può essere modificato temporaneamente, ad esempio dall’intervento di sostanze chimiche o permanentemente da lesioni di vario genere. Lo stesso modo di pensare se stessi è modificato a monte da cambiamenti strutturali nel sistema nervoso centrale. Se sulla separazione della “res cogitans”, come supposta dai funzionalisti, non è forse possibile ricorrere ad argomenti definitivi, ben poco invece può essere detto in contrasto a quella che nei fatti è una palese tendenza della mente a modificarsi nel tempo, con i vantaggi e gli svantaggi del caso e a modificare “parti del sé” in corrispondenza di lesioni al tessuto nervoso.

Una prospettiva materialista dovrebbe non solo evitare queste illusioni, ma riuscire a rendere conto di come si siano generate e del perché

la mente sia nei fatti soggetta a tali cambiamenti. Il mutare della prospettiva, conduce quindi ad accettare di ridurre ogni processo cognitivo all'analisi neurale, estendendo l'utilizzo degli strumenti validi per l'esplorazione dei processi più semplici (o apparentemente tali), come la percezione e la rappresentazione dell'ambiente, a fenomeni eccezionalmente complessi che oggi si è tentati di eliminare, negandoli.

Questo testo cerca di affrontare direttamente il problema, delineando l'uso dello strumento matematico della rappresentazione grafica come una possibile chiave nella formulazione di un modello di analisi della mente; non si può però sfuggire ad alcuni problemi innescati dal linguaggio, come già si è visto per quanto riguarda la computabilità, per cui anche qui si parlerà se non di anima, di mente, una mente integrata nel corpo e in questo senso integra, completa (e per questo incoerente nel tempo).

3.3 Percezioni, categorie e memoria.

Nelle pagine che seguono si utilizzerà il termine “sistema” per indicare l'organismo ipotetico soggetto di esame: si preferisce utilizzare questo termine generico in modo da distinguere l'organismo nel suo complesso dal solo sistema nervoso centrale o distribuito. Questi ultimi infatti conviene che siano considerati parte integrante dell'organismo che ne permette l'esistenza: Damasio³ ha mostrato in modo convincente come sentimenti ed emozioni dipendano in larga parte dallo stato fisico di benessere o malessere del corpo, influenzando così le stesse capacità computazionali del sistema nervoso.

Ogni sistema va concepito come costantemente immerso in un ambiente e tra questi due enti vi sono continui rapporti fisici di interazione: con il termine “stimolo”, coerentemente con l'uso che è stato fatto del vocabolo nelle prime due sezioni di questo lavoro, si indicherà quella parte

di ambiente che, interagendo con il sistema in esame, può o meno essere percepita. Un suono con frequenza molto elevata costituisce in questo senso uno stimolo che potrebbe non essere recepito da tutti i sistemi; come è noto infatti un essere umano non recepisce alcuni ultrasuoni invece udibili per un pipistrello: si può dire che il “sistema” pipistrello si è evoluto in modo tale che i propri recettori siano in grado di rilevare nell’ambiente stimolazioni che per altri organismi semplicemente sono “invisibili”.

Con l’espressione “segnale di ingresso” si indicherà infine una alterazione della configurazione elettrica o chimica nei recettori di un singolo sistema in esame, generata da uno stimolo adeguato. Solitamente nell’uomo i recettori sono raggruppati in cinque categorie, corrispondenti ai sensi classici (vista, udito, olfatto, gusto e tatto), più avanti si vedrà come convenga tenere conto almeno di un ulteriore fattore sensibile detto senso enterocettivo⁴.

Per ognuno dei sensi, così come comunemente sono intesi, è possibile immaginare vari esempi di condizioni stimolatorie che non siano in grado di generare un segnale di ingresso nel sistema e che quindi non saranno tenute in considerazione dall’organismo che ne è stato interessato. Dal punto di vista evolutivo è evidente che un organismo che non riesca a cogliere dall’ambiente informazioni che potrebbero essergli utili è alla lunga destinato ad estinguersi se posto in competizione con una variante invece in grado di sfruttare tali informazioni. In apparenza potrebbe sembrare che quindi la soluzione migliore sia quella di essere messi in grado di trasformare qualsiasi stimolo in segnale di ingresso per poi poter “decidere” quali di questi siano o meno importanti nel conseguire uno scopo. In pratica, però le cose stanno diversamente: se infatti è relativamente semplice immaginare cosa accada quando si è privati di una componente sensoriale e non si riescano più a computare certe

informazioni perché il sistema non è raggiunto da una determinata gamma di segnali, invece molto più complesso è cercare di comprendere come mai un sistema che acquisisca improvvisamente la possibilità di computare dei segnali aggiuntivi (senza perdere ciò che possedeva di consolidato) abbia comunque delle grandi difficoltà anche nella rappresentazione di situazioni familiari che normalmente non avrebbe faticato a riconoscere. Un eccesso informativo richiede una maggior quantità di risorse nell'elaborazione e anche qualora queste risorse fossero naturalmente presenti, non è detto che si riesca a sfruttare la nuova percezione in modo adeguato: è questo il caso ad esempio descritto da Sacks⁵ a riguardo di un suo paziente che in età adulta era riuscito, in seguito ad un intervento, a riacquisire parzialmente il senso della vista. Oltre al concetto della profondità, il riconoscimento dei colori, la comprensione delle rappresentazioni in immagini statiche o in movimento (come ad esempio quadri o immagini televisive), il paziente aveva difficoltà enormi nel collegare i segnali provenienti dal senso del tatto, che in precedenza aveva sviluppato più della norma, con quelli per lui nuovi che lo "raggiungevano" dagli occhi; come risultato paradossale il paziente aveva perso di autonomia e non riusciva più a svolgere quei compiti che in precedenza aveva imparato ad affrontare in assenza della vista.

Elaborare un modello della percezione non è semplice: questo deve tenere infatti conto della abilità dei sistemi di rispondere a stimoli mai perfettamente identici e costantemente soggetti al cosiddetto rumore di fondo: il riconoscimento dei volti è spesso usato come esempio in questo caso anche perché permette di esporre i brillanti risultati ottenuti con la rete neurale artificiale "Face Net", sviluppata da G. Cottrell. Un volto umano in effetti non si presenta mai allo stesso modo: oltre che cambiare lentamente nel corso del tempo, vi sono modifiche ben più frequenti dovute a luci ed

ombre, contrazioni di muscoli e conseguenti espressioni facciali e molte altre variabili facilmente ipotizzabili. Tuttavia siamo solitamente in grado di distinguere un volto maschile da uno femminile o volto sorridente anche quando una mano copra la bocca e stabilire che si tratta dello stesso volto, questa volta serio a cui siano stati aggiunti un paio di occhiali. È plausibile immaginare che i singoli recettori ed i neuroni si attivino ogni volta in modo sensibilmente diverso, ma evidentemente le reti neurali non seguono una procedura di confronto punto per punto (si potrebbe dire oggi pixel per pixel). Tipicamente questo fenomeno è spiegato facendo ricorso alla nota capacità delle reti neurali di condurre generalizzazioni, per cui paradossalmente la vera potenza dei sistemi naturali risiede nel loro modo di funzionare “per approssimazione” rispetto al dettaglio.

Partendo dal presupposto matematicamente corretto che le reti neurali artificiali operino trasformazioni di vettori, Paul Churchland⁶ ha presentato alcuni anni fa un modello volto a spiegare come la rete artificiale Face Net sia in grado di raggruppare e riconoscere diversi tipi di volti: questo sistema infatti distingue un volto da un non-volto, un volto maschile da uno femminile, un volto familiare da uno sconosciuto e nel caso di volti familiari riesce ad attribuire loro il nome corretto. Secondo il modello proposto da Churchland, il fatto che ogni singolo segnale di ingresso nella rete raggiunga ciascuno dei neuroni posti al primo livello (Face Net è una rete multistrato con un livello nascosto) deve essere interpretato come una trasformazione del vettore numerico costituito da tutti i segnali di ingresso (una matrice 64x64) in una stringa vettoriale di 80 unità. Churchland ricorda quindi come ogni vettore abbia una sua rappresentazione geometrica in uno spazio n-dimensionale e quindi come, in questo caso specifico, ogni vettore costituito dalla configurazione di attivazioni relative al primo livello neuronale del sistema “Face Net”, individui un punto

all'interno di questo spazio a ottanta dimensioni. Non potendo, per motivi intuibili, rappresentare questo genere di spazi, Churchland propone una immagine tridimensionale del fenomeno ponendo sui tre assi alcune delle caratteristiche che si pensa siano determinanti nello sviluppo di categorie della rete neurale artificiale (distanza degli occhi, larghezza del naso, volume delle labbra): questo porta alla localizzazione nelle tre dimensioni di alcuni volti prototipici, ognuno dei quali occupa un settore diverso nello spazio. Si tratta di un modello che può essere applicato anche ad altri ambiti oltre che alla sola percezione dei volti: un procedimento simile è stato compiuto sull'abilità di riconoscere i sapori, costruendo un virtuale spazio tridimensionale che rappresentasse sui tre assi il grado di attivazione dei recettori sensibili al salato, al dolce e ai sapori aspri (ad opera di Bartoshuk e Beauchamp, 1994).

Da un punto di vista formale il metodo, soprattutto se limitato alla sola rete neurale artificiale è ineccepibile, ma può essere modificato in alcuni passaggi e diventare così più duttile e vicino al modello biologico.

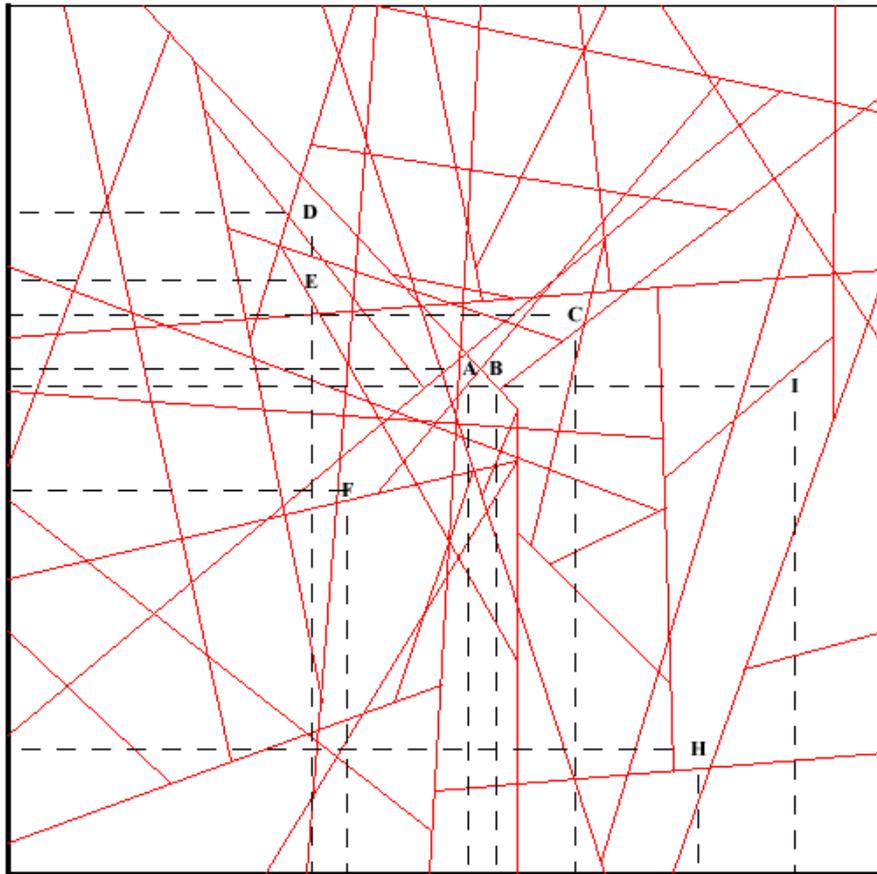
Il cambiamento fondamentale consiste nello spostare l'attenzione dal vettore costituito dagli stati di attivazione dei neuroni di primo livello al vettore che lo precede, costituito dai segnali di ingresso. Sarà quest'ultimo a costituire lo spazio dimensionale all'interno del quale ogni configurazione di segnali che raggiunga il sistema individuerà un punto. Rispetto al modello precedente, questo vettore presenta variazioni nel continuo per ogni sua dimensione: si tratta infatti di stimoli ambientali che raggiungono i recettori dell'organismo in esame e vengono da questi trasformati e ritrasmessi verso i centri nervosi. Il vantaggio rispetto al modello classico è però rappresentato dall'utilizzo che può essere così fatto dei neuroni di primo livello: questi sono raggiunti direttamente dai segnali di ingresso e li elaborano integrandoli secondo il noto calcolo soglia,

andando così ad individuare n piani n -dimensionali di separazione nello spazio individuato dal vettore costituito dai segnali di ingresso.

Una rappresentazione grafica permette di seguire più semplicemente il procedimento: ancora una volta e per gli stessi motivi già esposti nello studio di perceptron e reti multistrato analizzate nella seconda parte di questo lavoro, ridurre il numero di segnali di ingresso a due unità diventa indispensabile per poter individuare solo due assi cartesiani e ottenere così dei fasci di rette di separazione del piano, quelle che sono state chiamate “frontiere decisionali”.

Si ricorderà che, supponendo di avere a che fare con un unico neurone di primo livello, il piano individuato dai vettori possibili di ingresso è diviso in due parti (rappresentazione grafica 2.1); a due neuroni di primo livello corrisponderanno due frontiere decisionali, per cui, escludendo la possibilità che queste vadano a coincidere o siano parallele, potranno separare il piano in un numero massimo di quattro parti (rappresentazione grafica 2.2). Tre neuroni di primo livello individueranno otto aree distinte (rappresentazione grafica 2.3) e così via seguendo in modo quasi uniforme il calcolo combinatorio degli stati di attivazione attribuibili ai neuroni di primo livello.

Supponendo la presenza di n neuroni di primo livello, si otterranno altrettante frontiere decisionali, ma, dato che l’oggetto di studio è un sistema basato su una rete neurale biologica e quindi non anterograda, è necessario ricordare quanto mostrato con la rappresentazione grafica 2.7. Le frontiere decisionali individuate in queste occasioni non sono più costituite da fasci di rette continue, ma piuttosto da segmenti sul piano: più complessa è l’architettura della rete, più segmentate saranno di conseguenza le funzioni di frontiera. Nella rappresentazione grafica 3.1 si è cercato di mostrare come potrebbe apparire su assi cartesiani il calcolo



Rappresentazione Grafica 3.1 Rappresentazione grafica ipotetica di una rete neurale naturale e quindi non anterograda, dotata di n neuroni di primo livello.

computazionale generato da una rete neurale naturale complessa, caratterizzata da soli due recettori ed un qualsiasi numero elevato n di neuroni disposti su più livelli successivi, connessi in modo non anterogrado.

In una rappresentazione grafica di questo genere di rete, ogni stimolo esterno al sistema che venga recepito da almeno uno dei due recettori si concretizza in un coppia di segnali di ingresso (un valore positivo per ogni recettore o nullo nel caso di una mancata attivazione) che individua un punto specifico del piano. Come già mostrato nella seconda sezione di questo studio, le frontiere decisionali sono generate dal calcolo soglia effettuato da ogni neurone raggiunto direttamente dai segnali di ingresso e

più frontiere decisionali delimitano aree di piano corrispondenti a stati di attivazione (o vettori) diversi propri dei neuroni di primo livello.

E' sufficiente effettuare alcuni esempi per entrare nella logica di questo modello: si supponga che il sistema sia stimolato in modo da essere raggiunto in momenti diversi da otto segnali di ingresso e che ognuno di questi individui un punto, marcato con una lettera maiuscola nella rappresentazione grafica. Dal punto di vista della rete neurale, nel momento stesso in cui lo stimolo è recepito, il segnale di ingresso generato è ricondotto ad una categoria, per cui lo sviluppo delle categorie è indissolubilmente legato alla struttura stessa del sistema nervoso. Come si ricorderà dal paragrafo dedicato alla sinaptogenesi, la arborizzazione della corteccia umana è in parte dovuta alle esperienze sensibili a cui è soggetto l'organismo e in parte imputabile a cause genetiche. Come conseguenza, in termini grafici, la ricchezza di categorie da attribuire ai segnali di ingresso, essendo determinata dall'arborizzazione, è conseguenza tanto di un fattore naturale di sviluppo, quanto della qualità e quantità di stimoli cui l'organismo è sottoposto nei periodi descritti come interessati dal fenomeno naturale di generazione delle sinapsi.

Come si può notare graficamente, un'area delimitata da frontiere rappresenta in senso logico un insieme di punti, ovvero di coppie di segnali di ingresso; questo implica che, a seconda del numero complessivo di frontiere (ovvero dei neuroni di primo livello), una struttura neurale potrà in potenza disporre di più o meno categorie, ma non solo: si potrà anche verificare il caso di aree maggiormente definite per le quali sarà possibile effettuare più distinzioni ed altre in cui invece gli insiemi sono più vasti e per questo molti più segnali saranno ricondotti alla stessa categoria.

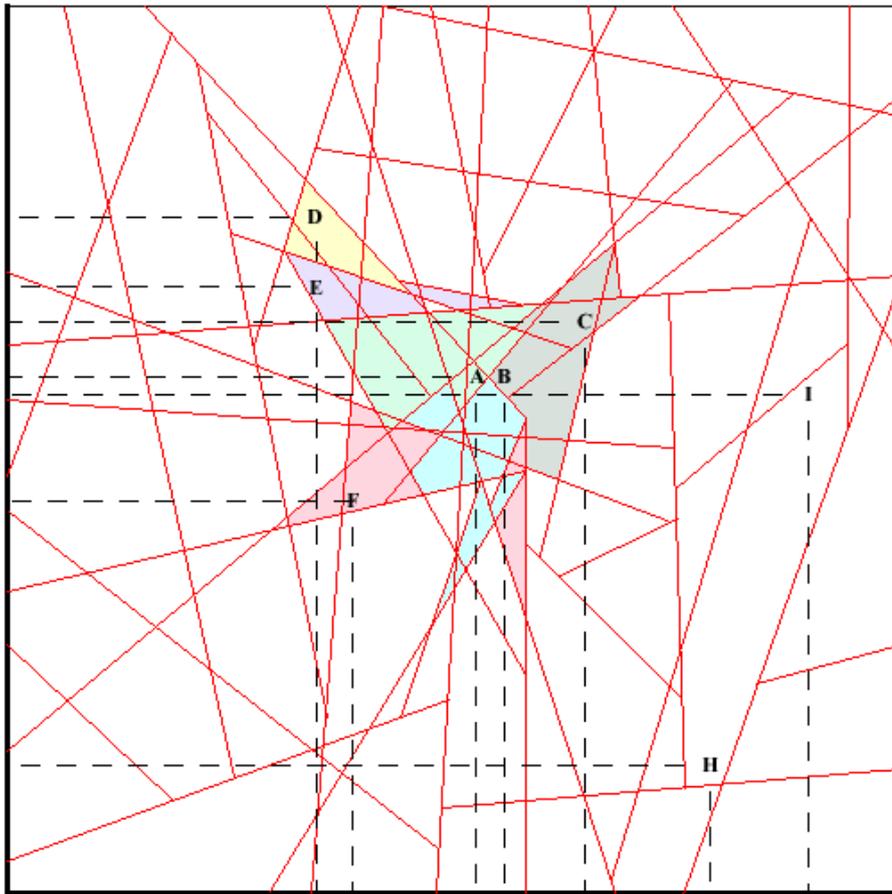
Si vedano per esempio i punti H ed I, pur fisicamente determinati da segnali di ingresso distanti (e presumibilmente da stimoli ambientali

altrettanto diversi tra loro), saranno recepiti dal sistema come identici: finché questo è statico (come si è già mostrato le reti neurali naturali in realtà sono dinamiche) non c'è modo per cui possano essere percepiti come distinti o diversi sotto qualsiasi aspetto. Al contrario la coppia di punti A e B è costituita da segnali di ingresso nei quali uno dei due valori del vettore è identico in ambo le coppie di segnali: graficamente questo è chiaramente visibile nel fatto che le ordinate dei due punti sono identiche. Nonostante questa parziale somiglianza di segnali e quindi presumibilmente di stimoli, la ricchezza di frontiere decisionali consente al sistema una separazione lineare dei due punti individuati dai segnali di ingresso, permettendo quindi che vengano riconosciuti come diversi. Un discorso analogo è ovviamente possibile per la coppia di stimoli che ha generato le coppie di segnali proprie dei punti D e E: in questo caso i valori delle ascisse sono identici, ma la distinzione tra i due punti è ancora una volta resa possibile dalla presenza di una frontiera decisionale che li separa in due aree del piano diverse.

Riassumendo, qualsiasi architettura di una rete neurale naturale dotata di due soli recettori, a prescindere dalla sua complessità architettonica, può essere idealmente rappresentata su due assi cartesiani attribuendo ad ogni segnale di ingresso un punto del piano ed al calcolo effettuato dai neuroni di primo livello una frontiera decisionale costituita da una retta o da un segmento di retta. Le potenzialità di calcolo del sistema dipenderanno non solo dal numero di neuroni, ma anche dal numero di connessioni che tra questi si sono costituite: a poche frontiere decisionali corrisponderanno poche categorie e minori possibilità per un sistema di classificare stimoli diversi. La distinzione tra i segnali di ingresso e la conseguente formulazione di categorie, a questo primo livello, è automatica ed inconsapevole dal punto di vista del sistema.

Ovviamente uno stimolo, per poter essere elaborato, ovvero inserito in una categoria piuttosto che un'altra, deve prima essere percepito: ciò che il sistema non riceve dall'ambiente non è oggetto di elaborazione. Prendendo in considerazione un sistema dotato di due soli recettori si può facilmente immaginare che tale restrizione costituisca un problema non secondario, ma si deve ricordare come le regole qui esposte relativamente a questo caso possano in senso matematico essere estese senza particolari difficoltà ad un sistema, biologicamente più credibile, dotato di milioni di recettori. La difficoltà non è negli insiemi di disequazioni di base, come si ricorderà dalla prima sezione di questo studio, quanto piuttosto nelle rappresentazioni. Un segnale di ingresso composto da, ad esempio, mille recettori individuerà comunque un punto nello spazio a mille dimensioni. Come mostrato, il punto cadrà anche in questo caso in una sezione dello spazio multidimensionale, delimitata da frontiere decisionali a loro volta generate da neuroni di primo livello. Mancherà però la possibilità di vedere su di un grafico come questo sia possibile, perdendo quindi l'aspetto più interessante dello strumento che qui si cerca di esporre, ovvero una relativa immediatezza e semplicità d'applicazione.

Nel metodo classico di analisi delle reti neurali l'attenzione ricade di solito sulla trasformazione di vettori che questi dispositivi compiono computando i segnali di ingresso in vari livelli neurali. In senso matematico si afferma che più vettori diversi corrispondenti a stati di attivazione espressi dai neuroni di primo livello possono essere trasformati in uno stesso vettore di stati di attivazione corrispondente ad un livello neurale successivo. Il metodo grafico permette di rendere conto di questa trasformazione vettoriale relativa ad ogni livello in un modo che ancora una volta sembra essere più facilmente comprensibile. Se infatti i neuroni di primo livello svolgono il ruolo determinante di generare le frontiere



Rappresentazione Grafica 3.2

Rappresentazione grafica ipotetica di una rete neurale naturale in cui sono state evidenziate delle aree per rappresentare gli aggregati di categorie sviluppati da neuroni di livello successivo al primo.

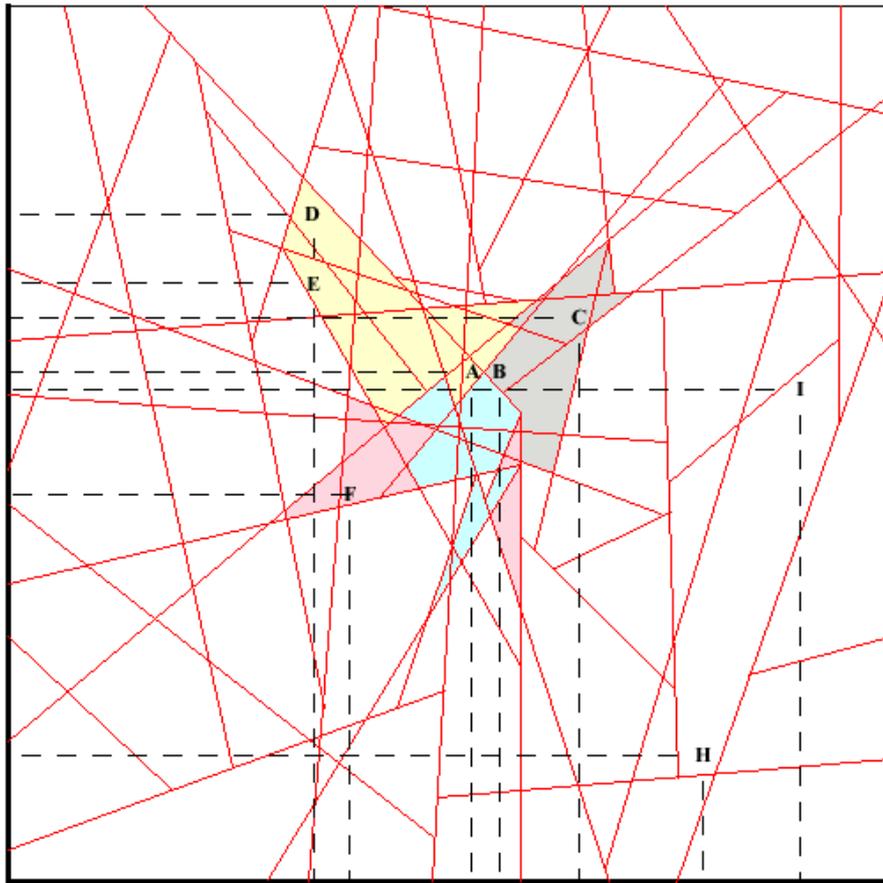
decisionali, i neuroni dei livelli successivi permettono una riconfigurazione delle categorie espresse, creando degli “aggregati” di aree del piano, a cui attribuiscono pari valore: occorre sottolineare nuovamente come le categorie così generate possano essere più ampie (nel caso in cui comprendano diverse categorie proprie dei livelli precedenti), ma non possano mai essere “minori” o più dettagliate di quelle imposte dalle frontiere.

Nella seconda sezione di questo lavoro, le rappresentazioni grafiche 2.4, 2.5 e 2.6 sono state costruite proprio con lo scopo di mostrare come ciò possa avvenire in reti neurali di portata limitata: il procedimento tuttavia si

applica allo stesso modo nelle reti complesse, sebbene su scala maggiore. Da un punto di vista grafico quindi ancora una volta questa trasformazione vettoriale è stata tradotta colorando più aree del piano allo stesso modo (rappresentazione grafica 3.2).

Ipotizzando che i neuroni di secondo livello del sistema qui rappresentato compiano un calcolo tale da consentire lo sviluppo di sole sette categorie (una per ogni colore), qualsiasi coppia di segnali di ingresso sarà ricondotta ad una di queste facendo sì che lo stesso punto nello spazio possa essere assegnato ad una determinata area “di primo livello” e ad un’altra area “di secondo livello”, che può non coincidere con la prima. In termini pratici questo giustifica la possibilità per uno stesso stimolo di essere riconosciuto come appartenente a più insiemi (tenendo conto del tempo fisicamente necessario per la propagazione tra i livelli neurali), passando dal particolare al generale: i punti B e C ad esempio in precedenza erano considerati come distinti dal sistema, ma secondo questa nuova configurazione di aree del piano, che si affianca senza sostituirsi alla prima, essi saranno considerati come appartenenti allo stesso insieme. Il procedimento ovviamente può essere ripetuto per un eventuale terzo livello caratterizzato da categorie ancora più ampie, come mostra la rappresentazione grafica 3.3.

Il riconoscimento avviene quindi in automatico ed in modo del tutto inconsapevole: nel momento in cui riesca a generare un segnale di ingresso, lo stimolo non può che individuare un punto nello spazio generato dalle dimensioni del vettore di ingresso. A sua volta ogni punto ricade necessariamente in un’area individuata dalle frontiere venendo recepito come appartenente ad un determinato insieme di stimoli più o meno simili: questo fenomeno si presta bene a fornire una spiegazione della robustezza delle reti neurali naturali nel superare problemi legati alla presenza del



Rappresentazione Grafica 3.3 Rappresentazione grafica ipotetica di una rete neurale naturale in cui sono state evidenziate delle aree per rappresentare gli aggregati delle categorie mostrate nella rappresentazione grafica 3.2.

rumore di fondo, dato che lievi variazioni nel vettore composto dal segnale di ingresso hanno buone probabilità di “cadere” all’interno della stessa sezione dello spazio.

Lo strumento grafico può quindi essere utilizzato per rileggere alcuni processi cognitivi alla luce delle rappresentazioni. L’apprendimento ad esempio può essere suddiviso in due momenti distinti dei quali il primo in ordine temporale si concretizza nel periodo soggetto alla sinaptogenesi propria della fase perinatale. La creazione di sinapsi che consentano la trasmissione dei segnali dai recettori verso i neuroni di primo livello, da un punto di vista grafico si concretizza con la generazione delle frontiere: dato

che, stando ai dati raccolti sulla sinaptogenesi (riportati nella prima sezione di questo lavoro), questo fenomeno interessa in modo particolare quelle parti della rete più spesso raggiunte da segnali, se ne può concludere che che nel periodo in esame l'organismo formi le proprie categorie di classificazione degli stimoli più frequenti, apprendendo. Da un punto di vista grafico questo è spiegato mostrando come l'incremento delle frontiere decisionali consenta di dividere materialmente in più aree non omogenee lo spazio dimensionale offerto dal vettore di segnali di ingresso. La seconda fase di apprendimento invece è di natura più complessa: graficamente può essere intesa come la formazione di quelle che sono state definite "categorie di livello" o "aggregati di aree" e sarà discussa contestualmente al problema della denotazione linguistica, negli ultimi due paragrafi di questa sezione.

Stando al modello che emerge dall'uso dello strumento grafico, la memoria che consente la rappresentazione di ciò che si percepisce consiste nella struttura neurale stessa: graficamente essa è il modo in cui lo spazio generato dal vettore di segnali di ingresso è diviso dalle frontiere e rielaborato dai neuroni dei livelli successivi, con la generazione degli aggregati. In questo senso diventa chiara l'espressione di "memoria distribuita", dato che non c'è un "luogo" in cui siano conservate in particolare determinate indicazioni riguardanti le esperienze passate: il sistema nel complesso memorizza in modo distribuito ciò che apprende, generando frontiere e categorie di livello alle quali riconduce gli stimoli nel momento stesso in cui questi sono trasformati dai recettori in segnali di ingresso (con la limitazione fondamentale dovuta alla velocità di trasmissione dei segnali attraverso la rete). In questo senso è corretto affermare che tutte le rappresentazioni grafiche mostrate nella seconda

sezione di questo lavoro, non sono altro che una delle possibili rappresentazioni su assi cartesiani della memoria della rete corrispondente.

3.4 Alterare il sistema.

Un segnale di ingresso può in vario modo essere influenzato dallo stato iniziale dal sistema che lo sta ricevendo o essere parzialmente costituito da informazioni legate alle condizioni del sistema stesso. Nel momento in cui si è fatto riferimento ai sensi classici, si è anche accennato ad un senso enterocettivo: gli organismi complessi infatti possono contare su una classe di recettori in grado di trasmettere segnali relativi allo stato del corpo. Dato che, da un punto di vista grafico, i dati che i recettori convertono nel vettore di segnali di ingresso individuano un punto nello spazio multidimensionale generato dallo stesso vettore, ne segue che questo punto rappresenta contemporaneamente tanto gli stimoli interni quanto quelli esterni.

Non vi sono particolari differenze nella trasformazione in segnali di ingresso degli stimoli relativi alle condizioni dell'organismo rispetto a quelli imputabili all'ambiente in cui è immerso il sistema: anche in questo caso i recettori saranno dedicati a recepire un particolare tipo di stimolo e potranno elaborare solo questo, trasformandolo in un segnale che raggiunga il sistema nervoso. Che i segnali generati da stimoli interni siano o meno coscienti non è rilevante a questo livello di analisi: una sensazione dolorosa associata ad un muscolo o l'emergere della sensazione della sete o della stanchezza saranno comunque processati contribuendo alla localizzazione del punto immaginario che, in senso grafico, è la rappresentazione analitica di ogni singola combinazione numerica attribuita al vettore costituito dai segnali di ingresso.

In questo caso il metodo grafico consente di verificare cosa possa accadere in condizioni ipotetiche sperimentalmente impossibili da replicare, ovvero cosa succeda ad un sistema soggetto a due stimoli esterni identici, ma legati a due condizioni fisiche diverse tra loro. Dato che, come si è detto, il vettore del segnale di ingresso tiene in considerazione tutti i recettori del sistema e considerato il fatto che una parte di questi recettori è dedicato alla trasformazione degli stimoli interiori, ne segue necessariamente che graficamente le due condizioni sperimentali andranno ad individuare due punti diversi nello spazio. Ad esempio i punti A e B, nei grafici in precedenza utilizzati in questa sezione, consentono una veloce analisi del fenomeno: una parte dei recettori fornisce in entrambi i casi il medesimo segnale, ma la restante parte di questi fornisce un segnale differente. Il grafico è, come più volte detto, basato su soli due recettori, ma ancora una volta lo spostamento visibile del punto individuato nello spazio è valido anche in ambito multidimensionale.

Questa semplice applicazione del metodo grafico è coerente con una serie di dati sperimentali noti, ovvero con le differenze di prestazione registrate in soggetti sottoposti a condizioni fisiche differenti e l'aumento di errori, anche in semplici operazioni di riconoscimento, quando l'organismo è posto in condizioni fisiche critiche. Lievi differenze nelle condizioni del sistema in esame infatti provocheranno slittamenti trascurabili del punto individuato dallo stimolo complessivo e la rete riuscirà a trascurarle in base ai procedimenti già analizzati in presenza di rumore di fondo. Quando, però, le condizioni fisiche dovessero essere considerevolmente diverse, la percezione, così come intesa in questo studio e presentata nel paragrafo precedente, ne risulterebbe fortemente influenzata, divenendo causa delle differenze di prestazione a cui si stava facendo riferimento.

Come anticipato, vi è una seconda via per mezzo della quale lo stato iniziale di un sistema soggetto a stimolazione altera le capacità di elaborazione del vettore costituito dai segnali di ingresso. Nella prima sezione di questo studio è stato presentato un esempio⁷ a riguardo di un organismo che, in seguito al riconoscimento di un pericolo, produce le endorfine necessarie alla inibizione delle sensazioni dolorose. In questo caso l'intervento della sostanza chimica può agire a diversi livelli: nel caso in cui vada ad inibire il funzionamento di determinati recettori, dal punto di vista grafico, questo impedirà lo spostamento del punto costituito dal vettore dei segnali di ingresso. In queste condizioni il sistema non può essere raggiunto dai segnali che normalmente vengono elaborati come dolore e quindi, processando solo quegli stimoli che lo raggiungono, si comporterà ignorando lo stimolo doloroso che a tutti gli effetti è divenuto ora invisibile nell'ottica del sistema.

Un secondo tipo di intervento può avvenire lungo le sinapsi di congiunzione tra i recettori ed il sistema nervoso centrale, in questo modo i recettori invieranno dei segnali, ma questi non potranno essere normalmente processati: da un punto di vista grafico questo fenomeno si differenzia dal precedente in quanto questa volta il recettore è in grado di trasmettere il proprio segnale, ma questo è bloccato lungo alcuni dei suoi canali. Nel caso in cui tutti i canali di comunicazione tra recettore e neurone siano interrotti graficamente non ci sarebbero differenze qualitative rispetto al caso precedente, ma è possibile invece che solo alcune delle vie lungo le quali il recettore trasmette i propri segnali siano interrotte. Per quanto temporanea, una simile alterazione modifica l'aspetto e la posizione delle frontiere decisionali generate dai neuroni di primo livello, limitatamente alle situazioni in cui questi siano raggiunti dai segnali di più di un recettore. Si rimanda in questo senso all'ultima

rappresentazione grafica esposta nella seconda sezione di questo lavoro dove il neurone di primo livello α_1 , raggiunto dal segnale proveniente da uno solo dei due recettori genera una retta parallela ad uno degli assi (rappresentazione grafica 2.7).

Infine la terza via di intervento sul sistema da parte di un neuromodulatore o un neurotrasmettitore si configura quando questo agisce sulle sinapsi di congiunzione tra neuroni di livello successivo al primo. In questo caso il segnale di ingresso nel suo complesso sarà identico a quello che avrebbe raggiunto il sistema nel caso di un mancato intervento della sostanza chimica, il cambiamento si avvertirà invece nella generazione degli aggregati di aree. Nel momento in cui uno o più neuroni non dovessero ricevere segnali dai neuroni di livello precedente, opererebbero il loro calcolo soglia sulle sole informazioni in loro possesso: le unità neurali, alle quali è impedita la propagazione del segnale, sarebbero considerate quindi dai livelli successivi come fossero a tutti gli effetti “spente”. L’integrazione compiuta dal calcolo soglia ne risulterebbe modificata e lo stato di attivazione di un livello neurale potrebbe essere (anche se non è necessario che lo sia) modificato dall’intervento della sostanza chimica, comportando un cambiamento nell’attribuzione del segnale ad uno degli aggregati di categorie di livello: in senso grafico il punto resterebbe stabile, ma cambierebbe l’“area colorata” a cui sarebbe ricondotto rispetto a ciò che sarebbe successo nel caso in cui non fosse intervenuto il fattore chimico.

Non dissimile, dal punto di vista dello strumento grafico, è il comportamento tenuto dal sistema in presenza di sostanze eccitatorie al posto di quelle inibitorie fin qui esaminate. L’intervento su di una classe di recettori comporterebbe comunque una alterazione nella localizzazione del punto nello spazio, in quanto il segnale di ingresso sarebbe alterato alla

base a causa della presenza della sostanza chimica. Anche in questo caso una modifica volta a favorire il passaggio o aumentare la quantità di segnale trasmessa lungo le sinapsi può modificare la posizione e la forma delle frontiere decisionali, nel caso di un intervento lungo le vie di trasmissione tra recettore e neurone di primo livello, oppure alterare il processo di attribuzione agli aggregati di categorie, nel caso in cui l'intervento della sostanza chimica sia localizzato nelle sinapsi di congiunzione tra neuroni di livello successivo al primo.

Il procedimento può inoltre essere replicato in presenza di sostanze chimiche introdotte nel sistema dall'esterno: dal punto di vista dell'elaborazione dei segnali di ingresso non vi è nessuna differenza tra una sostanza chimica endocrina ed una artificiale. Le operazioni chiave nel modificare il modo in cui gli stimoli interni ed esterni possono essere percepiti restano comunque le tre descritte: l'intervento della sostanza può alterare il funzionamento di una classe di recettori, bloccare o incrementare il trasferimento delle informazioni dal recettore al sistema nervoso o riconfigurare, in modo temporaneo o permanente, il modo in cui i segnali vengono attribuiti a determinate categorie nei livelli neurali successivi al primo.

Infine vi è una quarta possibilità da considerare come fattore di alterazione del calcolo operato da una rete neurale biologica, ovvero l'intervento di un agente chimico o elettromagnetico che possa alterare direttamente lo stato di attivazione di singole unità o gruppi di neuroni. Si ricorderà infatti che è possibile intervenire sul calcolo soglia facendo sì che un segnale in condizioni normali insufficiente ad innescare un potenziale di azione divenga invece efficace allo scopo, oppure al contrario che sia necessario uno stimolo superiore alla norma per garantire l'attivazione del neurone interessato. Da un punto di vista grafico, come mostrato nella

prima rappresentazione grafica della seconda sezione, un intervento sulla soglia di attivazione si concretizza, nel caso di un neurone di primo livello, in uno spostamento in parallelo della relativa frontiera decisionale e ancora una volta, nel caso di un neurone di livello successivo, in una riconfigurazione dell'attribuzione del segnale di ingresso ad uno specifico aggregato di categorie. Si prenda in considerazione a titolo di esempio la rappresentazione grafica 2.6: il punto B è in condizioni normali assegnato alla categoria di terzo livello "bianca", ovvero corrispondente al vettore di attivazione dei neuroni di uscita (0,1). Nel momento in cui un fattore intervenisse, innalzando la soglia di calcolo del neurone Ω_2 , il vettore di secondo livello attivato dal punto B (0,0,1) resterebbe invariato, ma potrebbe non essere più sufficiente ad attivare Ω_2 . Come conseguenza il segnale B potrebbe essere ricondotto alla zona "gialla", dato che questa corrisponde al vettore di attivazione dei neuroni di uscita (0,0).

Non si tratta in questo caso dell'intervento di sole sostanze chimiche, così come tutto il meccanismo non deve essere immaginato come limitato unicamente al fenomeno della percezione: di recente si stanno sperimentando delle modalità di trattamento per malati di parkinson che prevedono l'impianto di minuscoli elettrodi nel tronco encefalico dei pazienti, in modo da modificare alcuni nuclei motori. Durante la fase di posizionamento di uno di questi elettrodi in una paziente, l'equipe di Yves Agid a Parigi, è incappata in una scoperta imprevista: al passaggio della corrente in una delle posizioni di prova, un attacco terribilmente acuto di depressione ha colpito la paziente, accompagnato da manifestazioni di pianto e sentimenti di disgusto, tristezza e sconforto. Interrotto immediatamente il passaggio di corrente, in circa novanta secondi il comportamento della paziente era tornato normale: interrogata questa aveva poi dichiarato che si era sentita molto triste, ma che non ne

conosceva il motivo⁸. Un caso molto simile, ma decisamente più piacevole, si è verificato con stimolazioni esterne in grado di indurre una risata improvvisa in un soggetto sottoposto a stimolazione elettrica a basso potenziale: anche in questo caso il soggetto interrogato non sapeva fornire una spiegazione precisa del perché stesse ridendo, ma si trovava sorpreso nel notare che gli altri presenti non stessero avendo la sua stessa reazione⁹.

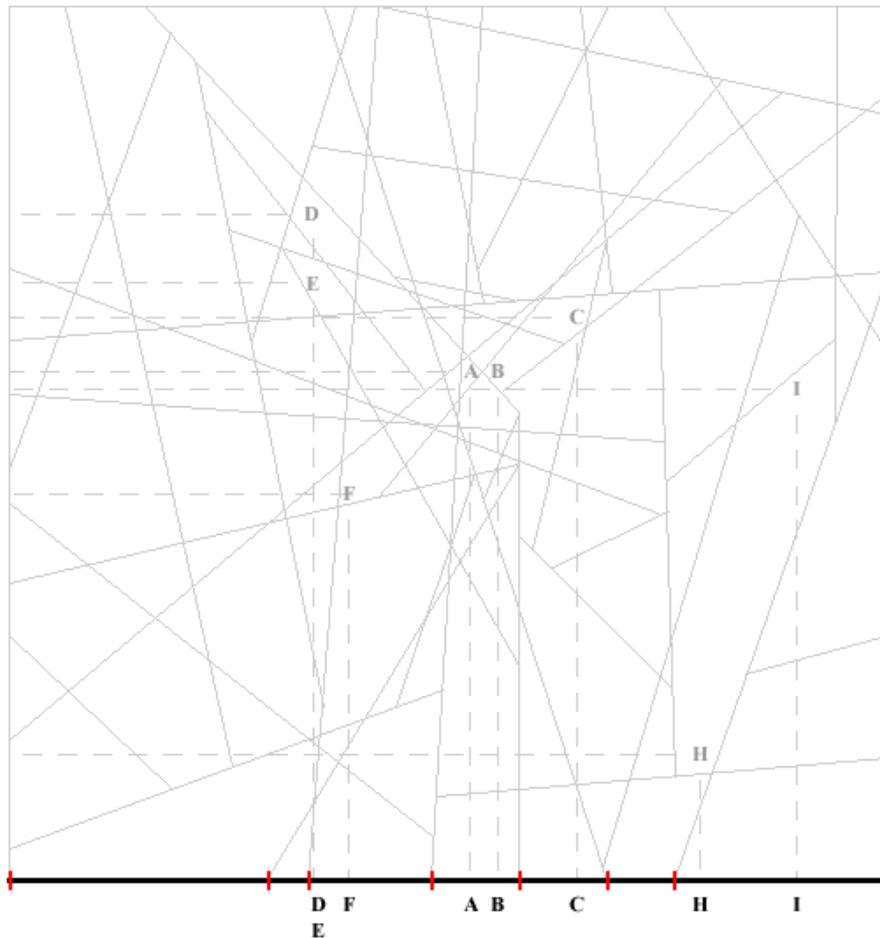
In questo caso l'attivazione esterna diretta di un gruppo neurale ha scavalcato il normale processo operato sui segnali da parte del sistema: graficamente l'individuazione di un punto dovuto al vettore di segnali di ingresso consente l'attivazione di determinati vettori nei livelli neurali successivi. In altri termini a specifiche configurazioni del vettore di ingresso corrispondono delle particolari aree del piano, ma se si forza il sistema attivando uno schema neurale, si ottiene lo stesso risultato che si sarebbe ottenuto facendo sì che un segnale si collocasse nell'area desiderata, senza però che il segnale sia più necessario. Tornando alla rappresentazione grafica 3.2 si può quindi dire che, perché il sistema percepisca uno stimolo come appartenente all'area gialla del grafico, questo deve generare una coppia di segnali di ingresso che abbia come coordinate uno dei punti che cadono in quella sezione di piano, ad esempio il punto D appartiene a questo insieme. Se però alla rete viene offerto un qualunque altro segnale di ingresso (si supponga la coppia di valori che individua il punto A), ma si decide artificialmente di modificare lo stato di attivazione neurale di secondo livello corrispondente all'area gialla, nell'ottica grafica sarebbe come colorare tutto il piano di giallo: qualsiasi segnale si immetta nella rete, questa fornirà sempre la stessa risposta.

Ovviamente il cervello umano non presenta solo due o tre livelli neurali successivi e le ramificazioni che permettono la propagazione dei segnali sono ampiamente modulari (quindi sono divise in gruppi

parzialmente indipendenti) per cui si può bloccare una parte del sistema nervoso facendo sì che generi sempre la risposta “risata” o “sensazione di disperazione”, senza necessariamente eliminare ogni altra possibilità di generare categorie. La semplificazione offerta dalla rappresentazione grafica permette invece di formalizzare un altro concetto interessante: secondo questo punto di vista, l’essere triste o felice di un organismo non è conseguenza di un determinato stato di attivazione neurale, ma è lo stato di attivazione stesso. La differenza, pur sottile, si colloca perfettamente nel quadro teorico del materialismo assunto come punto di partenza.

Dal punto di vista analitico-matematico e quindi nell’ottica dello strumento grafico, non c’è una differenza tangibile tra una modifica fisica che preveda una sinapsi recisa e l’intervento di una sostanza che blocchi la trasmissione dei segnali lungo questo stesso canale; si intuisce quindi come il metodo grafico possa essere usato anche per tentare di dare una risposta ad alcune domande che sorgono nello studio di quelle lesioni che, interessando alcune aree del sistema nervoso, provocano delle alterazioni nei modi in cui il sistema percepisce l’ambiente. Oltre agli intuibili mutamenti nella localizzazione del punto individuato dal vettore dei segnali di ingresso e nella sua attribuzione alle relative categorie di livello, il metodo grafico consente di fornire una spiegazione alla questione più delicata sollevata in principio del paragrafo precedente, ovvero cosa accada quando si aggiunga ad un sistema una intera categoria di percezioni sensoriali.

La condizione opposta di perdita di recettori è stata ampiamente sviluppata: se nei grafici esposti in precedenza si provasse infatti a rappresentare cosa accade eliminando uno dei due recettori, questa operazione si risolverebbe nella scomparsa di uno dei due assi perché i canali un tempo percorsi dai segnali emessi dal recettore eliminato



Rappresentazione Grafica 3.4

Rappresentazione grafica ipotetica della rete neurale già presentata nelle rappresentazioni 3.1, 3.2 e 3.3 in cui venga impedito il funzionamento di uno dei due recettori. Il grafico non necessita più di due assi per rappresentare un vettore di segnali di ingresso costituito da una sola dimensione.

“taceranno” come se questo non trovasse mai uno stimolo in grado di garantirne l’attivazione. Le categorie sviluppate si ridurrebbero drasticamente e potrebbero essere più correttamente rappresentate su una singola retta divisa in segmenti piuttosto che su un piano: la rappresentazione grafica 3.4 fornisce un esempio di questo schiacciamento su di una sola dimensione. Avendo a che fare con un vettore di segnali di ingresso dotato di una sola dimensione, gli stimoli che in precedenza individuavano dei punti in un piano ora individuano invece punti su di una

retta e le frontiere decisionali non fanno altro che dividere questa stessa retta in segmenti.

Come appare evidente dall'ultimo grafico, i punti D e E coincidono poichè manca il segnale proveniente dal secondo recettore: anche se generati da stimoli differenti, essi finiscono con il generare, ai sensi del sistema, esattamente lo stesso segnale e sono collocati nella categoria che è propria anche del punto F. La rappresentazione mostra quindi come le decine di spazi raffigurati nel grafico 3.1 sono stati ridotti a soli sette segmenti e quindi altrettante categorie.

Si può immaginare adesso più facilmente cosa accada invece aggiungendo un ipotetico terzo recettore: un piano non sarà più sufficiente a rendere conto del vettore di segnali di ingresso poiché questi individueranno un punto in uno spazio tridimensionale. Ogni singola coppia di valori in precedenza ricondotta senza esitazione ad una particolare categoria, divenuta una tripletta ordinata di numeri, viene adesso "spostata" in base al valore assunto dalla terza dimensione in sezioni dello spazio in cui le frontiere decisionali (diventate ora fasci di piani nello spazio invece che di rette sul piano) è possibile che abbiano forma e posizione diverse. Il numero di categorie sviluppate dal sistema aumenta in modo decisivo e stimoli che in precedenza potevano generare segnali di ingresso identici, sono invece inseriti in sezioni di piano graficamente anche molto distanti (si faccia il paragone tra i punti D e F quando visti sulla retta e quando invece visti nel piano e si immagini cosa possa succedere nelle tre dimensioni).

In conclusione, la attivazione di una categoria di recettori, in un organismo che per lungo tempo non ha potuto contare su di essi, genera necessariamente un disorientamento percettivo sia nella comprensione di stimoli legati al senso riconquistato, sia relativamente agli stimoli

provenienti da recettori che erano invece già in uso. È molto difficile comparare tra loro spazi diversi nel numero di dimensioni e in un senso strettamente matematico è anche profondamente sbagliato: due sistemi dotati di un numero differente di recettori sono tra loro inconfrontabili, pur agendo in base alle stesse meccaniche. Forse questo è il motivo per cui il famoso esperimento mentale proposto da Nagel nel 1974, ovvero “Come ci si sente ad essere un pipistrello?” è ancora oggi così interessante: da un punto di vista analitico sarebbe come chiedere ad una sfera come si sentirebbe ad essere un cerchio (o viceversa).

3.5 Competenza¹⁰ ed errore.

Competenza ed errore sono concetti a cui si è accennato in modo indiretto nei due paragrafi precedenti. Si tratta però di processi cognitivi tutt'altro che marginali che possono svolgere il ruolo di un ponte verso l'ultima parte di questo lavoro, riguardante la denotazione linguistica: in quest'ottica saranno brevemente analizzati tramite lo strumento grafico.

Limitatamente all'ambito della percezione è possibile definire la competenza come la capacità di distinguere tra loro un numero elevato di stimoli: da un punto di vista grafico, come è intuibile, essa andrà così a coincidere con la quantità di sezioni del piano e con le relative categorie sviluppate dal sistema. Il ruolo dell'apprendimento nello sviluppo di una competenza specifica può essere ricondotto alle due fasi già individuate, ovvero il periodo perinatale caratterizzato dalla sinaptogenesi e la successiva fase della creazione degli aggregati di categorie: livelli di competenza scadenti o eccellenti in un determinato campo saranno allora determinati dalla predisposizione genetica, dal caso e rispettivamente dallo scarso o elevato contatto del soggetto con la categoria di stimoli relativa al campo di conoscenze preso in esame. Dal punto di vista grafico un basso

livello di competenza specifica trova rappresentazione in aree del piano più vaste, corrispondenti ad insiemi che comprendono un numero maggiore di vettori di segnali di ingresso e quindi minori capacità di creazione di categorie. Una competenza elevata è simmetricamente rappresentata da insiemi più piccoli e quindi graficamente da sezioni dello spazio più riccamente munite di frontiere e per questo in grado di distinguere molte categorie, anche in presenza di segnali di ingresso tra loro simili.

In base a quanto detto nei due paragrafi che precedono, un errore nella percezione può avere cause legate alla generazione del segnale o alla fase di elaborazione: si tratta di modificazioni del calcolo computazionale eseguito dalla rete già analizzate e possono qui essere brevemente elencate. Quelle appartenenti al primo gruppo sono così descritte:

- Lo stimolo che genera il segnale di ingresso è eccessivamente disturbato rispetto al genere prototipico conosciuto dal sistema: in altri termini il rumore di fondo è talmente elevato da confondere l'elemento che il sistema sta cercando di associare ad una categoria. Il disturbo può essere dovuto a questioni ambientali o al senso enterocettivo, legato allo stato del corpo. In entrambi i casi il vettore del segnale di ingresso generato individuerà come sempre un punto, ma questo avrà coordinate lontane da quelle proprie del prototipo e così andrà a cadere all'interno di una sezione del piano diversa, generando l'errore nel sistema.
- Lo stimolo è sufficientemente vicino al prototipo, ma non può generare un vettore di segnali di ingresso adeguato perché alcuni recettori non funzionano in modo corretto (la causa può essere ad esempio un momentaneo intorpidimento dovuto al freddo). Anche in questo caso, da una punto di vista grafico, la situazione descritta si risolve in uno spostamento nello spazio del punto individuato dal vettore dei segnali di ingresso.

La fase di elaborazione del segnale di ingresso può invece essere soggetta ai seguenti problemi:

- Alterazione delle capacità di conduzione degli impulsi lungo le sinapsi di congiunzione tra recettori e neuroni di primo livello oppure tra neuroni di primo livello e livelli successivi. A queste condizioni, il punto individuato dal segnale di ingresso resta fisso, ma nel primo caso si modificano le frontiere decisionali, mentre nel secondo caso l'alterazione riguarda l'attribuzione degli aggregati di categorie nei livelli neurali successivi al primo. Un simile fenomeno può essere indotto dall'intervento di fattori chimici endocrini o immessi nel sistema dall'esterno. In alcuni casi, come nell'esempio già esposto a riguardo della percezione della fatica e del dolore in condizioni di pericolo, una simile alterazione, che comporta nei fatti l'"errata" percezione della realtà, può risultare una scelta evolutiva molto efficace.
- Le categorie sviluppate da livelli neurali possono infine essere alterate artificialmente tramite apparecchi in grado di fornire stimolazioni elettromagnetiche direttamente nel tessuto. In questo caso l'errore è dovuto al fatto che la rete perde le sue capacità di computazione fornendo, nei limiti delle zone attivate, sempre la stessa risposta a prescindere dal vettore costituito dal segnale di attivazione.

E' interessante notare come lievi oscillazioni del punto individuato nello spazio dal vettore dei segnali di ingresso non creino alcuna difficoltà nel mantenere costante la categoria di riferimento in sezioni del piano contraddistinte da ampie aree ed uno scarso numero di frontiere decisionali. Al contrario dove le sezioni si fanno ridotte e quindi, secondo la definizione, vi è un alto grado di competenza nel riconoscimento, è più facile che alterazioni dello stimolo o slittamenti delle frontiere decisionali di modesta entità possano provocare cambiamenti a cascata su molte

categorie ingenerando un errore di riconoscimento. Questa osservazione sembra essere compatibile con la nozione che vede soggetti con elevata competenza in un settore risentire di condizioni di stress fisico o mentale fino a poter rilevare una difformità di prestazioni consistente. In modo perfettamente coerente con quanto detto a riguardo delle rappresentazioni grafiche, si è evidenziato come, a parità di disturbo, vi è una relativa costanza nelle prestazioni dei soggetti non competenti: questi ultimi partiranno da uno standard di prestazione inferiore qualitativamente rispetto a quello proposto dai soggetti competenti, ma al contrario di questi ultimi, all'aumentare degli elementi di disturbo, non saranno soggetti ad un degrado, se non minimo, nel livello offerto dalle prestazioni.

3.6 Denotazione.

Lo strumento di analisi della mente che qui si va delineando è ancora in una condizione embrionale di sviluppo, per cui potrebbe sembrare che l'idea di addentrarsi nel campo dello studio del linguaggio sia tanto azzardata quanto decidere di arare un campo minato. Tuttavia nei paragrafi precedenti sono state ipotizzate due fasi centrali nell'apprendimento di un sistema basato su reti neurali biologiche: la seconda fase in particolare, riguardante la strutturazione degli aggregati di aree o aree di livello, può essere affrontata in modo più agevole se concettualizzata come legata alla denotazione linguistica, intendendo con questo termine quel processo in base al quale un parlante assegna una etichetta ad un oggetto di cui ha esperienza sensibile. Prima di procedere è doveroso però puntualizzare come non si voglia stabilire una relazione biunivoca tra l'esistenza del linguaggio e l'esistenza degli aggregati di aree nelle rappresentazioni grafiche del calcolo neurale biologico in genere: una simile ipotesi negherebbe la possibilità che altri organismi diversi dall'essere umano e

non dotati di linguaggio possano compiere elaborazioni complesse dei propri segnali di ingresso. Ciò che invece si ipotizza in questa fase dello studio è che il linguaggio sia uno strumento particolarmente efficace che consente l'organizzazione del calcolo nei modi che si vanno a descrivere, ma che non per questo sia l'unico mezzo a disposizione degli organismi biologici.

Come si è visto a partire dalla rappresentazione grafica 2.4, da un punto di vista matematico ed analitico non si incontrano particolari problemi nello spiegare in che cosa consista una trasformazione di vettori e come questa generi graficamente un aggregato di aree. Tuttavia ciò non equivale a spiegare come esattamente una rete neurale biologica impari a strutturare questi aggregati in un modo funzionale alla classificazione più o meno competente degli stimoli offerti al sistema dall'ambiente. Da un punto di vista grafico la domanda può essere riformulata chiedendosi come è possibile che la zona colorata di grigio (così come qualsiasi altra) nelle rappresentazioni grafiche 3.2 e 3.3 comprenda esattamente quelle otto aree minori, che si rivelano poi utili ai fini della generazione di categorie, ma non altre o magari alcune in più o in meno.

Per poter affrontare l'argomento conviene appoggiarsi ad un esempio: si immagini un italiano che non abbia particolare passione per gli sport invernali che passeggi al fianco di un nativo americano Koyukon; i due soggetti si parlano perché conoscono le basi della lingua l'uno dell'altro e stanno cercando di arricchire il proprio vocabolario chiedendo o comunicando i nomi di determinati oggetti in cui si imbattono durante i loro spostamenti.

Un esempio molto famoso, attribuito a Whorf, riporta le diverse dozzine di nomi che gli eschimesi Inuit userebbero per indicare altrettante tipologie di neve. In realtà pare che Whorf non abbia mai fatto un simile

esempio, ma uno studio ad opera di Nelson (1983), condotto appunto sui nativi americani Koyukon delle foreste nella zona subartica, ha individuato quindici termini usati per indicare la neve secondo queste distinzioni¹¹:

- neve profonda
- neve cadente
- tempesta di neve
- neve per terra
- neve a grani sotto la superficie
- neve accumulata
- neve sciolta e poi nuovamente ghiacciata
- prima neve incrostata in primavera
- neve incrostata in lastre sottili
- neve accumulata su una riva alta, rendendola più ripida
- cornicione di neve su una montagna
- cumuli pesanti di neve
- neve ridotta in fanghiglia
- neve tra i rami degli alberi
- lanugine o polvere di neve

In realtà la letteratura riporta diversi esempi di specializzazione linguistica: è cosa nota infatti che gli sciatori esperti o anche gli abitanti di alcune zone alpine in Italia utilizzino vari termini per indicare nella neve differenze morfologiche, tattili o in altro modo recepite tramite sensi; lo studio di Nelson è però interessante perché permette un confronto con un vocabolario specifico particolarmente ricco a riguardo di un tema che è classicamente affrontato da molti anni.

Si supponga quindi che l'italiano, nel momento in cui ha inizio la conversazione, sia in grado da un punto di vista linguistico di distinguere

solo in base a due vocaboli ciò che dal suo punto di vista è l'acqua in stato solido:

- neve
- ghiaccio

Si immagini quindi che i due protagonisti si trovino a camminare in un ambiente congeniale al Koyukon, nel loro tentativo di comunicazione potrebbero quindi rendersi conto di non “vedere” il mondo esattamente allo stesso modo¹²: uno strumento che voglia rendere conto di questo fenomeno dovrebbe sfruttare i dati comportamentali raccolti nel corso di simili osservazioni e riuscire a formulare delle ipotesi di funzionamento coerenti con i dati stessi. In particolare si deve essere in grado di dare una spiegazione di come si arrivi a strutturare la memoria in modo da consentire questa complessità nella distinzione (ricchezza o scarsità di categorie a seconda del caso) e quale sia in questa struttura la funzione del linguaggio nel senso della denotazione. Infine, dato che si è citato Whorf, si potrebbe anche tentare di verificare con lo strumento grafico in che misura la conoscenza della lingua influenzi la percezione della realtà.

Inoltre, una volta superate le iniziali difficoltà, non è escluso che con qualche sforzo l'italiano inizi a utilizzare i nuovi termini, imparando a formulare nuove categorie e distinzioni: il dispositivo del sistema neurale non è statico e lo strumento analitico che si intende utilizzare non dovrebbe quindi essere limitato solo a condizioni puramente ipotetiche, cristallizzate nel tempo. Simmetricamente, il Koyukon dovrebbe essere messo in grado di associare alle proprie molte categorie di neve le poche offerte dall'italiano, sovrapponendo (senza sostituirle) le due lingue almeno in questo settore. Una traduzione perfetta, derivante da una completa identità di significato, dovrebbe però risultare estremamente complessa, se non

impossibile, in mancanza di termini sufficientemente specifici o al contrario sufficientemente vaghi presenti nelle rispettive lingue.

Secondo definizione, perché uno stimolo possa essere elaborato, ovvero inserito in una determinata categoria, deve poter essere percepito: ciò che il sistema non riceve dall'ambiente non è oggetto di elaborazione. Per prima cosa quindi è necessario fugare il dubbio che i due protagonisti possano recepire il mondo in modo inconciliabile: il sistema-corpo che riceve segnali dall'esterno (e dall'interno grazie al senso enterocettivo) è certamente molto simile dato che, trattandosi della stessa specie animale, non si è in presenza di recettori dedicati ad una intera gamma di stimolazioni ambientali in modo esclusivo. In altri termini entrambi i soggetti elaborano vettori costituiti da segnali di ingresso "confrontabili", ovvero, per riprendere un esempio già menzionato, non si è nel caso in cui si tentava un confronto tra la percezione di un pipistrello con quella di un uomo. Se è vero che il numero dei recettori e ciò a cui questi sono dedicati sono caratteristiche che risultano simili, bisogna anche considerare che l'organizzazione dell'architettura neurale che permette l'elaborazione dei segnali di ingresso inviati dai recettori sensoriali non può differire in modo tale da rendere i due sistemi inconciliabili. La differenza biologica dovrebbe essere insufficiente a spiegare le differenze comportamentali osservate anche in base ad una evidenza sperimentale: se i motivi di incomunicabilità fossero organici, non ci sarebbe alcun modo per i due uomini di imparare o addirittura solo comprendere distinzioni e categorie effettuate dall'altro (si supponga ad esempio di provare a spiegare ad un non-vedente cosa siano i colori). Sotto queste premesse, se non si intende negare il fatto che all'atto pratico uno dei due individui non è in grado di distinguere facilmente ciò che all'altro appare come diverso, allora si dovrà ammettere che le differenze sono in fase di elaborazione dei segnali,

tenendo conto che strutture simili permettono solo alcuni generi di trasformazione dell'informazione: il metodo grafico può quindi essere utilizzato nel tentativo di individuare una spiegazione.

I milioni di recettori propri di un essere umano devono quindi essere ridotti a due unità, a causa delle note problematiche legate alla rappresentabilità. Un qualsiasi stimolo ambientale interagirà quindi con i due recettori dei protagonisti generando segnali di ingresso non identici, ma confrontabili: il vettore bidimensionale del segnale di ingresso così generato andrà ad individuare un punto (ed uno solo) nello spazio, ovvero in questo caso nel piano.

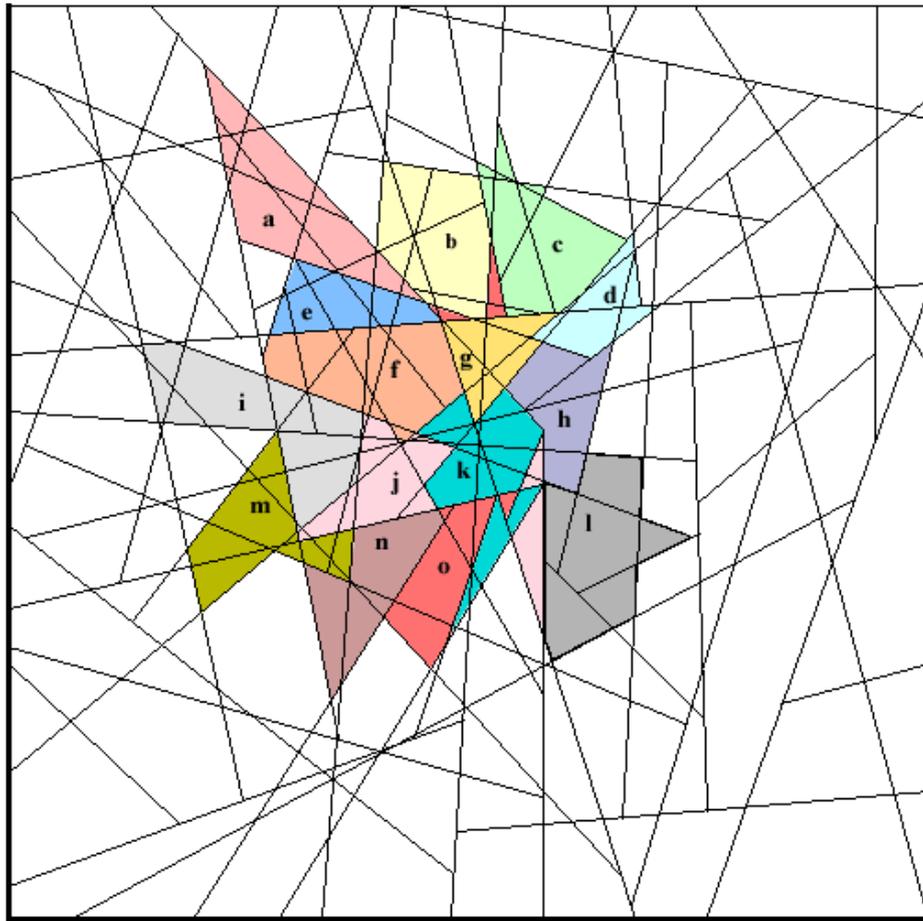
Durante il suo movimento nell'ambiente, ogni sistema è continuamente soggetto a stimolazioni che generano un flusso continuo di segnali: ognuno di questi individua un punto nello spazio di calcolo della rete neurale e lo colloca in una determinata area rispetto alle frontiere decisionali generate dai neuroni di primo livello; i segnali sono così ricondotti ad insiemi in modo che gli elementi che vi appartengono siano considerati dal sistema equivalenti. Il vettore composto dagli stati di attivazione dei neuroni di primo livello corrisponde graficamente ad un'area (si veda la rappresentazione grafica 3.1); questo vettore è assegnato a tutti i vettori costituiti dai segnali di ingresso che cadono nella stessa area, sarà a sua volta oggetto di ulteriore elaborazione da parte degli strati neurali successivi. Le aree descritte dalle frontiere decisionali possono a loro volta essere aggregate in aree maggiori corrispondenti (in senso matematico) ad insiemi più ampi di vettori o (in senso grafico) ad aree minori colorate allo stesso modo (rappresentazione grafica 3.2).

Una parte delle frontiere decisionali, così come degli aggregati, dipende dalla stessa conformazione della rete che si modella costruendo i canali di passaggio dei segnali in base alle già citate regole proprie della

sinaptogenesi del periodo perinatale. Tuttavia è probabile che, superata lo stadio di crescita iniziale, la rete neurale debba ricorrere ad altri strumenti che le consentano di mantenere la propria elasticità, continuando a generare aggregati di aree: l'ipotesi che qui si intende sostenere è che l'apprendimento di un ricco vocabolario specifico consista appunto nella strutturazione di questi aggregati.

I segnali recepiti dal sistema raggiungono quindi i neuroni di primo livello e qui vengono trasformati (e classificati) una prima volta: il vettore di uscita da questo strato neurale si propaga seguendo più direzioni tra loro fisicamente separate in modo modulare. Come accennato nella prima sezione di questo lavoro, molte aree della corteccia sono dedicate in modo specifico a determinati tipi di elaborazione ed entrano in funzione quando sono eseguiti alcuni compiti cognitivi e non altri. Il modulo dedicato alla elaborazione del linguaggio sarebbe quindi almeno in parte influenzato dall'apprendimento di un vocabolario che, consentendo la riconfigurazione dei vettori proposti dagli strati neurali precedenti, rende possibile attribuire agli stimoli l'appartenenza o meno a categorie specifiche. Alla luce di quanto esposto sulla prima fase di apprendimento e strutturazione della memoria, la rappresentazione grafica 3.5 fornisce una spiegazione più immediata di come i segnali di ingresso siano elaborati da un individuo ad elevata competenza di riconoscimento nel settore specifico in esame, quindi nell'esempio proposto, il nativo Koyukon a riguardo delle tipologie di neve.

Supponendo infatti che questi disponga di due soli recettori, l'architettura della sua rete neurale gli avrebbe permesso in potenza di distinguere un certo numero molto elevato di categorie diverse (le aree delimitate dalle rette nere), ma la sua cultura, espressa in questo caso specificatamente nel linguaggio, gli ha consentito di riorganizzare queste



- | | |
|--|---|
| a = neve profonda | i = neve incrostata in lastre sottili |
| b = neve cadente | j = neve accumulata su una riva alta, rendendola più ripida |
| c = tempesta di neve | k = cornicione di neve su una montagna |
| d = neve per terra | l = cumuli pesanti di neve |
| e = neve a grani sotto la superficie | m = neve ridotta in fanghiglia |
| f = neve accumulata | n = neve tra i rami degli alberi |
| g = neve sciolta e poi nuovamente ghiacciata | o = lanuggine o polvere di neve |
| h = prima neve incrostata in primavera | |

Rappresentazione Grafica 3.5

Rappresentazione grafica ipotetica del fenomeno della denotazione in un soggetto con elevata competenza linguistica. In questo caso il sistema riesce a distinguere i segnali di ingresso relativi alla neve in quindici categorie diverse, strutturate sulla base del linguaggio utilizzato.

categorie in quindici aree maggiori, contrassegnate da colore e lettera (si suppone in questo caso che le aree bianche, senza etichetta, siano da attribuire a stimoli che non sono attinenti con la neve). Occorre sottolineare come classicamente la denotazione è intesa come un riferimento che a determinate parole assegna specifici oggetti (siano essi ideali o reali), in

questo caso si presenta invece un modello simmetrico dato che il punto di partenza dovrebbe essere quello dell'oggetto e il punto di arrivo la parola. In effetti però si può rilevare come non sia esattamente un ente presente nell'ambiente l'oggetto dell'elaborazione del sistema, ma un segnale di ingresso in parte causato dall'ambiente ed in parte causato dal senso enterocettivo, elaborato inoltre già in partenza dalla semplice presenza e selezione dei recettori. In questo senso è possibile allora affermare che, coerentemente al modello proposto, a vettori di segnali di ingresso più che a oggetti, il sistema assegna dei valori corrispondenti ad una serie di fonemi, le parole.

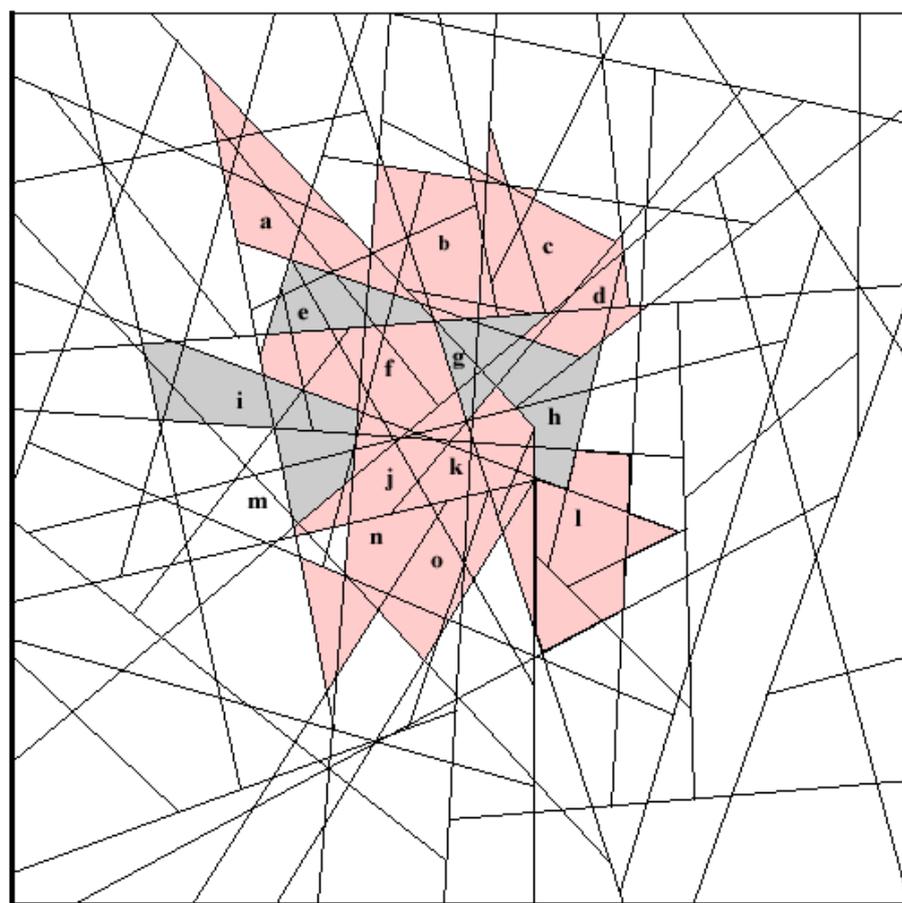
3.7 Verso l'intraducibilità.

Il riconoscimento e la categorizzazione di un qualsiasi stimolo recepito dal sistema dipende allora dalla ricezione (nel modo complesso abbondantemente esposto), dall'architettura della rete e dalla formazione di "aggregati di aree" o "aree di livello" che costituiscono assegnazioni di valore in base anche all'apprendimento del vocabolario proprio della lingua conosciuta.

Rispetto al protagonista nell'esempio in discussione, un qualsiasi altro Koyukon presumibilmente avrà frontiere decisionali disposte in modo diverso, ma potrà compiere lo stesso tipo di assegnazione relativamente ad aree del piano non identiche ma confrontabili rispetto a quelle qui esposte. Come conseguenza i due parlanti la stessa lingua, nonostante possano contare su una competenza linguistica molto simile e sulla formulazione di un pari numero di categorie, non avranno una elaborazione perfettamente identica del percepito. Se però la fase di apprendimento è stata simile, si rileveranno problemi di comunicazione solo in condizioni limite, ovvero in presenza di stimoli che siano situati a margine di un'area, in modo che dal

punto di vista di un primo soggetto un segnale sia ricondotto ad esempio all'area gialla (b=neve cadente), ma dal punto di vista di un secondo lo stesso fenomeno ambientale generi un segnale di ingresso tale da essere ricondotto all'area verde (c=tempesta di neve). Come si è già visto il sistema può subire diversi tipi di alterazione (sia artificiali che naturali) che ne possono distorcere le capacità di interpretazione: uno stesso sistema posto in due momenti diversi di fronte allo stesso identico stimolo potrebbe quindi riconoscerlo in modo differente, assegnando un vocabolo diverso e quindi vivendo in questo senso una esperienza discordante con quella precedente, nonostante le identiche condizioni fisiche di generazione dello stimolo o del segnale di ingresso.

Tornando all'esempio originario, è possibile mostrare quali possano essere le differenze con un italiano che, come specificato, non abbia dimestichezza con il genere di stimoli legati a paesaggi innevati. Quest'ultima rappresentazione grafica (3.6) presenta delle frontiere decisionali identiche a quelle esposte nella precedente: si tratta di una scelta dovuta ad esigenze esplicative, ma si può immaginare facilmente come a frontiere diverse corrispondano aree dalla forma e della posizione solo parzialmente simili. Ciò che invece salta immediatamente agli occhi rispetto alla seconda rappresentazione è la mancanza di categorie o meglio la riduzione dalle originarie quindici alle attuali due, come conseguenza della scarsa suddivisione del piano in aggregati di aree. In questo caso inoltre la categoria "neve ridotta in fanghiglia" (m) non è neppure più riconosciuta come una tipologia di neve e lo stimolo sarà ricondotto ad un'altra area (etichettata ad esempio con il termine "fango"). I problemi di comunicazione tra i due individui sono notevolmente superiori rispetto al caso dei due Koyukon: la presenza o meno di categorie, come conseguenza della conoscenza di parole adeguate, permette una differente



a/b/c/d/f/j/k/l/n/o = neve

e/g/h/i = ghiaccio

Rappresentazione Grafica 3.6

Rappresentazione grafica ipotetica del fenomeno della denotazione in un soggetto con scarsa competenza linguistica. In questo caso il sistema riesce a distinguere i segnali di ingresso relativi alla neve in sole due categorie: si noti inoltre che rispetto alla 3.5, l'area etichettata con la lettera m è considerata da questo sistema come "esterna" al campo di analisi, ovvero non è considerata come una tipologia di neve.

interpretazione degli stimoli e quindi della realtà che circonda il soggetto. In condizioni normali, come quelle proprie di questo esempio, l'essere privi di una determinata categoria non implica che sia impossibile cogliere le differenze tra due elementi prototipici, nel caso fossero evidenziate: le frontiere decisionali continuano a compiere il loro operato, sebbene le aree da queste descritte siano poco utilizzate dal livello neurale dedicato alla distinzione di questi termini. Quando però il soggetto con scarsa

competenza non dedichi particolari risorse nel cogliere differenze, anche il ricordo dell'esperienza vissuta si uniformerà alla genericità delle categorie: se il Koyukon ricorderà di aver esperito un certo numero di tipologie di neve durante gli spostamenti, l'individuo inesperto ricorderà solo un indistinto paesaggio nevoso e ghiacciato (magari ricordando altri tipi di informazioni che gli dovessero essere più congeniali)¹³.

Si è cercato quindi di dare una spiegazione del come sia possibile una diversa percezione delle esperienze sensibili (nel senso di formulazione di categorie) e di quale possa essere il ruolo del linguaggio nella strutturazione della memoria e nella fase di apprendimento, in particolare nei primi anni di vita. Tuttavia, come preannunciato, lo strumento grafico sarebbe debole non potesse avanzare alcune ipotesi anche sulle modalità di apprendimento in fase adulta.

Una sinaptogenesi in fase adulta permetterebbe ovviamente una spiegazione rapida dell'apprendimento, dato che certamente quest'ultimo non si limita per nostra fortuna al solo periodo perinatale, tuttavia è possibile prendere in considerazione una strada diversa che consente di aggirare il ricorso a questa ipotesi, dato che per diversi motivi risulta poco convincente¹⁴. Un sistema nervoso biologico infatti non elabora solo su due o tre livelli diversi di neuroni e quindi presenta un numero molto elevato di aggregati di aree sia in senso modulare, ovvero gli stessi segnali sono analizzati contemporaneamente da più settori distinti dell'encefalo, sia in senso verticale, permettendo una serie di rielaborazioni a livelli successivi sulle stesse categorie.

L'ipotesi che si propone è che il linguaggio sia una manifestazione osservabile della capacità da parte degli strati neurali più "profondi" di continuare nel corso della vita dell'organismo a costituire aggregati o modificare quelli esistenti in base alle esperienze del sistema. Il fenomeno

richiede la possibilità di fissare una certa tipologia di trasformazioni di vettori in modo che resti stabile almeno per un tempo sufficiente a garantire l'effettiva memoria di un essere umano: l'intervento di determinate sostanze chimiche endocrine potrebbe garantire questo genere di alterazioni che, da un punto di vista grafico, comporterebbero l'organizzazione non statica delle categorie aggregate.

Se effettivamente il comportamento tenuto dalla rete è quello ipotizzato, a prescindere da quali ne siano le cause, da un punto di vista grafico è possibile allora accennare ad una interpretazione del problema dell'intraducibilità. Si immaginino le rappresentazioni grafiche 3.5 e 3.6 come appartenenti allo stesso "individuo", ma relative a due livelli neurali diversi: è possibile allora concepire un sistema che ad un insieme di segnali di ingresso associ una determinata parola, ma ne associ una seconda in una lingua differente ad un insieme diverso, parzialmente sovrapposto al primo.

Il soggetto quindi conoscerebbe entrambe le lingue ed avrebbe un'idea chiara dei valori di assegnazione da attribuire ad ogni termine, ma non per questo sarebbe in grado di compiere una traduzione perfetta: nel caso in esame, passando dall'italiano al linguaggio Koyukon mancherebbe un termine sufficientemente vago e ovviamente nel processo inverso non sarebbe possibile trovare un termine sufficientemente specifico. Sfruttando i grafici è possibile concepire una serie di altri esempi: anche nel caso in cui l'italiano disponesse di quindici termini per indicare le tipologie della neve, non è detto che le categorie sviluppate vadano a coincidere nelle due lingue. Come si è mostrato, differenze anche nel caso di due parlanti la stessa lingua, per quanto minime, non generano problemi di comprensione in buona parte delle discussioni comuni, ma possono crearne in casi specifici o ambigui, ovvero nel caso di vettori di ingresso che localizzino punti collocati ai margini delle aree individuate dalle frontiere.

La mancanza di una corrispondenza biunivoca tra aree o insiemi di vettori di segnali di ingresso e le relative parole non può essere spiegata con reti anterograde semplici come quelle proposte in buona parte di questo studio: è necessaria l'introduzione di un sistema modulare che consenta la gestione di un numero virtualmente infinito di settori neurali separati che elaborino contemporaneamente gli stessi segnali di ingresso. Così come due neuroni di primo livello sono raggiunti nello stesso istante (in un modello ideale) dai segnali di ingresso, allo stesso modo due moduli, costituiti da gruppi connessi di neuroni, elaborano i segnali che vengono inviati loro dai neuroni di un ipotetico strato comune di base.

E' interessante infine notare come, prendendo in considerazione un unico modulo, le elaborazioni successive degli stessi segnali non possano che generare categorie sempre più generiche nelle trasformazioni vettoriali (come già dimostrato nel corso della seconda sezione di questo lavoro). Da un punto di vista linguistico è possibile ipotizzare come questo fenomeno sia alla base della formulazione delle "classi" intese come quei termini inclusivi, che riuniscono assegnazioni diverse e parole differenti in base a particolari comuni considerati dal sistema come determinanti. Lo stesso Koyukon nell'esempio proposto in questa fase, è in grado di differenziare molti generi di neve, ma dispone anche di un sedicesimo termine, che include tutti i precedenti e che di norma è tradotto semplicemente come "neve". Una schematizzazione esemplificativa vedrebbe un neurone posto in cima alla rete neurale che genera la divisione nelle quindici categorie ormai note: questa unità di calcolo dispone come sempre di due soli stati e quindi dividerà il proprio segnale di ingresso in due categorie, presumibilmente separando tutto ciò che è neve da ciò che non lo è, ovvero due vere e proprie classi che racchiudono intere gamme di assegnazioni specifiche. Ovviamente il riconoscimento e l'attribuzione di una parola ad

un segnale non è concepibile in termini di singoli neuroni, ma di interi settori neurali quando non del sistema nel suo complesso; a parità di struttura, le regole di attribuzione coincideranno sempre con quelle sviluppate per il calcolo neurale, ovvero l'essenza del processamento distribuito in parallelo.

Appendice

Per concludere questa presentazione del metodo grafico di rappresentazione del calcolo neurale è appropriato presentare alcuni dei punti deboli emersi nel corso del suo sviluppo. Sulle prime il modello potrebbe apparire eccessivamente rigido: il sistema dotato di rete neurale compie infatti una attribuzione automatica ed inconsapevole di aree dello spazio n -dimensionale ai vettori costituiti dai segnali di ingresso; questo meccanismo potrebbe essere letto come una riproposizione del modello associazionista in base al quale vi è un legame rigido tra stimoli a risposte. In realtà però non bisogna dimenticare almeno due fattori che dovrebbero scongiurare la tentazione di ipotizzare modelli perfettamente predittivi applicabili a sistemi complessi: il primo riguarda l'intervento dinamico nelle reti neurali biologiche delle componenti chimiche rappresentate da neurotrasmettitori e neuromodulatori; il secondo è costituito da quei fenomeni del tutto casuali ed imprevedibili che interessano la trasmissione dei segnali nei conduttori (si consideri ad esempio che un singolo impulso in un treno di segnali può essere "perso" lungo i canali assionali).

Probabilmente le fragilità più consistenti del modello possono essere invece individuate nelle due fasi di passaggio e conversione: dall'analisi

degli impulsi nervosi neurali alle corrispondenti disequazioni matematiche e nel passaggio da queste ultime alle rappresentazioni grafiche.

Si ricorderà che il primo momento critico è stato rilevato nella scelta di un intervallo di tempo di riferimento che permettesse di dare origine ad una disequazione lineare: le frequenze dei treni di impulsi nervosi possono variare ed il rischio che un intervallo risulti comunque non adeguato non può essere trascurato. Il problema potrebbe essere risolto con una funzione che consideri la parte intera positiva di un'onda sinusoidale, con una incognita che renda la frequenza variabile, ma questo causerebbe una revisione integrale del modello grafico in modo non facilmente prevedibile. La scelta di optare per gli insiemi di disequazioni lineari e le conseguenti frontiere decisionali costituite da rette o segmenti è quindi dovuta anche ad esigenze di efficacia e versatilità d'uso: non bisogna trascurare il fatto che un eventuale tentativo di percorrere altre strade, magari più fedeli al comportamento neurale naturale, dovrebbe essere rivolto allo sviluppo di un modello che rimanga gestibile dal punto di vista grafico in modo che lo strumento così delineato non risulti poi inutilizzabile.

Il secondo punto di fragilità è connesso alle semplificazioni che sono state adottate in modo da rendere gestibili le rappresentazioni grafiche. Come dichiarato più volte nel corso del lavoro, è mia opinione che la riduzione del numero dei recettori a sole due unità non costituisca un problema significativo nel modello, dato che è possibile immaginare quelle generalizzazioni che consentono di estendere le osservazioni compiute sul piano in ambiti multidimensionali. Un problema di difficile soluzione potrebbe invece essere rappresentato dai due elementi di difformità tra le architetture artificiali studiate nella seconda sezione di questo lavoro e le architetture naturali: in particolare si ricorderà come già il recettore compia una prima trasformazione generando un segnale di ingresso nel discreto

rispetto allo stimolo offerto nel continuo dall'ambiente. In secondo luogo, a differenza che nei modelli proposti, in natura accade molto spesso che un recettore, unità di input, conduca il proprio segnale ad un singolo neurone di primo livello lungo il canale assonale: vi sono anche casi non del tutto eccezionali in cui un recettore conduca il segnale a più di un neurone, ma mai avviene che sia connesso con tutti i neuroni di primo livello (ovvero con tutte quelle unità che ricevono segnali da almeno un recettore), come invece era ipotizzato nelle strutture artificiali.

La prima questione resta al momento senza risposta: l'elaborazione del segnale è stata qui analizzata saltando il passaggio della prima trasformazione in treni di impulsi del segnale continuo ambientale. Un modello più complesso dovrebbe riuscire a tenere conto anche di questa trasformazione, dal momento che essa non differisce in modo decisivo dall'analisi computazionale descritta a riguardo del calcolo neurale.

La seconda differenza strutturale provocherebbe invece delle variazioni consistenti nel modo in cui i vettori costituiti dai segnali di ingresso al sistema possono essere trasformati. Il punto centrale consiste nella impossibilità di individuare una condizione identica a quella discussa per i neuroni di primo livello: nei sistemi biologici, data la corrispondenza spesso biunivoca tra recettori e neuroni di primo livello, il superamento della soglia fondamentale nel calcolo delle frontiere decisionali avviene senza quell'integrazione dei segnali che a prima vista sembra fondamentale nel modello grafico.

Sembrerebbe quindi che si renda necessaria una trasformazione nel metodo grafico che renda conto di queste differenze e che quindi il procedimento presentato in questo studio perda di validità. In effetti questo rischio esiste, ma possono essere evidenziati una serie di aspetti che possono permettere di conservare nel modello originale una certa validità.

Per cominciare resta valido il ragionamento che vede una dimensione del vettore di ingresso per ogni recettore del sistema/organismo in esame. In secondo luogo, il modello grafico riesce a rendere conto parzialmente del cambiamento: quando vi è una corrispondenza biunivoca tra recettore e neurone di primo livello si generano rette parallele all'asse corrispondente al segnale di ingresso (si veda a questo proposito la rappresentazione grafica 2.7). Considerando i soliti due segnali di ingresso e per essi due neuroni di primo livello, la rappresentazione grafica consisterà in due rette parallele rispettivamente all'asse delle ascisse e a quello delle ordinate; il piano risultante è diviso quindi in quattro regioni e queste possono essere riconfigurate da eventuali strati neurali successivi in modo da generare le categorie di livello relative.

Come conseguenza, anche supponendo per ipotesi l'analisi di una architettura che presenti solo connessioni biunivoche tra recettori e neuroni di primo livello, resta valido l'impianto di fondo, ma si perde irrimediabilmente quella varietà di frontiere ed inclinazioni rispetto agli assi che sono state rappresentate graficamente. In questi termini, pare che le frontiere nei sistemi naturali siano molto spesso ortogonali tra loro, ma conservino comunque le caratteristiche descritte di "slittamento", in seguito all'intervento di fattori chimici, e quelle stesse condizioni analitiche che determinano frontiere discontinue nelle rappresentazioni grafiche.

Lo sviluppo di categorie così modificato perde di potenzialità nella sua rappresentazione grafica: i modelli rappresentabili si riducono ad un massimo di tre recettori e quindi, data la corrispondenza tra questi ed i neuroni di primo livello, altrettante frontiere decisionali. Il limite computazionale corrisponderebbe allora a quello offerto dalle otto categorie di primo livello e a cascata non più di otto in qualsiasi altro livello successivo. Se si desiderasse restare perfettamente aderenti al

modello naturale, solo all'aumentare del numero dei recettori sarebbe possibile incrementare indirettamente le capacità di separazione e generazione di categorie della rete, ma questa scelta comporterebbe la non rappresentabilità delle figure n -dimensionali generate.

Il modello grafico qui presentato, al prezzo di un nuovo distacco dal modello biologico di origine, permette invece una resa vivida del fenomeno forzando il valore delle connessioni solo nel primo livello. Con questo accorgimento il numero di categorie generate aumenta, ma non è più necessario rinunciare alle rappresentazioni grafiche, perdendo così ogni eventuale vantaggio nato dall'utilizzo dello strumento.

Alla luce di queste fragilità strutturali, l'utilizzo del modello grafico si è presentato però come sufficientemente robusto da poter essere utilizzato per l'analisi di ambiti molto distanti tra loro quali: riconoscimento, memoria, apprendimento, competenza, errore ed infine denotazione linguistica (fenomeni visti sia in condizioni normali di funzionamento della rete sia in presenza di alterazioni fisiche o chimiche, naturali o artificiali). Non si può escludere che modelli più complessi, dotati di un asse che permetta di tenere in considerazione lo scorrere del tempo, divengano sufficientemente validi da poter essere utilizzati per una serie di altri processi cognitivi dando ad esempio una spiegazione del funzionamento delle procedure di movimento che necessariamente richiedono che lo studio tenga conto del contesto temporale, analizzando il sistema in un arco di tempo più lungo dell'istante arbitrariamente breve fin qui ipotizzato.

NOTE

1. STRUTTURA

- ¹ E' stato fatto notare che il termine "processamento" potrebbe essere sostituito più correttamente in italiano con il termine "elaborazione", tuttavia in ambito connessionista si fa spesso ricorso a questo anglicismo in quanto traduzione letterale del titolo dell'opera cardine di questo paradigma, a cui infatti qui ci si riferisce: "PDP – Parallel Distributed Processing".
- ² E. Boncinelli "Il Cervello, la Mente e l'Anima", 1999.
- ³ Ovviamente quanto descritto non avviene consapevolmente e capita infatti che vi sia produzione di determinate sostanze inibitorie in un momento che, da un punto di vista razionale, risulta "sbagliato": l'evoluzione ha avuto il compito di selezionare quegli organismi che, per motivi casuali, si trovavano a rispondere meglio alle situazioni proposte dall'ambiente. In altri termini, se gli svantaggi legati ad uno di questi meccanismi creatisi per caso dovessero superare i vantaggi, la specie in questione avrebbe come conseguenza meno probabilità di sopravvivere.
- ⁴ Un insieme di equazioni o disequazioni che abbiano valore contemporaneamente, è definito come "sistema". Tuttavia mi è stato fatto notare dal Prof. Gori come questo termine si presti ad un fraintendimento, dal momento che i sistemi di equazioni o disequazioni sono di norma utilizzati per la determinazione delle variabili presenti nelle singole equazioni o disequazioni. Per questo motivo si è preferito optare per un termine neutro come "insieme".

- ⁵ In particolare si veda la sesta ed ultima meditazione ne “Meditazioni metafisiche sulla Filosofia Prima” nella quale è esposto un paragone (pag 80 nell’edizione Laterza del 2000) tra la trasmissione degli stimoli per le vie nervose e l’azione meccanica del tirare un corda tesa.
- ⁶ Il termine “connessionismo” sfortunatamente è utilizzato in modo ambiguo. Con esso si intendono sia la corrente di pensiero di cui è stato iniziatore E.L. Thorndike negli ultimi anni del XIX° secolo, sia le ricerche sul *perceptron* condotte da F. Rosenblatt alla fine degli anni cinquanta e sviluppate negli anni ottanta da D.E. Rumelhart e J.L. McClelland. I due approcci, oltre che essere separati da più di sessant’anni, differiscono sotto ogni aspetto: il primo è una rielaborazione dell’associazionismo classico, dove quindi il termine “connessione” è utilizzato per indicare la concatenazione esistente tra uno stimolo ambientale e la risposta che a questo viene data dall’organismo soggetto d’esame. All’interno di questo paradigma di ricerca, lo scopo dello sperimentatore è quindi quello di verificare quali occorrenze esistano tra stimoli ed i conseguenti comportamenti degli organismi, stabilendo delle connessioni di tipo probabilistico: sarebbe così irrilevante ai fini di questa ricerca, o meglio privo di senso, condurre uno studio sull’organismo in sé, decontestualizzato rispetto agli stimoli ambientali.

Il “connessionismo” di stampo più moderno fa invece riferimento alle connessioni proprie delle reti neurali ed alla propagazione dei segnali attraverso queste stesse vie. Se da un lato è possibile vedere anche qui un legame associativo tra stimolo e risposta come trasformazione dei segnali attraverso la rete neurale, cambia invece totalmente il punto focale dell’attenzione del ricercatore. Secondo una prospettiva funzionalista questo secondo connessionismo va interpretato come uno dei sistemi in grado di elaborare e trasformare segni, strutturalmente diverso da una macchina di Turing, ma concettualmente simile. La prospettiva materialista, invece si concentra sull’architettura fisica ed il funzionamento del sistema: solo in una fase successiva hanno importanza le risposte dell’organismo agli stimoli offerti dall’ambiente. Lo studio dei processi cognitivi non può prescindere quindi in questo senso dall’elaborazione di modelli che tengano conto delle conoscenze disponibili sull’organismo in generale e sul sistema nervoso in modo particolare.

In questo studio quando si usa il termine “connessionismo” si fa ovviamente riferimento all’ultima accezione qui esposta, relativa alla seconda delle due Scuole di pensiero.

⁷ P.S Churchland e T. J. Sejnowski "Il Cervello computazionale", 1992.

⁸ In particolare si veda: M. Tomasello “The Cultural Origins Of Human Cognition”, 1999.

⁹ I casi esposti da O. Sacks da questo punto di vista sono esemplari: i suoi pazienti spesso cercano di sopperire ai disturbi provocati da deficienze strutturali neurali facendo leva su quelle capacità cognitive su cui si sentono più sicuri. Anna H., colpita da una forma di alessia degenerativa, si basava per esempio sul riconoscimento di forme e colori per fare la spesa quotidianamente (si veda: O. Sacks “Il Caso di Anna H.”, 2003).

3. MENTE INTEGRA

¹ Si pensi ad esempio al comportamento tenuto da alcuni animali, quali alcune specie della famiglia dei Tinamidi, che fingono di essere feriti e di non riuscire a volare per poter attirare un predatore, allontanandolo dal luogo in cui sia nascosto il nido, a cui si fosse avvicinato. Nell’approccio comportamentista, una determinata configurazione di stimoli necessita l’organismo ad eseguire una specifica risposta: senza l’intervento di stati mentali è quindi complesso dare una spiegazione del comportamento “ferito” in assenza di una ferita reale.

² Churchland P.S. e Sejnowski T.J., 1992.

³ In particolare si veda: A.R. Damasio “Alla ricerca di Spinoza – Emozioni, sentimenti e cervello”, 2003.

⁴ Nelle pagine successive di questo studio si farà riferimento al senso enterocettivo così come utilizzato da A. Damasio ne “Alla ricerca di Spinoza – Emozioni, sentimenti e cervello”, ovvero come quel senso che “informa il cervello sullo stato interno del corpo”.

Tuttavia, in una discussione tenuta con il dott. Mennecozzi, mi è stato fatto notare come la suddivisione dei sensi in insiemi riconoscibili sia meno semplice di quanto comunemente non si creda: lo stesso senso definito come enterocettivo da Damasio

è molto simile al concetto di propriocezione espresso da Sacks. In una classificazione ad opera di M. Stadler, F. Seeger e A. Raeithel (1975) vengono individuati tredici distinti organi di senso quali: vista, udito, tatto, olfatto, gusto, senso della pressione e del contatto, senso della temperatura, senso del dolore, sensibilità viscerale, senso della posizione, senso della tensione e della forza, senso dello stato e del movimento e infine senso del movimento rotatorio. Negli ultimi anni sono stati presentati altri modelli di classificazione: ai fini di questo studio è sufficiente ricordarne un secondo come termine di paragone, ad opera di D. Riccò (1999). In questo caso vengono individuati otto sistemi sensoriali ognuno dei quali a sua volta diviso in sensazioni specifiche; possono così essere distinti i sistemi sensoriali: visivo, uditivo, tattile, propriocettivo (posizione, movimento e forza), vestibolare (equilibrio e orientamento), olfattivo, gustativo e viscerale (dolore, fame, sete e sensazioni specifiche).

⁵ Si fa riferimento al caso clinico di Virgil, descritto da O. Sacks in “Un Antropologo su Marte” (pp. 159-214).

⁶ In particolare si veda: P.M. Churchland “The Engine of Reason, the Seat of Soul”, 1995.

⁷ Prima sezione, pag. 19 del presente lavoro.

⁸ Il caso è descritto nel dettaglio da Damasio in: “Alla ricerca di Spinoza – Emozioni, sentimenti e cervello”, 2003.

⁹ Si veda: Fried I. et al., 1998: Electric current stimulates laughter, in “Nature”, 391, pp. 650.

¹⁰ Il termine “competenza” è di difficile definizione e deve la sua ambiguità principalmente alle differenze d’uso nei contesti comportamentista e cognitivista. In particolare le differenze si registrano sull’aderenza ipotizzata tra competenza e prestazione, ma altri temi importanti sono anche: memoria, abilità attuative e creatività. Trattando lo sviluppo di un modello teorico, questo studio fa un uso ristretto del termine limitando il riferimento in particolare al riconoscimento, ovvero intendendo la competenza come l’abilità di distinguere tra loro stimoli diversi attribuendo loro categorie separate, quali che siano.

¹¹ Nel paragrafo successivo si sosterrà la tesi dell’intraducibilità, tuttavia, come spesso accade, questo tipo di argomentazioni è paradossalmente sostenuto sulla base di ricerche condotte sull’uso di termini in lingue diverse, tradotti. In questo caso

particolare i termini Koyukon utilizzati per distinguere le tipologie di neve sono stati resi da Nelson nella sua lingua (inglese) con delle brevi descrizioni e a loro volta queste ultime sono qui riportate tradotte in italiano. Per questo motivo ho pensato di appoggiarmi ad una traduzione compiuta dal Dott. Secchi (2004), che gentilmente mi ha permesso di scaricare su di lui alcune responsabilità teoriche.

In ultimo bisogna rilevare come lo studio originale comprendesse sedici termini, il primo dei quali tradotto semplicemente come “neve”: non è stato utilizzato in questa prima fase in quanto inteso come termine indicante l’intera classe di esperienze sensibili, ma sarà ripreso nelle pagine successive di questo lavoro.

¹² Occorre specificare a questo riguardo come le differenze di approccio agli stimoli provenienti dall’ambiente non debbano portare alla conclusione che un soggetto con scarsa competenza abbia una esperienza del mondo notevolmente diversa rispetto a quella propria del soggetto competente. Restando al livello di generazione del segnale di ingresso questi sono, come si vedrà, confrontabili: i livelli di elaborazione successivi presentano invece delle differenze. Per essere più chiari si consideri che anche chi è incompetente in materia è in grado, se interrogato in modo specifico, di descrivere le differenze sensibili che passano tra la “neve incrostata in lastre sottili” e la “lanugine o polvere di neve”. Tuttavia una mancata distinzione si concretizza nella fase di registrazione delle due differenti stimolazioni da parte del sistema: il soggetto incompetente classificherà entrambe come neve, trascurando le differenze come un “rumore di fondo” o un disturbo che comunque non è in grado di far cadere il vettore del segnale di ingresso in un’area dello spazio esterna alla categoria, molto vasta, a cui è dato il nome generico di “neve” o “ghiaccio”. L’ipotesi è che questa ambivalenza del sistema (di norma generico, ma in grado se necessario di leggere le differenze) sia resa possibile dalla presenza delle frontiere decisionali: nel soggetto a scarsa competenza molte aree minori sono aggregate tutte in un’unica area più vasta, ma dal punto di vista dell’elaborazione compiuta dai neuroni di primo livello le distinzioni restano efficaci, sebbene la scarsa ricchezza linguistica non ne richieda l’utilizzo nelle trasformazioni successive.

¹³ La possibilità appena descritta di superare la scarsa competenza linguistica imparando a prestare attenzione a particolari altrimenti ignorati, è valida sotto una restrizione assolutamente non trascurabile. In condizioni diverse da quelle normali, quando ad esempio il sistema nervoso sia stato oggetto di lesioni gravi nei suoi

centri linguistici o negli strati neurali che generano le prime elaborazioni del segnale di ingresso, diventa improbabile riuscire a rintracciare questa elasticità di sistema. È noto che malati affetti da alzheimer hanno forti difficoltà nella distinzione tra stimolazioni differenti: mi è stato descritto in particolare il caso di una paziente che riconduce tutte le figure umane che la circondano a due sole categorie, alle quali attribuisce due nomi propri di persone da lei conosciute in passato; in particolare sono differenziati il personale medico o chiunque lavori nell'ospedale da qualsiasi altra figura. In questo caso non si è ovviamente di fronte ad un normale soggetto con scarsa competenza: da un punto di vista grafico il livello di elaborazione o la configurazione delle frontiere decisionali potrebbero essere fortemente compromessi dalla malattia.

Si supponga che, nella rappresentazione grafica 3.6, scompaiano le frontiere decisionali interne agli aggregati corrispondenti ai termini “neve” e “ghiaccio” (ovvero un mancato funzionamento dei neuroni di primo livello o una mancata trasmissione dei segnali lungo le sinapsi). In un secondo momento vengano inoltre cancellate anche le frontiere che delimitano le due aree maggiori: il sistema per la sua conformazione non può evitare di rispondere ai vettori dei segnali di ingresso con una trasformazione di segnale e genererà una classificazione ancor più generica di quella iniziale. Un sistema così menomato non solo ricondurrebbe ogni stimolo all'insieme “neve” o “ghiaccio”, ma sarebbe anche incapace di notare buona parte delle differenze tra le stimolazioni, anche qualora venissero esplicitate: mancando le frontiere decisionali, si torna al caso in cui due punti vanno a cadere nella stessa area di primo livello, divenendo ai fini del sistema, identici. Il problema può essere letto allora a monte: i danni all'encefalo causano la perdita di quella confrontabilità tra sistemi che è stato l'assunto di fondo da cui è partita l'indagine sul linguaggio: dal momento che un sistema sano ed uno compromesso funzionano allo stesso modo, ma in base a caratteristiche strutturali differenti, ne segue che l'elaborazione dei segnali è differente. Questa ipotesi potrebbe spiegare le difficoltà purtroppo note a chi cerca di trovare un modo di aiutare chi stia subendo un simile deperimento del sistema nervoso centrale.

¹⁴ L'argomento è stato affrontato nel corso dell'ultima parte della prima sezione di questo lavoro.

Riferimenti Bibliografici

- Bechtel W., 1988a: trad. it., *Filosofia della mente*, il Mulino, Bologna 1992
- Bechtel W., 1988b: trad. it., *Filosofia della scienza e scienza cognitiva*, Laterza, Roma-Bari 2001
- Berkeley g., 1709: trad. it. *Saggio su una nuova teoria della visione - Trattato sui principi della conoscenza umana*, Bompiani, Milano 2004
- Boden M.A. (a cura di), 1990: *The Philosophy of Artificial Intelligence*, Oxford University Press, New York 2005
- Boden M.A. (a cura di), 1996: *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, New York 1996
- Boncinelli E., 1999: *Il Cervello, la Mente e l'Anima – Le straordinarie scoperte sull'intelligenza umana*, Mondadori, Milano 1999
- Casalegno P., 1997: *Filosofia del Linguaggio*, Carocci, Roma 2001
- Clark A., 1989: trad. it., *Microcognizione – Filosofia, Scienza Cognitiva e Reti Neurali*, il Mulino, Bologna 1994
- Churchland P.S., 2002: *Brain-Wise – Studies in Neurophilosophy*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 2002
- Churchland P.S. e Sejnowski T.J., 1992: trad. it., *Il cervello computazionale*, il Mulino, Bologna 1995

- Churchland P.M., 1995: *The Engine of Reason, the Seat of the Soul*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1996
- Damasio A.R., 1994: trad. it., *L'Errore di Cartesio – Emozione, ragione e cervello umano*, Adelphi, Milano 2004
- Damasio A.R., 1999: trad. it., *Emozione e Coscienza*, Adelphi, Milano 2003
- Damasio A.R., 2003: trad. it., *Alla Ricerca di Spinoza – Emozioni, sentimenti e cervello*, Adelphi, Milano 2004
- Dennett D.C., 1996: trad. it., *La Mente e le Menti – Verso una Comprensione della Coscienza*, Rizzoli, Milano 2000
- Descartes R., 1637: trad. it., *Discorso sul metodo*, Tripode, Napoli 1989
- Descartes R., 1639-40: trad. it., *Mediazioni Metafisiche*, Vol. 2, Laterza, Roma-Bari 2000
- Edelman G.M., 1989: trad. it., *Il presente Ricordato*, Rizzoli, Milano 1991
- Edelman G.M., 2004: trad. it., *Più grande del cielo – Lo straordinario dono fenomenico della coscienza*, Einaudi, Torino 2004
- Edelman G.M. e Tononi G., 2000: trad. it., *Un universo di Coscienza – Come la materia diventa immaginazione*, Einaudi, Torino 2000
- Fodor J.A., 1983: trad. it., *La mente modulare – Saggio di psicologia delle facoltà*, il Mulino, Bologna 1999
- Fodor J.A., 2000: trad. it., *La mente non funziona così – La portata ed i limiti della psicologia computazionale*, Laterza, Roma-Bari 2001
- Fodor J.A., 2001: trad. it. *Mente e Linguaggio*, Ferretti F. (a cura di), Laterza, Roma-Bari 2001

- Frixione M., 1994: *Logica, Significato e Intelligenza Artificiale*, Francoangeli, Milano 1994
- Hertz J., Krogh A. e Palmer R.G., 1991: *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley, Redwood City (CA) 1991
- Hobbes T., 1651: *Leviatano*, Laterza, Roma-Bari 2004
- Hofstadter D.R. e Dennett D.C., 1981: trad. it., *L'io della mente*, Adelphi, Milano 2001
- Hume D., 1758: *An Enquiry concerning Human Understanding*, Laterza, Roma-Bari 2004
- Johnson-Laird P.N., 1988: trad. it. *La mente e il computer – Introduzione alla scienza cognitiva*, il Mulino, Bologna 1997
- Locke J., 1690: trad. it. *Saggio sull'intelligenza umana*, Laterza, Roma-Bari 2003
- Merleau-Ponty M., 1946: trad. it. *Il primato della percezione – e le sue conseguenze filosofiche*, Medusa, Milano 2004
- Mérő L., 1996: trad. it. *Calcoli Morali – Teoria dei Giochi, Logica e Fragilità umana*, Dedalo, Bari 2000
- Mérő L., 2001: trad. it. *I Limiti della Razionalità – Intuizione, Logica e Trance-Logica*, Dedalo, Bari 2005
- Nannini S., 2002: *L'anima e il corpo – Un'introduzione storica alla filosofia della mente*, Laterza, Roma-Bari 2002
- Norman D.A., 1988: trad. it. *La Caffettiera del Masochista – Psicopatologia degli oggetti quotidiani*, Giunti, Firenze 1997

Norman D.A., 1993: trad. it. *Le cose che ci fanno Intelligenti – Il posto della tecnologia nel mondo dell'uomo*, Feltrinelli, Milano 1995

Patarnello S., 1991: *Le Reti Neuronalì – Semplificare la Complessità con l' Aiuto dell' Informatica*, Francoangeli, Milano 1992

Parisi D., 1999: *Mente – I nuovi modelli della Vita Artificiale*, il Mulino, Bologna 1999

Piccolo A., (inedito): *Gli Idoli di Plastica*

Quine W.V.O., 1960: trad. it. *Parola e Oggetto*, il Saggiatore, Milano 1970

Quine W.V.O., 1961: trad. it. *Il problema del Significato*, Ubaldini, Roma 1966

Reason J., 1990 : trad. it. *L'Errore Umano*, il Mulino, Bologna 1994

Rumelhart D.E.. e McLelland J.L., 1986: trad. it. *PDP Microstruttura dei processi Cognitivi*, il Mulino, Bologna 1991

Russell S.J. e Noving P., 1995: trad. It. *Intelligenza Artificiale – Un Approccio Moderno*, UTET, Torino 2002

Sacks O., 1985: trad. it. *L'uomo che scambiò la moglie per un cappello*, Adelphi, Milano 2005

Sacks O., 1995: trad. it. *Un antropologo su Marte*, Adelphi, Milano 2005

Sartre J.P., 1946: trad. it. *L'esistenzialismo è un umanismo*, Mursia, Milano 1990

Sparti D., 2003: *L'importanza di essere umani – Etica del riconoscimento*, Feltrinelli, Milano 2003

Sperber D., 1996: trad. it. *Il contagio delle idee – Teoria naturalistica della cultura*, Feltrinelli, Milano 1999

-
- Tomasello M., 1999: *The cultural Origins of Human Cognition*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.) 1999
- Tononi G., 2003: *Galileo e il fotodiode – Cervello, complessità e coscienza*, Laterza, Roma-Bari 2003
- Vygotskij L.S., 1978: trad. it. *Il Processo Cognitivo*, Cole M. et al. (a cura di), Bollati Boringheri, Torino 2002
- Vygotskij L.S., 1934: trad. it. *Pensiero e Linguaggio*, Mecacci L. (a cura di), Laterza, Roma-Bari 2003
- Waldrop M.M., 1992: trad. it. *Complessità – Uomini e Idee al Confine tra Ordine e Caos*, Instar, Torino 1996

Riferimenti Bibliografici:

Articoli

Baudry M., 2002: *Synapses and Synaptic Transmission and Integration*, in *Encyclopedia of the Human Brain*, Ramachandran V.S. (a cura di), Academic Press, San Diego 2002, pp. 521-529 (volume 4)

Carli E., 2002: *La Filosofia della Mente*, in *Le Filosofie del Novecento*, Fornero G. e Tassinari S. (a cura di), Mondadori, Milano 2002, pp. 1423-1441.

Chandler D., 1995: *Codes*, in *Semiotics for Beginners*, (consultato: giugno 2005), <http://www.aber.ac.uk/media/Documents/S4B/sem08.html>

Cosmides L. E Tooby J., 2004: *From Function to Structure: The Role of Evolutionary Biology and Computational Theories in Cognitive Neurosciences*, in *The Cognitive Neurosciences*, Gazzaniga M.S. (a cura di), MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995, pp. 1199-1209

Farber I.B. e Churchland P.S., 2004: *Consciousness and the Neurosciences: Philosophical and Theoretical Issues*, in *The Cognitive Neurosciences*, Gazzaniga M.S. (a cura di), MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995, pp. 1295-1305

Fried I. et al., 1998: *Electric current stimulates laughter*, in *Nature*, 391, pp. 650

- Giannoli G.I., 2002: *Intelligenza artificiale e Filosofia*, in *Le Filosofie del Novecento*, Fornero G. e Tassinari S. (a cura di), Mondadori, Milano 2002, pp. 1443-1465.
- Laberge D., 2004: *Computational and Anatomical Models of Selective Attention in Object Identification*, in *The Cognitive Neurosciences*, Gazzaniga M.S. (a cura di), MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995, pp. 649-661
- Moscovitch M., 2004: *Models of consciousness and Memory*, in *The Cognitive Neurosciences*, Gazzaniga M.S. (a cura di), MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995, pp. 1341-1355
- Partridge D., 2002: *Artificial Intelligence*, in *Encyclopedia of the Human Brain*, Ramachandran V.S. (a cura di), Academic Press, San Diego 2002, pp. 237-250 (volume 1)
- Riesenhuber M. e Poggio T., 1999: *Hierarchical models of objects recognition in cortex*, Nature America Inc. (consultato nel luglio 2005),
http://www.nature.com/neuro/journal/v2/n11/full/nn1199_1019.html
- Riesenhuber M. e Poggio T., 2000: *Models of object recognition*, Nature America Inc. (consultato nel luglio 2005),
http://www.nature.com/neuro/journal/v3/n11s/full/nn1100_1199.html
- Sacks O., 2003: trad. it. *L'Occhio della Mente*, Adelphiana (consultato nel luglio 2005), http://www.adelphiana.it/pdf/sacks_occhio.pdf
- Sacks O., 2003: trad. it. *Il Caso di Anna H.*, Adelphiana (consultato nel luglio 2005), http://www.adelphiana.it/pdf/Sacks_Anna.pdf
- Sajda P., 2002: *Neural Networks*, in *Encyclopedia of the Human Brain*, Ramachandran V.S. (a cura di), Academic Press, San Diego 2002, pp. 373-383 (volume 3)

Squire L.R. et al. (a cura di), 2003: *Cognitive Development and Aging*, in *Fundamental Neuroscience*, Academic Press, San Diego 1999, pp. 1167-1200

Varoquaux F. e Brose N., 2002: *Synaptogenesis*, in *Encyclopedia of the Human Brain*, Ramachandran V.S. (a cura di), Academic Press, San Diego 2002, pp. 531-544 (volume 4)