

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

**Il Controllo Esecutivo:
Modello Neurale per un Flanker Task**

Elaborato in:
Bioingegneria

Relatore
Mauro Ursino

Presentata da
Gabriella Cefalù

Sessione III

Anno Accademico 2010-2011

Sommario

Introduzione.....4

Capitolo 1.....6

- Il Controllo Esecutivo.....6
- Conflict Monitoring, Reinforcement Learning e
Response Monitoring.....12
- Behavioral Task.....18
- Dai Task Comportamentali alle Teorie
sul Controllo Cognitivo.....27
- Conflict Monitoring e Avoidance Learning.....31

Capitolo 2.....35

- Error Detection e Post – Error Adjustment.....35
- Error Related Negativity.....42
- Considerazioni sull'Error Detection
in un Flanker Task Modificato.....48

Capitolo 3.....	53
• Introduzione alle Reti Neurali.....	53
• Implementazione di un Modello Neurale per un Flanker Task.....	56
 Capitolo 4.....	 67
• Simulazioni e Risultati	67
• Analisi della Sensitività dei Parametri.....	75
 Conclusioni.....	 78
 Appendice.....	 80
 Bibliografia.....	 91

Introduzione

In questo elaborato viene discusso un importante tema delle Neuroscienze Cognitive e Computazionali: il Controllo Esecutivo. In particolare, è oggetto di studio il meccanismo che sottende all'individuazione dell'errore e che permette agli esseri umani di adattare costantemente i loro comportamenti alla mutevole realtà circostante. Vengono presentate diverse teorie che spiegano come questa adattabilità possa essere implementata dai circuiti neurali. In particolare si parlerà del *Conflict Monitoring Account*, del *Reinforcement Learning* e del *Response Monitoring Account*. Alla base di tali teorie vi sono studi e ricerche che consistono nella rilevazione di dati comportamentali e elettroencefalografici. Verranno presentati i principali task comportamentali utilizzati in tale ambito, con particolare attenzione all'Eriksen Flanker Task. Si vedrà come i fenomeni d'interferenza (*Flanker Effect* o *Congruency Effect*) possono essere messi in evidenza da task appositamente studiati, così come anche gli effetti comportamentali successivi ad un errore (*Post – Error Slowing*, *Post – Error Improvement in Accuracy*, etc.).

Fondamentale per lo studio dei sistemi del controllo esecutivo è l'analisi dei dati EEG: si parlerà dell'importanza dei Potenziali Correlati

all'Evento (*Event - Related Potentials* o ERP) e in particolare della Negatività Correlata all'Errore (*Event - Related Negativity* o ERN). Quest'ultima gioca un ruolo fondamentale nell'adattamento del comportamento dell'essere umano in condizioni per lui nuove o che implicano un conflitto legato ad una scelta tra risposte tra loro in competizione.

Nella seconda parte dell'elaborato vengono illustrati i fondamenti delle reti neurali. Queste sono, infatti, un importante strumento per lo studio, la comprensione e la simulazione dei processi cognitivi. Segue l'implementazione di un modello neurale in grado di simulare alcuni aspetti essenziali di un Flanker Task. Verrà descritto dettagliatamente il tipo di rete neurale utilizzata e i suoi principi di funzionamento. Verranno discussi i risultati ottenuti dalle prime simulazioni. Seguirà un'analisi di sensitività sui parametri del modello relativi alla competitività all'interno di uno strato di neuroni. Infine, si discuteranno i risultati ottenuti e le possibili prospettive future.

Capitolo 1

Il Controllo Esecutivo

Le Neuroscienze Cognitive mirano alla conoscenza dei processi mentali e comportamentali in termini di struttura e funzione delle regioni rilevanti del cervello e del resto del Sistema Nervoso. Una branca di tale disciplina si occupa, in particolare, dei processi cognitivi che vanno sotto il nome di Controllo Esecutivo.

Il controllo esecutivo è quell'attività, implementata dai circuiti neurali, atta a realizzare comportamenti flessibili che tengano conto dinamicamente degli stimoli che afferiscono al soggetto. Questo sistema consente agli esseri umani di interagire con l'ambiente esterno nella maniera più opportuna, modificando i propri comportamenti ogni qual volta si verifichi una modifica nelle condizioni esterne. In mancanza di un sistema di controllo tutte le azioni intraprese verrebbero svolte in maniera automatica: le risposte ad uno stimolo verrebbero date per via più o meno riflessa. Esistono infatti connessioni congenite tra stimoli sensoriali e le corrispondenti risposte, finalizzate alla realizzazione di comportamenti ben precisi e abituali che non necessitano particolare attenzione. Questi

comportamenti automatici sono solitamente rigidi, inadatti ad essere generalizzati nel caso in cui si presentino situazioni nuove. E' pertanto necessario che intervenga un sistema di controllo qualora si rendano necessari comportamenti nuovi, più adatti alla situazione. La modalità automatica predomina negli animali che presentano una limitata corteccia prefrontale o negli esseri umani che presentano un danno prefrontale. E' proprio tale zona di fondamentale interesse per lo studio del controllo esecutivo.

La corteccia prefrontale (PFC) è un sistema riccamente interconnesso con ampie proiezioni da e verso moltissime altre parti del cervello. La sua posizione risulta essere ideale per il controllo di moltissimi aspetti legati al comportamento. In particolare la PFC entra in gioco quando il comportamento richiesto è finalizzato ad un obiettivo, nel caso in cui la richiesta da parte dell'ambiente esterno sia in rapido cambiamento. Il sistema di controllo prefrontale è coinvolto nell'adesione alle regole di comportamento, in particolare nel modo di interagire appropriatamente con gli altri e con gli oggetti presenti nell'ambiente circostante. Di particolare interesse sono i sistemi di controllo del cingolato.

Affinché i processi di controllo vengano implementati con successo occorre che l'esito delle azioni intraprese venga attivamente monitorato. La corteccia cingolata anteriore (ACC) svolge il fondamentale compito di 'ingaggiare', quando necessario, il controllo esecutivo. Essa si occupa di

rilevare e identificare gli eventi che richiedono ulteriori risorse per la loro elaborazione. In che modo avvenga questo processo è tutt'ora oggetto di studio.

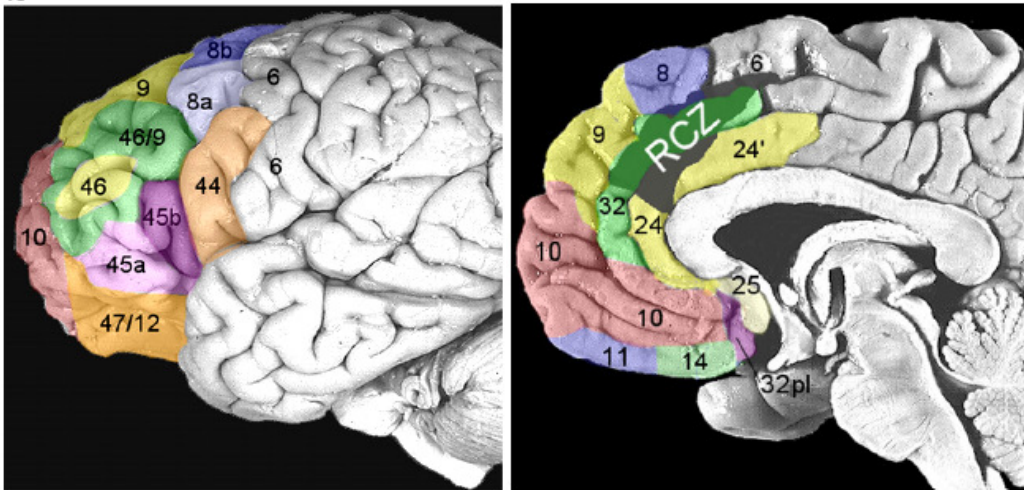


Figura 1. A sinistra: mappa citoarchitettonica della superficie laterale della PFC. A destra: la corteccia cingolata nella sua parte rostrale (RCZ). I numeri sono riferiti alle aree di Brodmann. Ridderinkhof et al., *Neurocognitive mechanism of cognitive control: The role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward – based learning*, Brain and Cognition, Elsevier 2004.

Nei comportamenti finalizzati all'obiettivo, il decision – making (scegliere quale azione intraprendere tra più azioni possibili) è orientato da tre processi fondamentali: l'avvio e la modificazione del comportamento, l'inibizione, la simulazione comportamentale.

L'avvio e la modificazione del comportamento sono alla base della formazione di pattern della PFC. Questi sono finalizzati allo svolgimento di un compito o alla decisione tra più possibilità concorrenti. Qualora l'esito dell'azione sia favorevole e porti ad una ricompensa si forma

un'associazione tra lo stimolo esterno, l'azione compiuta e il premio successivamente ricevuto. In questo modo, quando condizioni simili si presenteranno in futuro, tale rappresentazione neurale potrà essere prontamente riutilizzata al fine di compiere una decisione o portare a termine un compito nella maniera più vantaggiosa.

L'inibizione della risposta è complementare rispetto all'avvio. Mentre l'avvio prevede la selezione di comportamenti desiderati, l'inibizione invece porta alla soppressione di informazioni o comportamenti considerati irrilevanti o distraenti. Solitamente si riscontra il fenomeno dell'inibizione in dei task comportamentali in cui due o più stimoli in conflitto tra loro vengono elaborati contemporaneamente. In questo caso il processo inibitorio porta alla soppressione selettiva della risposta allo stimolo errata, eliminando o prevenendo il conflitto tra i due percorsi contemporaneamente attivati.

La simulazione è quel processo che permette di ricreare idealmente gli esiti di una scelta, basandosi su una generalizzazione di pattern già esistenti. Aggiustamenti flessibili dei comportamenti e l'apprendimento di associazioni basate sulla ricompensa richiedono una continua valutazione delle azioni correnti e del loro esito. La capacità di monitorare e comparare tali azioni e le relative performance con degli obiettivi interni è critica al fine di ottimizzare il decision – making. La zona rostrale della corteccia cingolata (RCZ) è coinvolta nel monitoraggio delle conseguenze

sfavorevoli correlate all'azione, delle risposte errate, del conflitto della risposta e dell'incertezza decisionale. Gli oggetti di questo monitoraggio hanno tutti un aspetto comune: essi segnalano che l'obiettivo e la ricompensa eventuale correlata al compito potrebbero non essere raggiunti a meno che non venga incrementato il livello d'impiego del controllo cognitivo. Tutti questi aspetti verranno ampiamente illustrati alla luce delle principali teorie cognitive e dei relativi task comportamentali utilizzati.

Qualora la ricompensa che ci si aspettava non venga effettivamente ottenuta, questo errore di predizione viene codificato da un altro importante sistema per il controllo cognitivo: il sistema dopaminergico mesencefalico (MDS). La mancata ricompensa viene codificata come segue: nel caso in cui gli eventi siano migliori di quanto ci si aspettava l'attività fascica dell'MDS aumenta; nel caso contrario diminuisce. Questi segnali fascici dopaminergici vengono inviati alla RCZ dove vengono attuati meccanismi per il miglioramento della performance.

RCZ si trova implicata anche nel monitoraggio del conflitto legato alla risposta. Il *response conflict* si ha quando un compito cognitivo attiva concorrentialmente due o più risposte diverse. Questo può avvenire quando lo stimolo induce una risposta forte ma errata ai fini del task.

Nel seguente capitolo vedremo come tutti questi elementi del controllo esecutivo possono essere organicamente collegati all'interno di alcune teorie che hanno come obiettivo quello di spiegare come

effettivamente avvenga il reclutamento del controllo cognitivo, l'individuazione dell'errore e del conflitto, il miglioramento della performance.

Conflict Monitoring, Reinforcement Learning e Response Monitoring

Come si è detto il controllo cognitivo è l'insieme dei processi che determinano l'abilità tipica dell'essere umano di configurare il proprio sistema cognitivo al fine di svolgere al meglio un determinato task attraverso appropriati e continui aggiustamenti comportamentali. La domanda che ci si pone è: in che modo viene individuata l'esigenza dell'intervento di un sistema di controllo?

- *Conflict Monitoring Account*

La prima teoria che analizzeremo è quella del *Conflict Monitoring* (CM) o Monitoraggio del conflitto (Botvinick et al.,2001). Secondo il CM deve esistere un componente valutativo che monitora il processing dell'informazione; in particolare, deve esistere un sistema che monitora i casi in cui si genera un conflitto nell'elaborazione dello stimolo. Il sistema del CM serve a tradurre il verificarsi di un conflitto in una serie di aggiustamenti nel controllo cognitivo al fine di minimizzarlo ed evitarne future manifestazioni: per prima cosa occorre valutare l'entità del conflitto per poi passare l'informazione ai centri deputati al controllo in modo tale

che, sulla base di questa informazione, regolino la forza del loro intervento. Questo compito di *conflict detection* spetta all'ACC.

Com'è definito il conflitto? Alla base di questo concetto vi è la *crosstalk interference*. Se due stimoli non sovrapposti vengono processati, le due elaborazioni possono avvenire parallelamente e senza interferire; se invece i due stimoli hanno qualche elemento di sovrapposizione, nel loro rispettivo processing interagiranno o interferiranno l'uno con l'altro al momento di produrre una risposta che comporta un certo livello di competizione tra due alternative. Il risultato di un crosstalk si manifesta generalmente nel rallentamento dell'elaborazione della risposta o nell'aumento della frequenza degli errori commessi in un determinato task (se ne vedranno alcuni esempi in seguito). Il conflitto quantifica l'entità della sovrapposizione dei due (o più) processing ed è dovuto alla simultanea attivazione di rappresentazioni incompatibili. Il controllo cognitivo interviene per prevenire i conflitti e il conflitto stesso viene inteso, secondo questo account, come il parametro in base al quale il controllo viene ingaggiato: esso è il trigger che attiva una specifica zona del cervello, l'ACC.

• *Reinforcement Learning*

Una possibile alternativa al CM account è la teoria del *Reinforcement Learning* (RL) o Apprendimento Rinforzato (Holroyd & Coles, 2002). Tale teoria si basa sul ruolo del sistema dopaminergico mesencefalico (MDS). Questo sistema convoglia segnali che fanno da rinforzo ai gangli della base e alla corteccia prefrontale, dove vengono avviati processi atti a facilitare lo sviluppo di programmi motori adattativi. Da ciò segue l'aggettivo 'rinforzato'.

L' MDS è composto da un piccolo insieme di nuclei che proiettano diffusamente ai gangli della base e alla corteccia prefrontale. Questo sistema può facilitare il potenziamento a lungo termine e la depressione a lungo termine. Esso codifica inoltre l'aspetto edonistico della ricompensa. Un segnale dopaminergico positivo viene rilasciato ogniqualvolta un evento è migliore delle aspettative, mentre un segnale dopaminergico negativo viene rilasciato quando l'evento è peggiore di quanto predetto. Questa risposta fasica viene intesa come un segnale di errore che, secondo il RL, viene usato per indicare all'ACC la necessità di aumentare il controllo. Spetta all'ACC il compito di selezionare il *motor controller*, ovvero la rete che esegue il controllo sul task svolto dall'individuo, che si adatta meglio al task stesso. Diversi studi indicano che l'area motoria dell'ACC è in una posizione di rilievo al fine di utilizzare le sue numerose

interconnessioni neurali per contribuire al planning dei comportamenti e alla loro esecuzione. Tuttavia l'ingaggio dell'ACC è limitato alla prima parte dello svolgimento di un task, quando quest'ultimo è nuovo o particolarmente difficile. Appena il soggetto inizia ad apprendere come comportarsi il contributo dell'ACC diminuisce e si attivano altre zone della corteccia prefrontale. L'ACC nelle prime fasi dell'apprendimento utilizza il sistema di errore – ricompensa per identificare e selezionare i comportamenti appropriati. Le informazioni relative alla ricompensa, come già detto, vengono convogliate dall' MDS.

Secondo il RL quindi, il sistema nervoso umano è provvisto di diversi motor controller che agiscono più o meno indipendentemente ed in parallelo. Tutte queste strutture hanno proiezioni verso l'ACC e ciascuna si approccia in maniera diversa alla risoluzione di problemi di controllo motorio di alto livello. La corteccia cingolata decide quale motor controller è più adatto al compito sulla base di segnali di rinforzo dopaminergici.

La fondamentale differenza comportamentale tra questi due account, il CM e l'RM, è il ruolo dato all'ACC: secondo il CM, l'ACC ha il ruolo di monitorare il conflitto esistente tra più risposte competitive al fine di diminuire l'entità del conflitto stesso nelle presentazioni future dello stimolo che l'ha causato; secondo il RL, l'ACC è responsabile della scelta del percorso esecutivo migliore per un dato compito, tale scelta viene

effettuata in base a segnali dopaminergici che fungono da rinforzo sulla base degli esiti delle azioni svolte in precedenza.

- *Response Monitoring Account*

Infine, consideriamo il *Response Monitoring Account* (Steinhauser et al., 2008). Il Response Monitoring (RM) si basa sul concetto di *evidence accumulation*. Il processo di selezione della risposta in un task è spesso basato sull'accumulo di 'evidenza' a favore della risposta stessa. Questa diventa risposta finale o 'aperta' (dal'espressione *overt response*) non appena si supera un certo criterio di risposta (*response criterion*) ovvero non appena si oltrepassa una stabilita soglia. A causa di interferenze nel processing tuttavia, il soggetto può esprimere la risposta errata. Nella teoria del RM vi è un sistema predisposto alla registrazione della risposta risultante. A seguito della risposta l'accumulation of evidence continua e, qualora questo porti alla selezione di un'altra risposta che supera la soglia, il sistema conclude che la prima risposta era errata. L'*error detection* quindi corrisponde all'individuazione interna di una correzione della risposta precedentemente data (*internal correction response*).

Si può pensare ad un parallelismo tra il CM e il RM: qualora si accumulasse evidenza per due risposte competitive, questo potrebbe generare il conflitto nella risposta. In particolare ad una maggiore evidenza

accumulata per le due risposte corrisponderebbe un maggiore conflitto associato. Le due teorie si dimostrano invece completamente separate nel modo di intendere l'error detection. Nell'ottica del CM si può pensare che l'individuazione di un errore avvenga a causa del prolungarsi del processing dello stimolo dopo che una prima risposta viene data apertamente dal soggetto. Il conflitto successivo che ha luogo a seguito della risposta data o *post – error conflict*, è esso stesso indice dell'errore. Questo significa che non è necessario che il soggetto pervenga ad una nuova risposta di correzione affinché un errore sia individuato; diversamente, per il RM, occorre l'operazione di confronto tra due risposte aperte diverse per determinare l'errore.

Le teorie esposte finora hanno il loro fondamento nell'analisi sperimentale di due tipologie di dati: dati di tipo comportamentale e rilevazioni EEG. Esistono appositi task comportamentali indirizzati allo studio degli aspetti dell'error detection, del conflitto e dell'interferenza tra diverse afferenze sensoriali, del processing della risposta e così via. Nella prossima sezione ne presenteremo alcuni particolarmente rilevanti, sottolineando come i risultati ottenuti da tali task abbiano portato allo sviluppo delle teorie sopraesposte.

Behavioral Tasks

I task comportamentali sono compiti costruiti appositamente per studiare determinati aspetti cognitivi. Generalmente si istruisce il soggetto a rispondere in un determinato modo ad un certo stimolo: si valutano poi tempi di risposta e/o le percentuali d'errore. La tipologia di stimolo può variare così come possono esistere varianti dei singoli task, modificate ad hoc per lo scopo della propria ricerca. Analizzeremo due task principalmente: lo Stroop Task e l'Eriksen Flanker Task. Alla luce di questi ultimi due e di altri task rilevanti verranno chiariti alcuni aspetti delle teorie sul controllo cognitivo.

Stroop Task

Nel 1935 J. R. Stroop pubblicò l'articolo "Studies of interference in serial verbal reactions", che divenne la pubblicazione di riferimento per il task comportamentale che porta il suo nome. L'obiettivo di Stroop era quello di spiegare i fenomeni di interferenza nell'elaborazione di uno stimolo. Si dedicò allo studio di task che comportassero il *color – naming*, cioè che consistono nel dire di che colore è lo stimolo dato, e in *word – reading* o lettura della parola che fa da stimolo, finché non ebbe l'idea di

costruire un task in cui i due aspetti entrassero in gioco simultaneamente. Lo stimolo risultante da questa idea è una parola con significato incongruente rispetto al colore con cui è scritta, ad esempio : **ROSSO**. Il soggetto ha il compito di dire con che colore è scritta la parola (nell'esempio la risposta corretta è 'verde').

L'interferenza nasce dal parallelo processing di due componenti dello stimolo:

- la componente legata alla lettura dello stimolo (word - reading) la quale è più immediata in quanto per l'essere umano il comportamento della lettura è maggiormente radicato. Questo, essendo esercitato continuamente, è diventato automatico;
- la componente legata al color – naming, la quale subisce l'interferenza della parola letta che conduce il soggetto a rispondere in maniera errata (nell'esempio, l'interferenza può causare la risposta errata 'rosso').

L'esperimento in uno Stroop Classico si svolge nel seguente modo: viene presentata al soggetto una card con un numero variabile di parole (tutti nomi di colori: rosso, blu, verde, marrone e viola) scritte utilizzando inchiostri dei medesimi colori delle parole usate ma in modo tale che l'associazione parola – colore risulti sempre incongruente. Non si avrà mai la parola 'rosso' scritta in inchiostro rosso, ad esempio, ma la troveremo

scritta in blu, verde, marrone e viola. Nel suo primo esperimento Stroop costruì una matrice 10x10 di parole in cui ogni parola appariva due volte in ogni linea, scritta con uno dei colori possibili. Nell'immagine si riporta una 5x5 di stimoli a titolo di esempio.

RED	BLUE	GREEN	BROWN	PURPLE
BLUE	GREEN	BROWN	PURPLE	RED
GREEN	BROWN	PURPLE	RED	BLUE
BROWN	PURPLE	RED	BLUE	GREEN
PURPLE	RED	BLUE	GREEN	BROWN

Oltre a questa card al soggetto viene presentata una control – condition card, cioè un pannello che rappresenta una situazione di confronto. La control – condition può essere implementata in diversi modi: nel primo esperimento Stroop utilizzò una card identica a quella con gli stimoli incongruenti tutta scritta in inchiostro nero.

Il soggetto in quest'ultimo caso attua unicamente uno dei due processi in interferenza: il word – reading. In questo modo si ottengono i tempi di lettura con interferenza (prima card) e senza interferenza (seconda card). Alternativamente si può utilizzare come control – condition un pannello costituito da rettangoli colorati, con gli stessi colori utilizzati nella prima card.

In entrambi i casi Stroop trovò che i tempi medi di lettura su 70 soggetti erano il 74% più brevi nella control – condition card rispetto alla card con stimoli interferenti. Il tempo necessario per processare lo stimolo si allunga a causa dell'interferenza tra le due elaborazioni parallele.

In un terzo esperimento Stroop volle testare in che modo la pratica nel task ne potesse modificare gli esiti. Per fare ciò i soggetti dovevano svolgere il task per otto giorni consecutivi. Con il procedere dei giorni Stroop notò che i tempi di risposta calavano: l'interferenza diminuiva con la pratica.

Alcune varianti del task prevedono l'utilizzo di parole color – related e color – unrelated. Le parole color – related sono quelle viste nello stroop classico: rosso, verde, etc. Sostituendo a queste parole che non hanno nulla a che vedere con i colori, si trova che l'interferenza associata a tali stimoli si riduce. Si possono anche utilizzare, infine, stimoli di tipo congruente cioè il cui il significato della parola letta coincide con il colore dell'inchiostro con cui è scritta, ad esempio: **ROSSO**. In questo tipo di task si trova che la risposta è la più rapida in assoluto.

Eriksen Flanker Task

La prima versione di questo task fu presentata da Eriksen & Eriksen nel 1974 nell'articolo "*Effect of noise letters upon the identification of a target letter in nonsearch task*". Gli autori volevano investigare il processing di informazioni visuali al variare dello stimolo presentato al soggetto ove questo stimolo fosse costruito in modo tale da mantenere fisso il target: si tratta perciò di un *nonsearch task*.

L'idea alla base del task è quella di affiancare ad uno stimolo target degli stimoli di disturbo, aspettandosi che l'accuratezza e la velocità nell'identificazione del target siano dipendenti dalla relazione intercorrente tra target e stimoli di disturbo. Tali stimoli di disturbo, denominate *flanker* (' che sta a fianco '), indeboliscono e talvolta compromettono il processing del target. L'attenzione selettiva è infatti incapace di eliminare del tutto l'effetto di stimoli estranei.

Eriksen & Eriksen inserirono nello svolgimento del task, prima che lo stimolo venisse presentato, un indicatore che segnalasse la posizione del target da individuare: anche in questo caso trovarono che la presenza di stimoli rumorosi ritardava i tempi di risposta. I primi tipi di stimoli impiegati erano lettere: queste vengono tutt'ora utilizzate seppure esistano versioni del task con simboli come stimoli.

Lo stimolo è composto da una lettera centrale, il target, e da un certo numero di lettere uguali a destra e a sinistra dello stimolo. Eccone un esempio:

K K K H K K K

Eriksen & Eriksen analizzarono aspetti che potessero modificare o influenzare l'attenzione selettiva nel task quali la spaziatura tra le lettere, il numero di flanker, l'angolo con cui viene visualizzato lo stimolo, la presenza o meno di flanker e la loro tipologia. Trovarono che la spaziatura ha un effetto non lineare sul tempo di risposta al target nel senso che, superata una certa spaziatura tra le lettere dello stimolo, la separazione tra queste ha effetti trascurabili. L'effetto di ritardare il tempo di risposta è maggiore se le lettere sono vicine tra loro; il numero di flanker (che è sempre uguale a sinistra e a destra) è generalmente di due o tre lettere per lato.

Di particolare importanza è la tipologia dei flanker. Le lettere utilizzate dagli autori erano divise in due gruppi o set: il primo composto da H e K, il secondo da S e C. Ad ogni gruppo era associata la pressione di un tasto.

Nell'esperimento descritto nel 1974 gli stimoli presentati al soggetto erano di diverso tipo:

- *noise identical to the target*. Il target (H,K,S o C) viene affiancato da tre ripetizioni della lettera target stessa;
- *noise same response as the target*. Il target viene affiancato da tre ripetizioni della seconda lettera del suo gruppo di appartenenza (per il target H si ha K come flanker e viceversa, per il target S si ha C come flanker e viceversa);
- *noise other target set*. Il target viene affiancato da tre ripetizioni per ciascun lato da una delle lettere del set opposto (per H target il flanker può essere S o C, ad esempio);
- *noise similar to the target*. Vengono usate come flanker lettere non appartenenti a nessun set ma che hanno affinità con la forma del target;
- *noise dissimilar to target*. Vengono usate come flanker lettere non appartenenti a nessun set ma che non hanno affinità con la forma del target;
- *target alone*. Viene presentato il target senza alcun flanker.

Nella tabella seguente vengono riassunti i casi esposti sopra. Le prime cinque condizioni vennero presentate ai soggetti con una spaziatura casuale tra le lettere.

Table 1
Experimental Conditions and Representative Displays

Condition	Example
1 Noise Same as Target	H H H H H H H
2 Noise Response Compatible	K K K H K K K
3 Noise Response Incompatible	S S S H S S S
4 Noise Heterogeneous--Similar	N W Z H N W Z
5 Noise Heterogeneous--Dissimilar	G J Q H G J Q
6 Target Alone	H

Figura 2. Eriksen & Eriksen, *Effect of noise letters upon the identification of a target letter in nonsearch task*, Perception & Psychophysics, 1974.

Le conclusioni tratte dallo studio illustrato mostrano che, anche se al soggetto non è richiesto di orientarsi nel trovare la lettera target in una schermata che presenta diverse lettere, la presenza di tali lettere rallenta i tempi di risposta relativi all'identificazione della lettera target. Inoltre, mostrano come in alcuni trial i flanker vengano processati insieme al target a tal punto da indurre il soggetto all'errore.

Il flanker task si presta bene ad essere variato in modo tale da mettere in luce gli aspetti cognitivi che sono oggetto di studio, i più significativi verranno presentati nei prossimi capitoli. Può variare la tipologia dello stimolo (al posto delle lettere si possono usare delle frecce: →→←→→ oppure →→→→→), il numero dei target e così via.

Generalmente si utilizza sempre un target affiancato da flanker congruenti, ovvero uguali al target, o incongruenti, cioè diversi dal target. Più avanti si descriverà anche un flanker task con stimoli neutri.

Dai Task Comportamentali alle Teorie sul Controllo Cognitivo

I task comportamentali vengono utilizzati per testare la validità delle teorie proposte sul controllo esecutivo e per studiarne determinati processi. Vengono presentati alcuni aspetti legati agli account precedentemente illustrati.

Secondo la teoria del Conflict Monitoring, l'ACC ha il fondamentale ruolo nella regolazione e nell'ingaggio del controllo esecutivo di monitorare il conflitto tra risposte concorrenti. L'attivazione della corteccia cingolata viene associata principalmente a tre tipologie di compiti cognitivi:

- task che richiedono l'overriding di risposte forti ma irrilevanti ai fini del task stesso;
- task che richiedono al partecipante di scegliere tra un set di risposte che hanno lo stesso grado di accettabilità;
- task strutturati in modo tale da indurre il soggetto a commettere errori.

Del primo gruppo, quello dei *response override task*, fa parte lo Stroop Task. Come si è detto in precedenza i tempi di risposta sono

maggiori se c'è una discrepanza tra il colore a cui si riferisce la parola e il colore con cui la parola è scritta rispetto al caso di congruenza. In corrispondenza ad un allungamento di tali tempi si osserva un aumento dell'attività dell'ACC. Nell'ottica del CM questo risultato è una prova del fatto che la corteccia cingolata risponda al conflitto: il processing dello stimolo che procede parallelamente come word – reading e color – naming è alla base dell'istaurarsi del conflitto che viene interpretato dall'ACC come un'insufficienza nel controllo esecutivo. Man mano che il soggetto impara a focalizzare la propria attenzione selettiva, incrementando il controllo, l'attivazione della corteccia cingolata cala.

Il secondo gruppo contiene tutti gli *undetermined responding task*, cioè tutti quei task in cui il soggetto deve scegliere tra risposte delle quali nessuna è più ovvia o più convincente delle altre.

Poiché tutti gli stimoli presentati sono associati ad un certo numero di risposte accettabili, questo può portare all'attivazione parallela di più percorsi di elaborazione di risposte incompatibili: ciò comporta un crosstalk durante il periodo di tempo intercorrente tra la presentazione dello stimolo e il momento in cui viene rilasciata la risposta. Un esempio di task di questo tipo è lo *Stem Completion Task*. Questo compito consiste nel presentare al soggetto due tipi di stimoli: parole complete o spezzoni di parole (ad esempio la sola lettera iniziale). Al soggetto viene chiesto di

completare la parola che viene presentata in parte. Dai risultati sperimentali si trova che il processo di lettura della parola completa procede in maniera più rapida, essendo necessario unicamente il processing delle singole lettere. Il processo di completamento della parola richiede invece l'attivazione competitiva di tutte le unità corrispondenti alle parole che potrebbero completare lo stimolo dato. In questo modo tra le risposte concorrenti si instaura un conflitto rilevabile dall'attivazione della corteccia cingolata.

Infine, il terzo gruppo riguarda gli *error commission task*. Il Flanker Task appartiene a questa categoria: è infatti dal confronto tra i tempi di risposta delle risposte corrette ed errate che si ottengono interessanti informazioni. I task incongruenti (ricordiamo che si tratta di stimoli del tipo 'SSSHSSS') sono quelli che conducono ad un maggiore grado di conflitto cognitivo, richiedendo il maggior tempo in assoluto per la produzione di una risposta corretta ed essendo caratterizzati da una frequenza d'errore più alta. I task congruenti errati richiedono tempi brevissimi e sono rari: si tratta infatti di errori dovuti ad una elaborazione dello stimolo incompleta o ad un'attivazione motoria scoordinata da parte del soggetto.

I risultati più interessanti che si possono ricavare da un flanker task sono quelli che mettono in relazione due trial consecutivi. Si trova infatti che, successivamente ad un trial incongruente, la performance del soggetto

diventa più veloce nei trial dello stesso tipo e più lenta in quelli di tipo opposto (ovvero i trial congruenti). In alcuni casi, successivamente all'errore migliorano le performance nei task successivi. Questi due effetti, rispettivamente chiamati *post – error slowing* (PES) e *post – error improvement in accuracy* (PIA) verranno discussi nel dettaglio in seguito.

Un effetto simile si ha anche nello Stroop task: l'incorrere in trial incongruenti porta i partecipanti a focalizzare l'attenzione sul color – naming task, aumentando la loro abilità nell'escludere l'interferenza della risposta relativa al word – reading. Secondo il CM account ciò accade perché i trial incongruenti comportano un conflitto molto maggiore rispetto ai congruenti ed essendo il conflitto il trigger sulla base del quale viene aumentato il controllo, a maggiore conflitto corrisponde un aumento del controllo esecutivo che ha come conseguenza un miglioramento nella performance.

Conflict Monitoring e Avoidance Learning

Analizziamo ora un possibile account che riunisce le teorie presentate fino ad ora. La teoria è presentata nell'articolo "*Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function*" (Botvinick, 2007).

Le ipotesi alla base di questo approccio sono due:

- l'individuazione del conflitto potrebbe interagire con i processi legati all'apprendimento. In tale senso il conflitto opererebbe come un teaching signal;
- il conflitto potrebbe essere inteso come un evento da evitare o particolarmente costoso. Ciò condiziona successivamente il decision making e in generale i comportamenti del soggetto che saranno volti ad evitare il verificarsi di tale evento negativo.

Il CM conduce ad una sorta di *avoidance learning*, cioè a quel tipo di apprendimento che consiste nell'evitare situazioni spiacevoli o stressanti precedentemente incontrate. Questo tipo di apprendimento allontana il soggetto da comportamenti che sono predisposti a indurre un conflitto e lo porta invece a realizzare un processing dell'informazione più efficiente.

Secondo questa teoria il conflitto viene considerato come un evento che produce un rinforzo negativo, penalizzando la selezione delle strategie ad esso associate.

Esistendo questa correlazione tra il conflitto e la richiesta di controllo cognitivo, questa teoria implica che le strategie seguite dal soggetto si orienteranno verso quei percorsi che minimizzano la richiesta di risorse cognitive. Questo principio è ben sintetizzato dalla *law of least work*: la legge del minor lavoro. La legge fu enunciata così da Hull nel 1943 e afferma che se due o più sequenze comportamentali sono state ugualmente rinforzate un uguale numero di volte, allora l'organismo imparerà gradualmente a scegliere tra le due il comportamento che risulta essere meno laborioso. Al fine di testare la *law of least work*, nonché le ipotesi alla base di questa teoria, l'autore ha utilizzato un *demand selection task*.

Il task vede il soggetto posto di fronte ad una scelta: deve pescare una carta da uno di due mazzi distinti. In ogni trial sceglie una carta e ogni carta presenta un numero arabo che può essere di colore viola o blu: se il colore del numero è viola, il soggetto deve dire 'yes' se il numero è minore di cinque oppure 'no' in caso contrario; se il colore del numero è blu, il soggetto deve dire 'yes' se il numero è pari, 'no' se è dispari. Ai soggetti viene detto di scegliere liberamente da quale mazzo pescare le carte, prendendole sempre da uno piuttosto che da un altro qualora sviluppino una preferenza. Non viene detto nulla in merito ad una qualche differenza tra i

due mazzi. In realtà i due mazzi di carte sono diversi: in uno dei due il colore di ogni numero è uguale al precedente il 90% delle volte (*low demand deck*); nel secondo solo nel 10% dei casi (*high demand deck*). Quest'ultimo mazzo necessita quindi che il soggetto passi dal compito viola a quello blu più frequentemente, evocando un numero maggiore di situazioni che generano un conflitto e richiedono un elevato sforzo cognitivo per via del crosstalk tra i due task. Secondo quanto previsto e dall'account proposto e dalla legge del minor lavoro ci si aspetta che il soggetto che compie il task orienti la sua scelta verso il low demand deck.

Questo orientamento effettivamente si osserva e si esclude che possa essere dovuto semplicemente ad un processo volto ad evitare di commettere errori. Si potrebbe pensare che il soggetto peschi dal low demand deck – una volta capito come funziona - così da ridurre al minimo lo switch tra un task e l'altro poiché può portare ad un numero maggiore di errori. Tuttavia ciò non sussiste poiché il fenomeno si verifica indifferentemente sia in soggetti che hanno una maggiore error rate nel low demand sia in quelli che commettono più errori nell'high demand deck; inoltre si osserva ugualmente l'orientamento verso il low demand deck anche in soggetti che affermano di non aver notato alcuna differenza tra i due mazzi.

L'insorgere del conflitto nello svolgimento di un task o mentre si sta perseguendo una particolare strategia, indebolisce la tendenza ad adottare

la medesima strategia nei comportamenti successivi. Ciò comporta lo sviluppo di un orientamento verso attività associate con un processing più efficiente o, equivalentemente, che richiedono un minore impiego di risorse. Questi due aspetti lavorano parallelamente e il conflitto funge contemporaneamente da segnale per il reclutamento di controllo cognitivo e da segnale d'apprendimento che influenza lo svolgimento di un task e l'appropriata selezione di strategie. L'account così esposto si presenta come un punto d'incontro per il conflict monitoring e per il reinforcement learning.

Capitolo 2

Error Detection e Post – Error Adjustment

Nell'analisi comportamentale in un dato task, come si è visto, l'errore rappresenta un evento ricco di informazioni. L'aspetto più interessante riguarda il modo in cui l'error detection o individuazione dell'errore modifica la reazione del soggetto nei trial successivi.

In uno studio del 1966, P.M.A. Rabbitt svolse un interessante esperimento volto a trovare possibili relazioni tra i trial che precedono e seguono il verificarsi di un errore in un determinato task. Utilizzò una serie di led che si accendevano sequenzialmente in un 4 – choice serial response task e in un 10 – choice serial response task: il soggetto doveva premere la leva corrispondente alla luce giusta e il task non andava avanti finché non era stato raggiunto il giusto abbinamento luce – leva. In questo modo fu possibile valutare non solo i tempi relativi all'errore, ma anche i tempi delle correzioni. Vennero considerati anche i tempi relativi ai sei trial successivi all'*error – correcting response* e numerati con +1,+2,...,+6.

I risultati del suo esperimento condussero ad una serie di conclusioni:

- le risposte precedenti agli errori non hanno differenze significative;
- la prima risposta successiva ad una correzione o *error – correcting response* è sempre significativamente più lenta di qualsiasi altra tipologia di risposta. I tempi delle risposte successive (tutte corrette, in caso di errore il conteggio ripartiva dall'*error correction response* con +1), cioè da +2 a +6, non erano significativamente diverse dalle altre risposte corrette;
- in entrambi i task, il 4 choice e il 10 choice, gli errori erano molto più veloci delle risposte corrette.

I risultati sono riportati nel grafico in Figura 3.

L'ultimo punto si spiega ipotizzando che la maggior parte degli errori siano un *failure of aim* o *motor failure*: ciò significa che il soggetto intraprende l'atto motorio (il premere una leva in questo caso) prima che il processing dello stimolo sia completo.

La ragione alla base del rallentamento successivo all'errore, detto *Post – Error Slowing* o PES, è tuttora oggetto di studio. Tuttavia si sono delineate due principali correnti di pensiero: la prima afferma che il soggetto rallenta la sua velocità nel compiere il task come precauzione per prevenire l'accadere di errori futuri o per riflettere sull'errore commesso; la

seconda corrente vede il PES come una reazione di ‘orientamento’ dovuta al fatto che l’errore interrompe il ritmo della risposta ed è quindi necessario del tempo affinché un nuovo ritmo venga ripristinato. Analizziamo nel dettaglio questi due aspetti e i fenomeni correlati al PES.

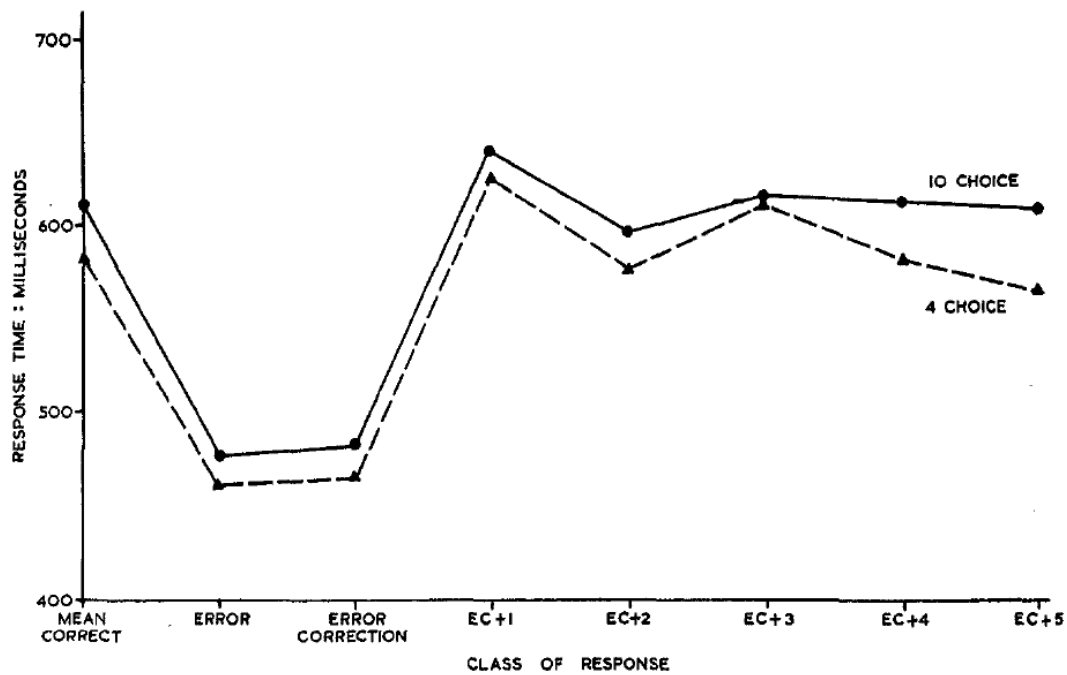


Figura 3. Tempi relativi alle risposte corrette, errate, alle error – correction response e alle risposte successive all’error correction (EC +1,2,...,6), in un 4 – choice serial response task e in un 10 – choice serial response task. P.M.A. Rabbitt, *Error and error correction in choice – response tasks*, Journal of Experimental Psychology, 1966.

• *PES: Cognitive Control Account*

Secondo Gehering e Fencsik (2001), il PES è un meccanismo di controllo di compensazione volto ad assicurare un miglioramento nella performance. Concretamente si tratta di un periodo di tempo necessario per intraprendere un maggiore controllo della risposta. Questa idea, legata all'ingaggio di maggiore controllo esecutivo a seguito di un errore, ci rimanda al CM account. Secondo la conflict monitoring theory, infatti, il post error slowing è dovuto ad un aumento della soglia di risposta: a seguito di un errore il post – error conflict recluta maggiore controllo. Questo comporta la necessità di un processing dello stimolo successivo più lungo per evitare di commettere nuovamente un errore.

Un account che si lega a quello del CM è *l’Inhibitory Account*. Secondo Ridderinkhof (2002), quando si commette un errore i sistemi di controllo intervengono aumentando la soppressione selettiva nei trial successivi all’errore: il PES sarebbe quindi legato ad una inibizione motoria (o equivalentemente ad un innalzamento della soglia della risposta).

• *PES: Orienting Account*

Secondo questo account, proposto da Notebaert et al. (2009), il post error slowing è dovuto alla relativa infrequenza degli errori in un trial. Quando il soggetto sbaglia, questo evento insolito cattura la sua attenzione e comporta una reazione di ‘orientamento’: il soggetto deve riadattare la propria strategia a seguito di un evento che non si aspettava. Per dimostrare questa tesi sono stati utilizzati task con feedback per il soggetto (così che questo sia messo a conoscenza dell’errore) in cui gli errori hanno frequenza maggiore delle risposte corrette o in cui stimoli completamente irrilevanti sono presentati in maniera inaspettata durante il trial. I risultati di questi task hanno confermato che lo slowing si ha successivamente ad eventi infrequenti o inaspettati indipendentemente dal fatto che il trial precedente sia corretto o errato. Gli autori hanno utilizzato un task in cui la percentuale di risposte corrette veniva tenuta uguale ad un valore fissato tramite opportuni aggiustamenti degli stimoli, così da ottenere situazioni in cui l’errore è più frequente della risposta corretta o viceversa (vedi Figura 4, a sinistra). In un secondo task al posto del feedback sono stati utilizzati segnali irrilevanti (vedi Figura 4, a destra): si è trovato che a seguito di questi stimoli irrilevanti ed infrequenti avviene la medesima reazione di orientamento da parte del soggetto.

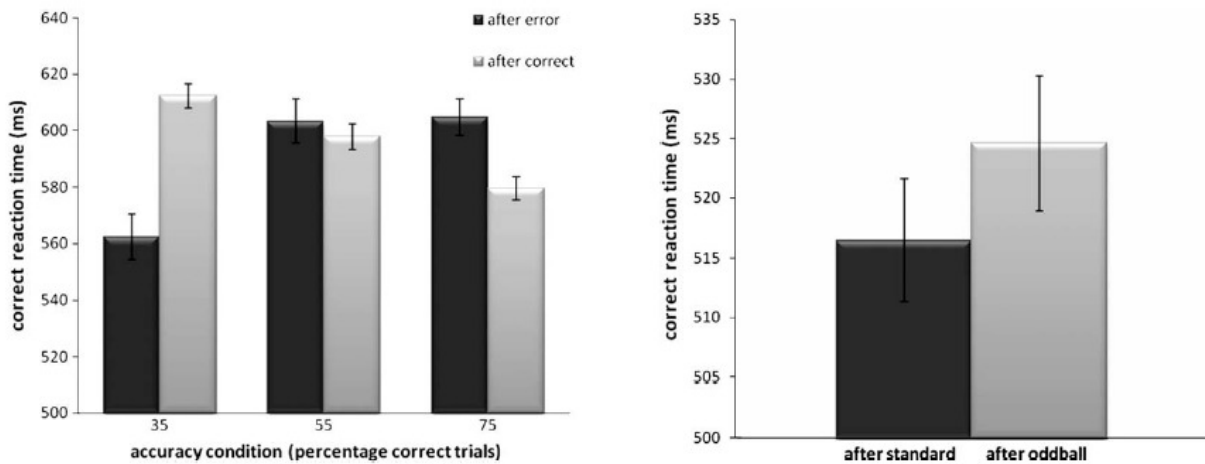


Figura 4. A sinistra vengono illustrati i tempi medi di risposta agli stimoli successivamente ad un trial con risposta errata (in nero) o con risposta corretta (in grigio) al variare della percentuale di trial corretti previsti dal task (35%, 55% e 75%). A destra vengono presentati i tempi delle risposte corrette a seguito di un feedback standard o irrilevante e infrequente (oddball). W. Notebaert et al., *Post – error slowing: An orienting account*, Cognition 111, 2009.

Il PES sarebbe quindi una reazione di orientamento nei confronti di eventi inaspettati, piuttosto che un evento legato all’ingaggio di processi cognitivi correlati al controllo.

- *Altri Post – Error Adjustment*

Oltre al PES esistono altri fenomeni che interessano i trial successivi a quelli in cui il soggetto ha commesso un errore: il *post – error reduction of interference* ed il *post – error improvement in accuracy*.

Il *post – error reduction of interference* o PERI è stato descritto per la prima volta da Ridderinkhof et al. (2002) come il calo dell'interferenza in un Flanker task a seguito di un errore. Successivamente all'errore l'attenzione selettiva si focalizza maggiormente sul target, riducendo così l'interferenza dei flanker.

Il *post – error improvement of accuracy* o PIA è un fenomeno molto interessante poiché rimanda ad una domanda di cruciale importanza per le neuroscienze: gli esseri umani sono capaci di apprendere dai propri errori, cioè riescono a migliorare la loro performance dopo aver commesso degli errori? Il PIA può presentarsi a lungo termine a seguito di errori o di feedback forniti al soggetto oppure può essere osservato in trial che necessitano un progressivo adattamento al compito svolto a breve termine: in questo ultimo caso il PIA comporta un calo degli errori successivo all'error commission. Gli studi che riguardano questo fenomeno, tuttavia, sono ancora poco chiari e portano ad una visione non univoca del fenomeno: alcuni studi riportano che l'improvement in accuracy si ha solo se il soggetto è cosciente dell'errore commesso (Maier et al., 2011); altri studi affermano che non ci sono differenze nelle frequenze d'errore dei trial seguenti ad una risposta corretta o ad un errore (Hajcak and Simon, 2008); altri studi ancora affermano che ci sia un calo di accuratezza successiva agli errori (Rabbitt and Rodgers, 1977).

Error Related Negativity

Finora abbiamo visto il ruolo dei task comportamentali nello studio dei fenomeni riguardanti il controllo cognitivo. Un importante aiuto nella comprensione di questi meccanismi ci arriva anche da altre fonti. Ci occuperemo in particolare dell'analisi dei dati dell'Elettroencefalogramma. Solitamente, infatti, un esperimento comportamentale prevede la contemporanea registrazione della traccia EEG continua. L'analisi dei potenziali correlati all'evento, *event – related brain potentials* o ERPs, che accompagnano l'errore in un task comportamentale hanno messo in evidenza un evento neurale correlato con i sistemi di monitoraggio dell'errore e della performance. Tale evento prende il nome di Negatività Correlata all'Errore o *Error Related Negativity* (ERN).

L'ERN è una deflessione negativa che appare unicamente negli error trial dei choice – reaction time task. Come si è detto è una deflessione negativa dell'EEG corrente di circa 10 μ V d'ampiezza che prende avvio parallelamente alla risposta del soggetto e raggiunge il picco massimo 100 ms dopo l'avvio della risposta stessa.

Utilizzando un Flanker Task, Gehering nel 1993 mise in evidenza le caratteristiche di questo potenziale correlato all'errore, identificando l'ERN come una manifestazione dell'attività di un sistema associato con il monitoraggio per l'accuratezza della risposta e per la compensazione

dell'errore. Il task utilizzato dall'autore è un Eriksen Flanker Task con i seguenti stimoli:

H H H H H / S S S S S

S S H S S / H H S H H

Stimoli Compatibili

Stimoli Incompatibili

Ogni array ha la medesima probabilità di comparire durante il task, il 25%. I soggetti sono stati istruiti a rispondere premendo un tasto con la mano destra o con la mano sinistra a seconda del target (H o S). Di fondamentale importanza è il fatto che ai soggetti testati vengono assegnate penalità monetarie per gli errori e bonus monetari per le risposte più veloci di una certa soglia. Si vuole testare anche come varia l'ERP quando si richiede al soggetto una maggiore precisione o una maggiore velocità.

Oltre all'EEG solitamente si rilevano l'Elettromiogramma (EMG) e l'Elettrooculogramma (EOG). Il primo serve a determinare l'avvio della risposta poiché rileva l'attività dei muscoli degli arti coinvolti nella risposta. L'EOG viene utilizzato nel conditioning del segnale per rimuovere gli artefatti dovuti al movimento oculare.

L'analisi dei dati EEG comporta il rilevamento delle epoche interessanti, separate per condizione (risposte corrette/risposte errate) e poi mediate separatamente: un ERN è visibile nelle epoche relative alle

risposte errate nel canale RCZ (elettrodo collocato al centro dello scalpo) e non è visibile nei trial corretti.

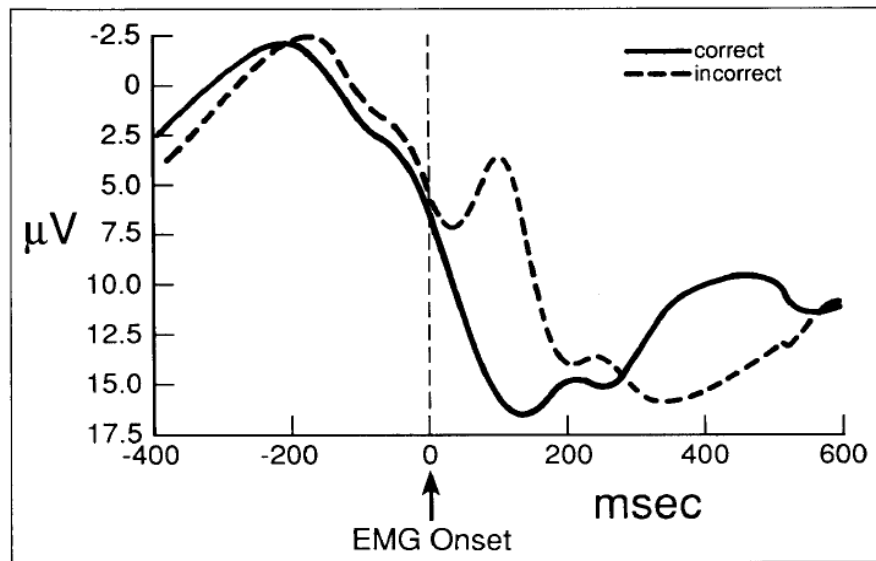


Figura 5. Confronto fra l'ERP registrato sull'elettrodo Cz relativo ai trial corretti (tratto pieno) ed errati (tratteggio). W. J. Gehering et al., *A neural system for error detection and compensation*, Psychological Science, 1993.

Lo studio condotto da Gehering prevede anche una parte volta a valutare quali parametri possono comportare variazioni significative dell'ERN. Enfatizzando nel task l'aspetto dell'accuratezza (*accuracy condition*) o l'aspetto della velocità (*speed condition*) o nessuno dei due (*neutral condition*), si arriva alla conclusione che l'ERN è più ampio se l'errore è commesso nell'*accuracy condition*, mentre è più limitato nella *speed condition*. I dati supportano quindi l'ipotesi che l'ERN non solo sia associato con un meccanismo di error – processing ma che sia anche modulato dalla misura in cui l'accuratezza è importante per il soggetto.

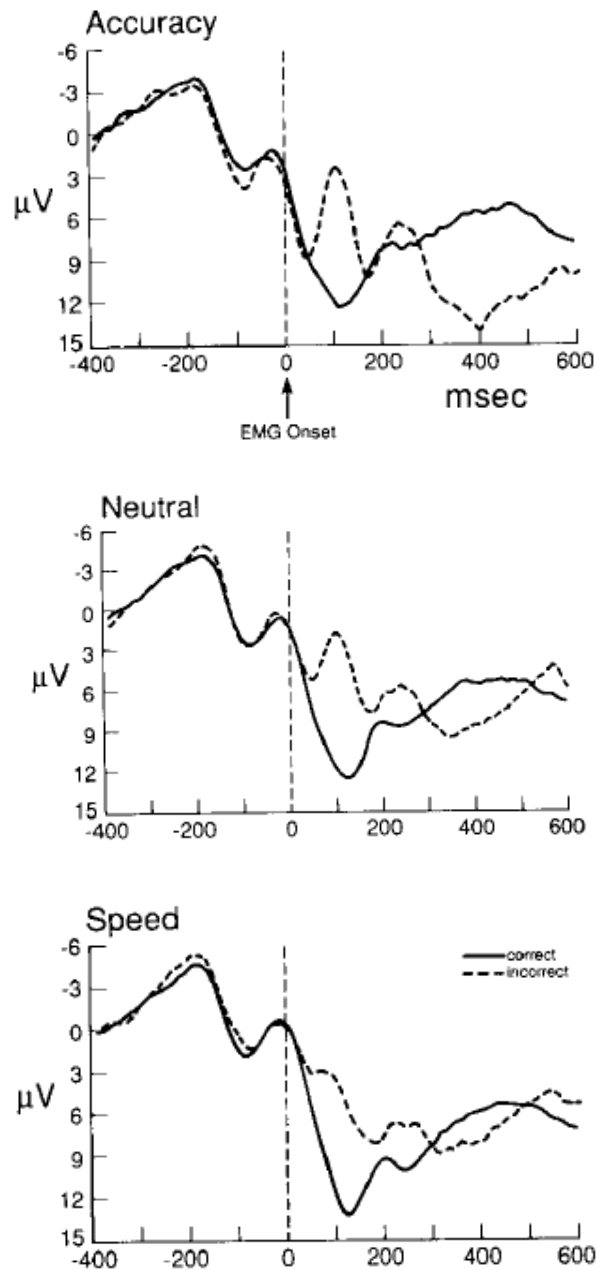


Figura 6. Confronto fra l'ERP registrato sull'elettrodo Cz relativo ai trial corretti (tratto pieno) ed errati (tratteggio). In alto: ERP relativi all'accuracy condition; al centro: ERP relativi alla neutral condition; in basso: ERP relativi alla speed condition. La linea tratteggiata verticale indica l'avvio della risposta. W. J. Gehering et al., "A neural sistem for error detection and compensation", Psychological Science, 1993.

Probabilmente l'ERN è generato nella parte rostrale dell'ACC, zona che, come si è detto, è particolarmente coinvolta nel monitoraggio dell'errore e nei processi legati all'adattamento comportamentale. Sul significato e sul ruolo di questo particolare ERP esistono diverse teorie. Alcuni account considerano l'ERN correlato con la valutazione dell'errore o con gli aggiustamenti comportamentali che succedono all'individuazione dell'errore o *error detection*. Altre teorie vedono nell'ERN la manifestazione effettiva dell'*error detection* stessa. Vediamo le principali ipotesi fatte a riguardo.

- *ERN: Il Conflict Monitoring Account*

Secondo il CM (Botvinick et al., 2001) gli errori in un task sono associati al conflitto dovuto all'interferenza tra i percorsi che conducono alla risposta corretta e a quella errata. Dai dati comportamentali risulta che spesso l'errore in uno *speeded response task* rappresenta il rilascio prematuro della risposta al quale segue un periodo in cui risulta attivata la risposta errata insieme alla correzione corrispondente (si è già parlato del *post – error conflict*). Il conflitto è un fattore critico nella generazione dell'ERN. In alcuni studi si osserva infatti che gli ERN di maggiore entità si hanno in corrispondenza di una successiva correzione dell'errore da parte del soggetto (*response reversal* o capovolgimento della risposta), cioè in

quei trial dove la risposta corretta è fortemente attivata: a ciò corrisponde una situazione in cui il conflitto è massimo. L'ERN sarebbe quindi una manifestazione del conflitto.

- *ERN: Reinforcement Learning Account*

Secondo il RL account (Holroyd & Coles, 2002), l'ERN è generato da un sistema di alto livello coinvolto nell'error processing. Tuttavia esso non è direttamente suscitato dal processo che causa l'errore, né è una misura del conflitto tra più risposte in competizione. Piuttosto quando il soggetto commette un errore il sistema dopaminergico mesencefalico porta un segnale di rinforzo negativo alla corteccia frontale dove si generano gli ERN per via della disinibizione dei dendriti dei motoneuroni dell'ACC. L'ERN sarebbe quindi un segnale di rinforzo coinvolto nella selezione del motor controller appropriato per l'esecuzione di un task. La sua ampiezza è inoltre collegata in senso direttamente proporzionale all'entità dell'errore.

Considerazioni sull'Error Detection in un Flanker Task Modificato.

Come si è detto probabilmente l'ERN è generato dalla corteccia cingolata anteriore e tale regione è coinvolta nel monitoraggio dell'errore e nell'adattamento comportamentale. Le teorie che vedono nell'ERN la manifestazione della quantità di post – error conflict (abbiamo visto la teoria del CM a tal proposito) o del mismatch ('discordanza') tra la risposta data e la risposta corretta (Gehering et al. 1993), possono essere definite come teorie dell'*error detection* poiché, essendo una misura del conflitto o del mismatch legato alla risposta, l'ERN dovrebbe avere un'ampiezza tanto maggiore quanto maggiore è la percezione dell'errore (*detectability of error*).

La *detectability* è un indice della consapevolezza che il soggetto ha di aver commesso un errore, conseguentemente si dovrebbe trovare che l'ERN ha un' ampiezza maggiore nel caso in cui l'error detection da parte del soggetto è conscia. La relazione tra error detection e ERN è stata discussa da M. Maier, M. Steinhauser e R. Hubner (2008) attraverso due esperimenti.

Il loro approccio si basa sulla valutazione dell'ERN in errori di diverso tipo, dove la differenza sta proprio nella minore o maggiore percezione dell'errore da parte del soggetto. Per fare ciò si è utilizzata una

variante del flanker task con quattro scelte e otto target in totale. Lo stimolo presentato è formato da un target e tre flanker identici a sinistra e a destra. Le otto lettere utilizzate sono mappate con un tasto a gruppi di due, per un totale di quattro tasti. Il target può essere affiancato da una delle sei lettere assegnate ad un tasto diverso dal suo a formare 48 stimoli incongruenti. Nel task gli stimoli congruenti sono stati sostituiti da 48 stimoli neutri dati dalla combinazione dei target con sei simboli neutri: §, \$, %, &, #, e ?.

Con questa variante del task gli errori possono essere di due tipi: flanker error e nonflanker error. Per gli stimoli in cui target e flanker sono associati a due tasti differenti, se la risposta data dal soggetto è associata al tasto relativo al flanker (nell'esempio della figura successiva corrisponde alla pressione dell'indice sinistro, 'R') si ha il flanker error, se invece la risposta è associata ad una delle altre possibili risposte (eccetto ovviamente quella corretta) si ha un nonflanker error. Nella Figura 7 è riportato un esempio di stimolo, il mapping stimolo – tasto e la tipologia di errori.

I flanker e i nonflanker error sono adatti allo scopo in quanto differiscono proprio nella detectability. Infatti, i flanker error ricorrono ogni qual volta troppa attenzione è allocata ai flanker, cioè nel caso in cui l'attenzione selettiva non è ottimale. Il soggetto commette un errore di questo tipo quando il percorso relativo al target è poco attivato: per questo motivo, una volta data la risposta, questo sarà meno consapevole di aver commesso un errore.

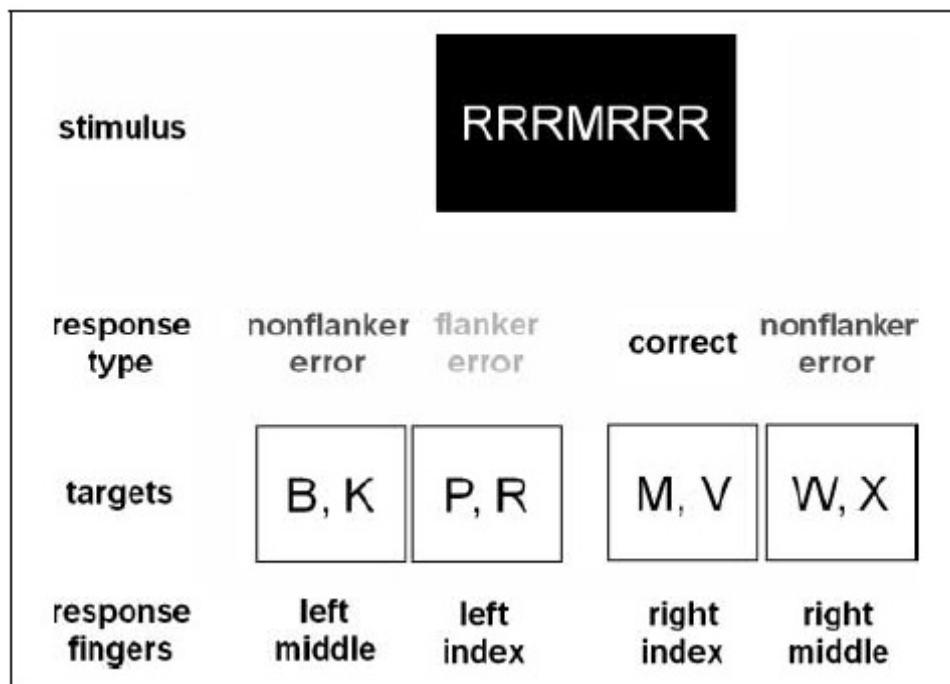


Figura 7. Mapping stimolo – risposta in un four – choice flanker task. Per la descrizione del task si veda il testo. M. Maier, M. Steinhauser and R. Hubner, *Is the Error – related Negativity amplitude relate to error detectability? Evidence from effects of different error types*, Journal of Cognitive Neuroscience, 2008.

L'obiettivo dello studio è quello di capire se l'ERN rappresenta il processo di error detection: in tal caso si avrà che maggiore è la detectability più ampio è l'ERN. Se ciò non avviene si potrà concludere che l'ERN dipende da fattori altri rispetto alla consapevolezza dell'errore. Tale consapevolezza può essere manifestata dal soggetto durante il task premendo un apposito tasto.

I risultati di questo studio, articolato in due esperimenti, sono i seguenti:

- la detectability, quantificata come il numero di avvenute correzioni da parte dei soggetti, risulta più alta nei nonflanker error che nei flanker error,;
- i flanker error pur avendo una bassa detectability mostrano gli ERN più ampi rispetto ai nonflanker error.

Secondo le teorie dell'error detection ad un aumento dell'ampiezza dell'ERN dovrebbe accompagnarsi un aumento della consapevolezza dell'errore da parte del soggetto: i dati tuttavia non confermano questa ipotesi. I risultati ottenuti indicano che l'ampiezza dell'ERN è maggiore per gli errori scarsamente individuabili mentre è minore per quelli che si individuano con più facilità: i processi che determinano l'error detection sono quindi disgiunti da quelli che danno luogo all'ERN.

Una possibile spiegazione per i risultati ottenuti riguarda l'aspetto valutativo dell'errore. L'ampiezza dell'ERN potrebbe riflettere la significatività dell'errore, ovvero quanto i comportamenti attuati dal soggetto si discostano dagli obiettivi del task. In tal senso i flanker error sono accompagnati da un ERN più ampio perché tale tipo d'errore è più significativo ai fini di un task in cui il soggetto viene istruito a rispondere velocemente evitando di sbagliare e a ignorare i flanker. Un flanker error rappresenta un doppio fallimento nel task - il soggetto non solo ha risposto

in maniera errata, ma ha anche premuto il tasto relativo al flanker! - rispetto ad un nonflanker error in cui il soggetto ha semplicemente premuto un tasto sbagliato. Inoltre un errore flanker ha maggiore contenuto informativo di un errore nonflanker: il primo indica che occorre maggiore attenzione selettiva per migliorare le performance, quindi un ERN di maggiore ampiezza potrebbe essere correlato con un maggiore informazione utile. Le considerazioni svolte sinora supportano gli assunti del reinforcement learning account: l'ERN sarebbe correlato con un segnale d'apprendimento, rilasciato ogni qual volta un evento è peggiore di come ce lo si aspettava e sensibile alla 'gravità' dell'errore commesso.

Capitolo 3

Introduzione alle Reti Neurali

Un importante strumento per l'analisi dei processi cognitivi e per la loro simulazione è offerto dalle reti neurali. Con il termine rete neurale o *neural network* si intende una rete interconnessa di neuroni biologici atti a svolgere un determinato compito. Una rete neurale artificiale è pertanto costituita da più unità di elaborazione elementari, dette neuroni, interconnesse tra di loro mediante collegamenti di tipo dendritico o sinaptico alle quali vengono attribuiti dei pesi.

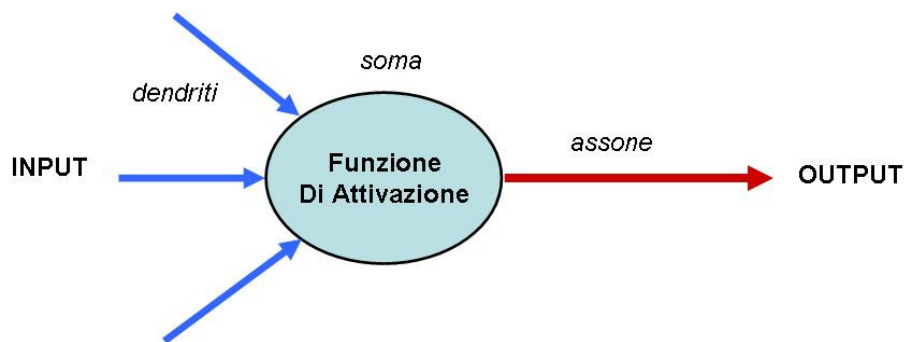


Figura 8. Schematizzazione di un neurone artificiale. Un neurone biologico riceve il segnale da uno o più neuroni presinaptici, elabora l'informazione all'interno del soma e, qualora la somma dei segnali superi la soglia, scarica un certo numero di impulsi lungo la terminazione assonale. Il funzionamento del neurone artificiale trae ispirazione da quello biologico, una volta definita una funzione di attivazione.

Proprio come in un neurone biologico, il neurone artificiale utilizza l'informazione ottenuta in ingresso dagli alberi dendritici al fine di produrre un segnale d'uscita sulla base di una funzione di attivazione.

Un'insieme di unità che svolgono un certo ruolo all'interno di una rete costituiscono uno strato o *layer*. A tal proposito si opera la distinzione tra reti completamente connesse e reti stratificate o multilivello: nelle prime tutti i neuroni possono essere connessi tra loro; nelle seconde i neuroni sono organizzati in strati collegati tra loro o tra uno strato e l'altro, all'interno del medesimo strato tutti i neuroni hanno la stessa funzione di attivazione. In particolare, una certa unità j può ricevere stimoli dal layer precedente, ovvero da uno o più neuroni presinaptici, o direttamente dall'esterno. Ciascuna connessione presenta un peso sinaptico che ne denota la forza. La somma degli stimoli che si presentano in ingresso al j -esimo neurone viene processata da una funzione di attivazione appositamente scelta a seconda del tipo di rete che si vuole utilizzare: si ottiene così l'uscita neuronale (vedi *Figura 9*). Il tipo di rete che utilizzeremo è una rete multistrato con una funzione di attivazione sigmoideale.

L'obiettivo della rete è quello di simulare l'approccio di un soggetto ad un Flanker Task modificato: affinché l'effetto di congruenza possa essere messo in evidenza occorre utilizzare una rete di tipo competitivo, ovvero un modello neurale in cui ciascun neurone è in competizione con gli

altri neuroni del proprio layer di appartenenza. Una volta configurata una rete di tale tipo, questa risponde ad un dato stimolo attivando il neurone che lo rappresenta (o che più gli si avvicina): se si attivano simultaneamente più neuroni questi competono sulla base di pesi assegnati e quello che raggiunge un'eccitazione maggiore è il *winning neuron*.

In una prima implementazione della rete neurale utilizzeremo un modello feed-forward multistrato tra uno strato e l'altro: ciò implica che il flusso di informazione procederà in modo unidirezionale dal layer di partenza fino a quello di uscita. All'interno del singolo strato la rete sarà invece competitiva.

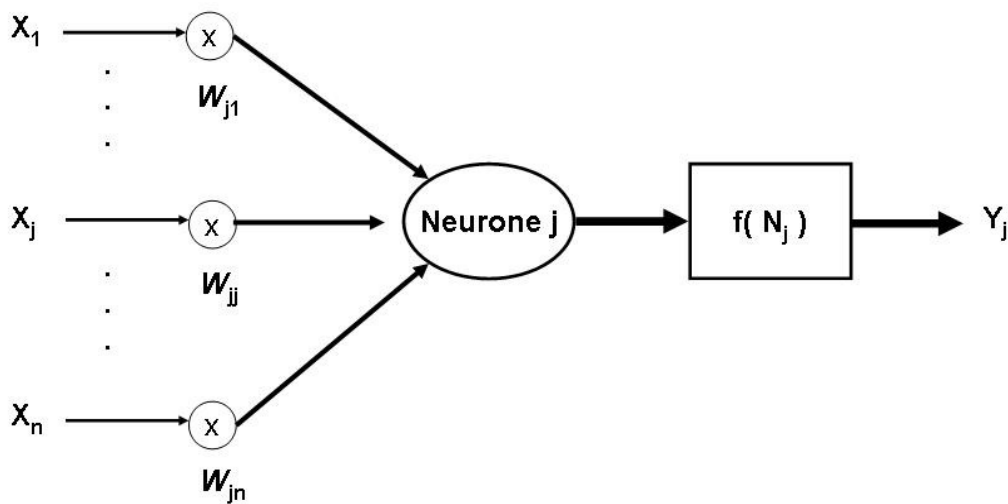


Figura 9. Schematizzazione di un neurone artificiale: l'ingresso del neurone è la somma di ciascun ingresso X_i ($i=1,\dots,n$) moltiplicato per il peso della sinapsi W_{ji} relativo all'ingresso X_i e al j -esimo neurone. Tale somma passa per la funzione d'attivazione del j -esimo neurone (N_j) e fornisce il segnale Y_j in uscita.

Implementazione di un Modello Neurale per un Flanker Task

- *Struttura della Rete Neurale*

Il modello neurale che si vuole realizzare è riferito ad un Eriksen Flanker Task modificato come quello presentato nel paragrafo ‘*Considerazioni sull’Error Detection in un Flanker Task Modificato*’, con il mapping stimolo – risposta di *Figura 7*.

Le lettere target sono in tutto otto: B K, P R, M V, W X, mappate a due a due nell’ordine con 4 possibili risposte, da uno a quattro. Oltre a queste otto lettere sono presenti sei stimoli neutri che ricordiamo essere: \$, %, &, #, e ?.

Si è scelto di codificare ogni lettera con un diverso neurone. Poiché lo stimolo in un Flanker Task è del tipo ‘KKKPKKK’, abbiamo tre gruppi di neuroni: un gruppo per il target centrale, un secondo gruppo per il flanker a sinistra del target e un altro gruppo per il flanker a destra. A seconda dello stimolo si attiverà quindi un neurone in ciascun gruppo. Questo strato di neuroni prende il nome di *stimuli layer* e sarà composto da 8 neuroni per le possibili lettere più altri 6 per gli stimoli neutri, ciascuno nelle tre possibili posizioni: laterale sinistra, centrale, laterale destra. In

tutto lo stimuli layer avrà quindi 42 neuroni. Per completezza nella zona centrale consideriamo tutti i 14 stimoli: in realtà gli input prevedono che tale posizione sia attivata solo dai possibili target, ovvero dalle otto lettere.

I neuroni dello stimuli layer fanno sinapsi con quelli del *response layer* che è costituito da 4 neuroni mappati rispettivamente con i target come mostrato in figura.

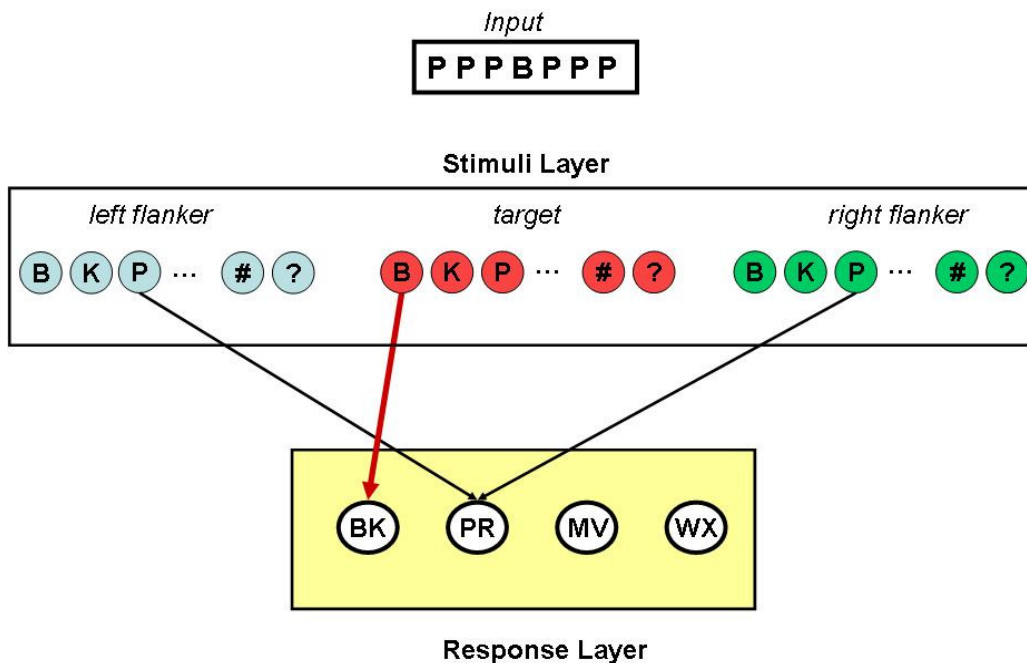


Figura 10. Stimuli Layer (SL) e Response Layer (RL). Considerando lo stimolo incongruente 'PPPBPPP' presentato in figura, si attivano nello SL tre neuroni: due corrispondenti al flanker - di cui uno nel gruppo a sinistra e uno in quello a destra - e il target nell'insieme centrale. La competizione nello SL e i pesi sinaptici tra i due layer determinano l'attivazione di uno o più neuroni nel RL: nell'esempio si avrà l'attivazione di due risposte competitive. Da questa competizione finale si otterrà la risposta che sarà corretta se vincerà il neurone BK, errata e di tipo flanker se vincerà PR.

A questo punto è opportuno definire la matrice W dei pesi delle sinapsi tra lo stimuli layer e il response layer, con il generico elemento w_{ij} in cui i indica il neurone postsinaptico e va da 1 a 4, mentre j indica il neurone presinaptico e va da 1 a 42. Otterremo una matrice 4×42 .

Introduciamo l'attenzione selettiva nel modello attraverso uno strato apposito costituito da tre neuroni: l'*attentional layer*. I tre neuroni rappresentano l'attenzione per il blocco a sinistra del target, a destra del target e sul target stesso. Definiamo la matrice A dei pesi tra l'*attentional layer* e lo stimuli layer come una 42×3 .

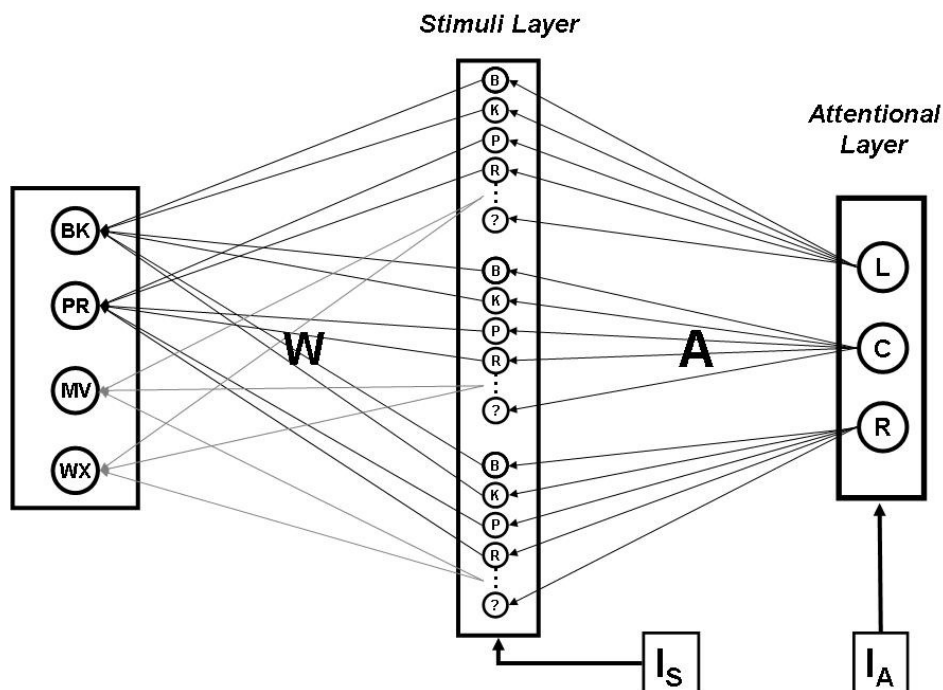


Figura 12. Modello Neurale per un Flanker Task.

La competizione tra neuroni avverrà sia nello stimuli layer che nel response layer. Saranno conseguentemente definite due matrici: L e H . La matrice L contiene i coefficienti di autoeccitazione e di competizione tra i neuroni dello stimuli layer: si assegnerà un valore $L_{ex} > 0$ ad indicare l'autoeccitarsi del neurone j e un valore $L_{in} < 0$ ad indicare l'inibizione degli altri neuroni i (con i diverso da j) del layer. La matrice H sarà una 4x4 con due valori H_{ex} e H_{in} , rispettivamente con lo stesso significato di L_{ex} e L_{in} . Il modello è schematizzato nella *Figura 12*, I_S e I_A sono gli ingressi forniti al sistema.

• *Funzione d'Attivazione e Variabili di Stato*

La relazione fondamentale per determinare l'uscita di un neurone a partire dagli ingressi è la funzione di attivazione. Definiamo la medesima funzione per lo stimoli layer e per il response layer come una sigmoide con parametri k e ϑ :

$$y = \frac{1}{1 + e^{-k(v-\vartheta)}},$$

dove v è la generica variabile di stato ingresso della funzione di attivazione. Per $v \longrightarrow -\infty$ si ha che $y \longrightarrow 0$: questa condizione corrisponde alla massima inibizione del neurone che ha come effetto un'uscita nulla. Per $v \longrightarrow +\infty$ si ha che $y \longrightarrow 1$: questa condizione corrisponde alla massima eccitazione del neurone che porta l'uscita al livello più alto. Infine, per $v \longrightarrow \vartheta$, si ha che y assume il valore intermedio di 0,5. ϑ stabilisce la posizione della sigmoide, mentre al crescere di k aumenta la pendenza del tratto centrale della sigmoide stessa. La dinamica del sistema è data dall'inserimento di un blocco con funzione di trasferimento di tipo passa basso che riceve in ingresso tutti gli input del neurone.

Definiamo le uscite dei vari layer come segue:

- y^A è l'uscita dei neuroni dell'attentional layer;
- y^S è l'uscita dei neuroni dello stimulus layer;
- y^R è l'uscita dei neuroni del response layer.

Consideriamo l'uscita dell' i -esimo neurone y_i^S dello strato S. La relazione che lega la variabile di stato v_i^S con gli ingressi al neurone è un'equazione differenziale:

$$\tau \frac{d}{dt} v_i^S = -v_i^S + I_{Si} + \sum_{a=1}^3 A_{ia} y_a^A + \sum_{s=1}^{42} L_{is} y_s^S + N_i^S.$$

v_i^S è come detto la variabile di stato dell' i -esimo neurone dello stimuli layer; τ è la costante di tempo del sistema. Analizziamo gli altri termini della relazione:

- I_{Si} è l'input i -esimo nello strato S. I_S è dunque il vettore stimolo presentato alla rete e pertanto avrà dimensioni 42x1(14 possibili input a sinistra, 14 centrali, 14 a destra). La sua struttura prevederà un valore alto per una lettera a sinistra, uno per una lettera a destra (la stessa di quella a sinistra) e uno per il target, tutti gli altri elementi saranno a zero. Ad esempio nel caso di 'PPPBPPP', gli elementi a uno del

vettore saranno il terzo (P left), il quindicesimo (B center) e il trentunesimo (P right);

- Il termine $\sum_{a=1}^3 A_{ia} y_a^A$ è dato dalla somma dei prodotti dei pesi sinaptici dello strato A con le uscite dell'A layer stesso. Poiché l'A layer ha la funzione di regolare l'attenzione selettiva indirizzandola sul centro, tale vettore è costituito da termini tutti nulli (o di valore basso) eccetto quello relativo al target;

- Il termine $\sum_{s=1}^{42} L_{is} y_s^S$ è dato dalla somma dei prodotti dei pesi sinaptici dello strato S relativi alla competizione dei neuroni interni al layer per le rispettive uscite dello strato stesso. L , come si è detto, presenta un valore alto che permette al neurone di autoeccitarsi e un valore basso con cui il neurone inibisce gli altri neuroni dello strato;

- N_i^S è l'i-esimo elemento di un vettore N^S contenete rumore bianco con una determinata media m e deviazione standard st , di dimensione 42x1.

Integrando l'equazione con il metodo di Eulero ricaviamo la variabile di stato v_i^S con i che va da 1 a 42. A questo punto possiamo ottenere l'uscita y_i^S dell' i -esimo neurone nello stimuli layer, utilizzando la funzione di attivazione precedentemente descritta:

$$y_i^S = \frac{1}{1 + e^{-k(v_i^S - \vartheta)}}.$$

La criticità del modello sta nel settare i valori dei pesi sinaptici, della costante di tempo, dei parametri del rumore e dei parametri della sigmoide.

Considerazioni analoghe possono essere svolte per le uscite dell' i -esimo neurone (con $i=1, \dots, 4$) nello strato della risposta. L'equazione differenziale per la variabile di stato v_i^R assume la seguente forma:

$$\tau \frac{d}{dt} v_i^R = -v_i^R + \sum_{s=1}^{42} W_{is} y_s^S + \sum_{r=1}^4 H_{ir} y_r^R + N_i^R.$$

Con τ indichiamo la costante di tempo uguale a quella dello strato S, analizziamo gli altri termini della relazione:

- Il termine $\sum_{s=1}^{42} W_{is} y_s^S$ è dato dalla somma dei prodotti dei pesi delle sinapsi tra lo strato S e R per le uscite dello strato S;

- Il termine $\sum_{r=1}^4 H_{ir} y_r^R$ è dato dalla somma dei prodotti dei pesi sinaptici relativi alla competizione all'interno del response layer per le uscite del layer stesso. La matrice H , come si è detto, presenta un valore alto che permette al neurone di autoeccitarsi e un valore basso con cui il neurone inibisce gli altri neuroni dello strato;
- Il termine N_i^R rappresenta l'i-esimo elemento di un vettore N^R contenente rumore bianco con una determinata media m e deviazione standard st (uguali a quelli scelti per lo stimuli layer), di dimensione 4x1.

Integrando l'equazione con il metodo di Eulero ricaviamo anche in questo caso la variabile di stato v_i^R con i che va da 1 a 4. A questo punto possiamo ottenere l'uscita y_i^R dell'i-esimo neurone nel response layer, utilizzando la medesima funzione di attivazione :

$$y_i^R = \frac{1}{1 + e^{-k(v_i^R - \vartheta)}}$$

dove k e ϑ sono gli stessi utilizzati nello strato S.

• Implementazione della Rete Neurale

La rete neurale è stata implementata in ambiente Matlab (vers. 7.8.0, R2009a). È utile scrivere le equazioni differenziali del modello in forma matriciale. Le due equazioni diventano:

$$\tau \frac{d}{dt} V^S = -V^S + I_S + AY^A + LY^S + N_S \quad (\text{Stimuli Layer}),$$

$$\tau \frac{d}{dt} V^R = -V^R + WY^S + HY^R + N_R \quad (\text{Response Layer}).$$

V^S e V^R sono i vettori di stato rispettivamente 42x1 e 4x1, A e W sono le matrici dei pesi sinaptici tra i layer mentre L e H sono le matrici con i pesi delle sinapsi competitive interne ai layer di dimensioni nell'ordine 42x42 e 4x4; I_S è il vettore dello stimolo (42x1), N^S e N^R sono i vettori rumore di dimensioni 42x1 e 4x1 rispettivamente. A partire dalle variabili di stato opportunamente integrate si ricavano le variabili d'uscita. Si noti che non è stata definita l'equazione per l'attentional layer: i valori della variabile d'uscita y^A verranno imposti come un ingresso, avranno quindi un valore fisso. Per le altre uscite valgono le seguenti relazioni:

$$Y^S = F(V^S); \quad Y^R = F(V^R)$$

con $F(V)$ si indica la funzione d'attivazione precedentemente vista.

Il primo passo nella realizzazione del modello consiste nella scrittura delle matrici necessarie, ovvero: A, W, L, H . Per ciascuna si attribuisce un valore alto e uno basso di primo tentativo. Avremo quindi i valori A_{high} e A_{low} , W_{high} e W_{low} , L_{ex} e L_{in} , H_{ex} e H_{in} . Si procede con la scrittura delle equazioni differenziali assegnando i valori di τ , del passo di integrazione dt e dell'intervallo d'integrazione t . Si inizializzano a zero le variabili di stato V^S e V^R ; Y^A viene assegnata a dei valori fissi iniziali: l'elemento centrale con valore alto ad indicare il focalizzarsi dell'attenzione selettiva, gli altri due valori bassi o nulli in corrispondenza dei flanker. È necessario stabilire anche media e deviazione standard del rumore e i parametri della sigmoide. I valori iniziali scelti per la prima fase di prova della rete sono riportati in *Tabella 1*.

A_{high}	A_{low}	W_{high}	W_{low}	L_{ex}	L_{in}	H_{ex}	H_{in}
1	0	1	0,1	1	-0,5	0,5	-0,4
m	st		k	ϑ		τ (ms)	Y^A
0,25	0,2		5	0,5		400	[0 0,5 0]

Tabella 1. Parametri iniziali della rete.

Capitolo 4

Simulazioni e Risultati

Dopo aver strutturato il modello si può procedere con le simulazioni utilizzando diverse tipologie di input. Una volta eseguito un numero adeguato di simulazioni si potranno discutere i risultati facendo riferimento ai dati ottenuti dall'analisi comportamentale in un Flanker Task.

- *Esempi di Simulazione*

Inserendo un vettore I_S con un possibile ingresso possiamo graficare l'andamento dell'attivazione dei neuroni nello strato S ed R, nonché le sigmoidi dei neuroni d'uscita Y^R . Ad esempio, prendiamo come input lo stimolo 'PPPBP' e come soglia di risposta $th = 0.8$. L'elaborazione del modello in una simulazione produce i seguenti risultati presentati in *Figura 12*.

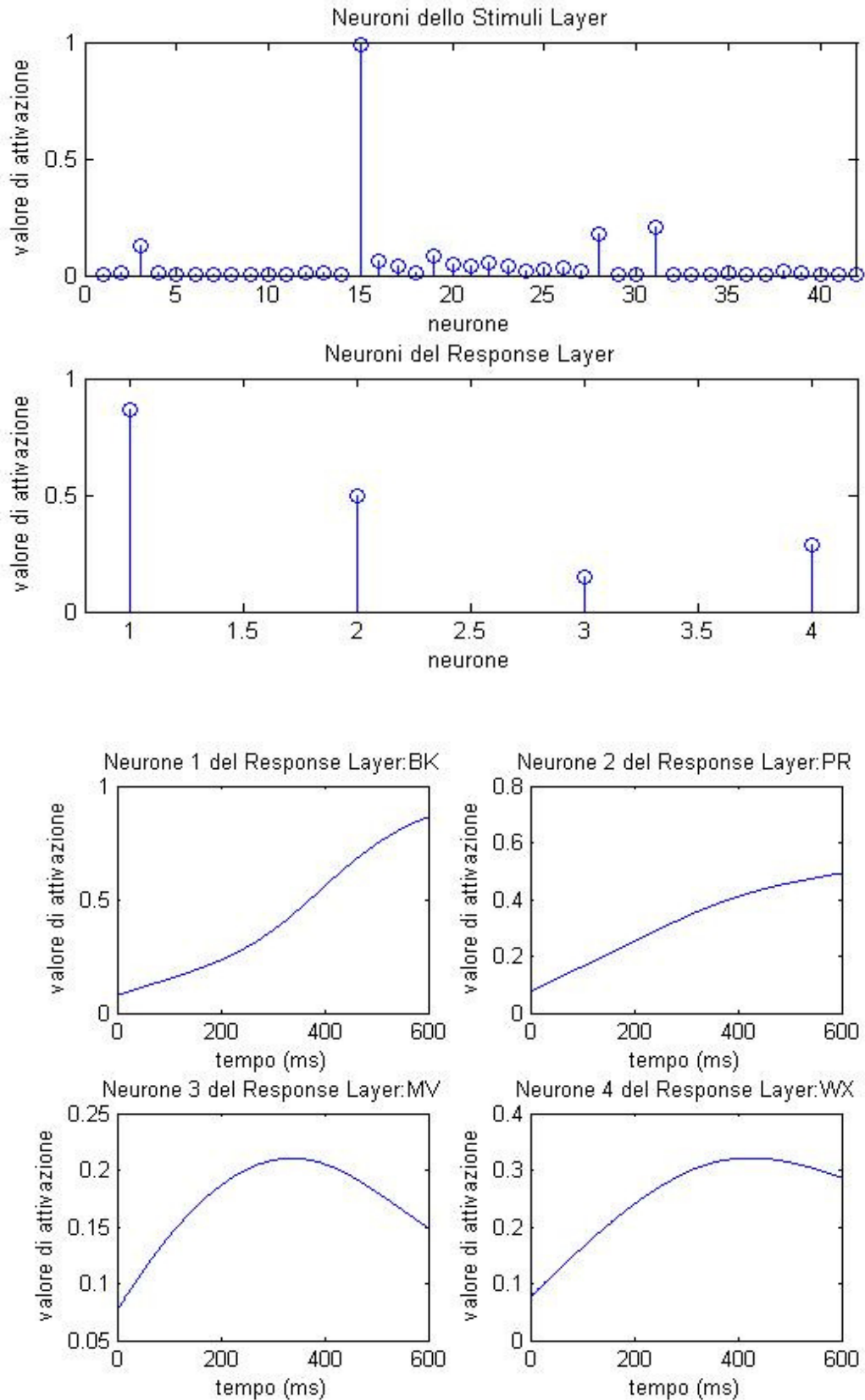


Figura 12. In alto l'attivazione neuronale nello strato S e nello strato R. In basso l'attivazione dei quattro neuroni dell'R layer. La discussione si rimanda al testo.

In Figura 12, in alto, vengono mostrati i valori di attivazione dei neuroni nello strato S e nello strato R nella situazione finale di equilibrio. Si notano i due neuroni flanker (terzo e trentunesimo) e il target (il quindicesimo neurone) che assumono valori più alti rispetto agli altri neuroni. Alcuni neuroni hanno un valore d'attivazione comunque basso ma non nullo per via del rumore aggiunto. Nella Figura 12, in basso, vediamo attivate le due risposte competitive: BK e PR. Il rumore rende debolmente attivo anche il neurone WX. La prima a portarsi a uno è la risposta BK che supera la soglia ($th = 0.8$), in 543ms.

Gli altri neuroni del response layer rimangono tutti sottosoglia. Il modello ha risposto correttamente rispetto allo stimolo, la prima risposta a portarsi sopra la soglia è in fatti quella corrispondente al neurone BK.

Si riporta in Figura 13 l'esito di una simulazione che produce un flanker error: lo stimolo utilizzato è il medesimo. Si riportano unicamente i grafici relativi all'attivazione dei neuroni d'uscita. L'attivazione nell'S layer è molto forte sia per i flanker che per lo stimolo in questa simulazione. Il risultato è che la rete fornisce in 458ms una risposta errata e di tipo flanker. Poiché il target risulta ancora molto attivato si assiste alla correzione della prima risposta data 88ms dopo.

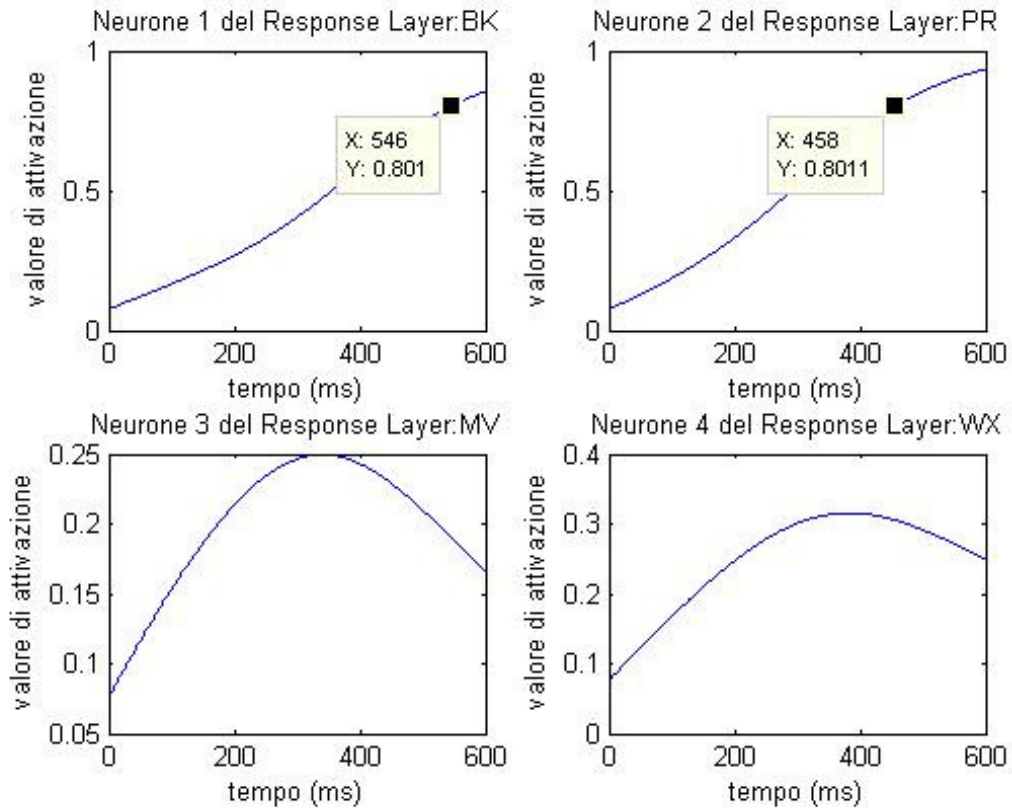


Figura 13. Attivazione dei quattro neuroni dell'R layer. In alto a destra il winning neuron corrispondente alla lettera flanker P: la risposta data dal modello è errata. Il neurone 1, corrispondente al target B, è molto attivato e produce immediatamente dopo all'errore la correzione.

• *Macro per la Simulazione di un Esperimento*

Per simulare un numero sufficiente di trial si sono realizzate delle apposite macro che forniscono gli input, selezionano le risposte date e le suddividono in condizioni. La matrice di input di dimensioni 144x42 è composta dai i seguenti stimoli:

- 48 stimoli neutri;
- 48 stimoli incongruenti;
- 16 stimoli congruenti ripetuti ciascuno 3 volte per un totale di 48.

Ad ogni esecuzione della simulazione viene prelevato un input. Questo viene elaborato dalla rete: quando uno dei neuroni del RL supera la soglia $th = 0.8$ una macro registra la risposta insieme al relativo tempo; se uno dei restanti neuroni supera nuovamente la soglia viene registrata la correzione alla risposta. Le risposte vengono classificate in sei condizioni:

- congruente errata/corretta;
- neutra errata/corretta;
- incongruente errata/corretta.

Dopo l'esecuzione di 10 successive simulazioni o blocchi, per un totale quindi di 1440 trial, si sono ottenuti i primi risultati in termini di tempi di risposta alle varie tipologie di stimolo e frequenze relative d'errore: si riportano nelle seguenti tabelle. Per il listato del codice del modello e delle relative macro si veda l'**Appendice** .

	CONGRUENTI		INCONGRUENTI		NEUTRE	
	corrette	errate	corrette	errate	corrette	errate
RT (ms)	390	364	459	464	482	0
%	98	2	67	33	100	0
RT (ms)	395	402	485	477	465	0
%	98	2	59	41	100	0
RT (ms)	386	0	489	460	475	505
%	100	0	47	53	94	6
RT (ms)	381	0	430	448	462	542
%	100	0	63	37	94	6
RT (ms)	389	484	445	441	452	564
%	98	2	59	41	97	3
RT (ms)	394	0	470	451	455	398
%	100	0	62	38	91	9
RT (ms)	402	527	446	464	441	0
%	98	2	58	42	100	0
RT (ms)	389	360	458	452	461	517
%	98	2	49	51	92	8
RT (ms)	403	0	457	455	483	0
%	100	0	60	40	100	0
RT (ms)	395	0	477	464	457	554
%	100	0	70	30	97	3

	CONGRUENTI		INCONGRUENTI		NEUTRE	
	corrette	errate	corrette	errate	corrette	errate
RT (ms)	391,3	427,4	459,3	458,3	464,5	509,4
%	99	1	59,5	40,5	96	4

Tabella 2 e Tabella 3. Risultati di prima simulazione su 10 blocchi. In alto: tempi di risposta (RT) e percentuali d'errore relative alle tre condizioni (congruente, neutro, incongruente). In basso: medie dei tempi di risposta (RT) e delle percentuali d'errore relative alle tre condizioni (congruente, neutro, incongruente).

• *Dati Comportamentali di Riferimento*

Come dati di riferimento, da utilizzare come confronto per i risultati ottenuti dal modello, utilizzeremo i dati comportamentali ricavati da due esperimenti (*i valori riportati si riferiscono a: Cefalù G., ‘Analisi dati comportamentali relativi all’Eriksen Flanker Task’, 2011-2012*). Il primo consiste in un Flanker Task classico con stimoli di tipo congruente e incongruente, con due sole lettere (‘R’ ed ‘L’). Si riportano tempi di risposta e percentuali relative. Queste verranno utilizzate come termine di paragone per le risposte agli stimoli congruenti prodotte dal modello.

	CONGRUENTI		INCONGRUENTI	
	Corrette	Errate	Corrette	Errate
RT (ms)	416,7	247,8	552,8	398,3
%	98,9	1,1	61,6	38,4

Tabella 4. Tempi medi (RT) e percentuali (%) delle risposte in un Flanker Task Classico.

Per quanto riguarda i trial neutri, si farà riferimento ad un esperimento che prevede un Flanker Task modificato come quello precedentemente descritto (Maier et al., 2008). Si utilizzeranno i dati riportati come termine di paragone per i trial neutri e incongruenti.

	NEUTRE		INCONGRUENTI	
	Corrette	Errate	Corrette	Errate
RT (ms)	561	543,7	570	552,7
%	83	17	78,4	21,6

Tabella 5. Tempi medi (RT) e percentuali (%) delle risposte in un Flanker Task con stimoli neutri e incongruenti.

Le prime considerazioni che possiamo trarre dal confronto tra i dati comportamentali e quelli ottenuti dalle simulazioni sono le seguenti:

- il modello fornisce frequenze d'errore maggiori per gli input incongruenti come suggerito dai dati comportamentali e, in generale, dalla letteratura;
- le percentuali d'errore nei trial neutri simulati sono leggermente maggiori del caso congruente ma inferiori al caso incongruente. Anche i tempi di risposta nel caso corretto – neutro si posizionano a metà strada tra quelli del caso congruente e quelli del caso incongruente, come previsto dai dati comportamentali;
- i RT nel caso corretto – congruente sono i più brevi nella simulazione così come nei riferimenti. Nel caso neutro – errato e corretto – errato, la media dei RT è troppo alta. Non solo si discosta dai dati presi come riferimento ma, secondo quanto riportato dalla letteratura, si dovrebbero ottenere tempi di risposta rapidissimi: l'errore comportamentale nelle due condizioni dovrebbe infatti essere determinato da una risposta affrettata o da motor failure;
- mediamente il 14% delle risposte per blocco rimane sottosoglia;
- il modello talvolta produce una correzione nel caso di risposte corrette.

Al fine di migliorare le performance del modello, si può studiare la sensitività relativa ad alcuni parametri. Può sicuramente essere interessante variare i fattori che regolano la competizione all'interno dello stimoli o del response layer.

Analisi della Sensitività dei Parametri della Rete

L'analisi di sensitività consiste nel variare un parametro singolo o un gruppo di parametri della rete e osservare conseguentemente come cambiano le performance della stessa. Ci si concentrerà in particolar modo sull'analisi dell'influenza dei fattori che regolano la competizione all'interno dello strato S e dello strato R.

- *Analisi sui parametri L dello Stimuli Layer*

Modificare la quantità di competizione esistente nello stimuli layer consiste nel variare i parametri della matrice L: L_{ex} e L_{in} . Per aumentare la competizione possiamo modificare i due valori ponendo: $L_{ex} = 3$ e $L_{in} = -1$. I risultati ottenuti sono riportati di seguito e si riferiscono a 10 simulazioni.

	CONGRUENTI		INCONGRUENTI		NEUTRE	
	corrette	errate	corrette	errate	corrette	errate
RT(ms)	423,3	460,4	465,9	476,6	436,2	499,8
%	98,7	1,3	76,5	23,5	97,3	2,7

Tabella 6. Tempi medi (RT) e percentuali (%) delle risposte in una simulazione del modello.

Notiamo come aumentando la competizione i tempi si avvicinino tra loro. Diminuiscono il numero di risposte sottosoglia così come anche il numero di correzioni errate. Ancora una volta troviamo però che i tempi relativi alle risposte errate sono superiori a quelli delle corrette nelle rispettive condizioni. Le percentuali delle congruenti e delle incongruenti soddisfano le aspettative. Le risposte agli stimoli neutri dovrebbero mostrare una frequenza d'errore intermedia tra le altre due. A riguardo, si potrebbe lavorare sul rumore per ottenere una percentuale di errate – neutre più soddisfacente.

- *Analisi sui parametri H del Response Layer*

Può essere interessante valutare come la competizione nel secondo layer, quello di risposta, influenzi il comportamento del modello. Modifichiamo i parametri della matrice H, ponendo $H_{ex} = 2$ e $H_{in} = -0.8$. I risultati ottenuti sono riportati di seguito e si riferiscono a 10 simulazioni.

	CONGRUENTI		INCONGRUENTI		NEUTRE	
	corrette	errate	corrette	errate	corrette	errate
RT(ms)	390,1	423,3	443,5	446,0	453,5	467,3
%	95,9	4,1	59,8	40,2	82,8	17,2

Tabella 6. Tempi medi (RT) e percentuali (%) delle risposte in una simulazione del modello.

Otteniamo dei tempi di risposta vicini tra loro: nel singolo blocco talvolta le risposte errate hanno tempi minori delle corrette relative alla stessa tipologia di stimolo. I tempi di risposta agli stimoli neutri sono però troppo lunghi, in particolare non dovrebbero superare quelli relativi alle incongruenti. La forte componente di autoeccitazione nel layer della risposta porta a un elevato numero di errori flanker: l'attivazione della risposta legata al flanker si rafforza velocemente e ha la meglio sul target. Le percentuali d'errore corrispondenti agli stimoli neutri sono più vicine ai dati comportamentali rispetto alle precedenti simulazioni.

Conclusioni

Le simulazioni svolte attraverso il modello di rete neurale implementato hanno permesso di mettere in luce alcuni semplici aspetti del controllo esecutivo in un task comportamentale specifico. Al fine di migliorare le prestazioni del modello si può pensare di analizzare ulteriormente la sensitività di alcuni parametri. Si può modificare, ad esempio, il grado di competitività all'interno dei due layer S e R in modo da migliorare i tempi di risposta; si può variare la quantità di rumore inserita differenziando magari i parametri relativi al rumore stesso nei layer S e R; si può pensare di calcolare dinamicamente l'attenzione selettiva trial dopo trial; si possono infine modificare le funzioni di attivazione neuronali dei layer della rete. Occorrerà un ulteriore studio su questi parametri, in gruppo o singolarmente, per ridurre i tempi di risposta delle risposte errate, aumentare la frequenza d'errore nella condizione neutra, diminuire il numero di risposte che rimangono sottosoglia e ottenere un numero ragionevole di correzioni unicamente nel caso in cui la prima risposta data fosse errata.

Per quanto riguarda l'attenzione selettiva, si può pensare di retroazionare la rete per mettere in luce i fenomeni legati al post – error, evidenziando l'aspetto adattativo dell'attenzione durante lo svolgimento di

un task. Facendo ciò, simulazioni successive dovrebbero condurre ad un numero di errori sempre più basso e a dei RT più brevi.

L'esempio presentato in questa tesi mostra le potenzialità delle reti neurali e delle neuroscienze computazionali per la comprensione di problemi cognitivi complessi. Le reti neurali rivestono un'importanza crescente come strumento per la comprensione e la simulazione dei meccanismi cognitivi e dei comportamenti tipici dell'essere umano. Insieme all'analisi di dati comportamentali e alle tecniche di imaging, tali reti potranno portare ad una conoscenza sempre più precisa delle caratteristiche morfologiche e funzionali delle aree del cervello che implementano il controllo cognitivo.

Appendice

Si riporta il listato Matlab relativo al modello (A1), la macro per la costruzione della matrice degli input (A2), la macro per l'analisi dei dati della simulazione (A3) e la funzione di individuazione dell'avvenuta risposta (A4).

A1: Implementazione del Modello Neurale.

```
clear
clc
close all
global data answ corr

load Inputs
load data

%matrice A = attentional layer , dim 42x3
Ahigh=1; %valore alto nella matrice A
Alow=0;
a1= [Ahigh*ones(1,14) Alow*ones(1,28)];
a2 = [Alow*ones(1,14) Ahigh*ones(1,14)
Alow*ones(1,14)];
a3 = [Alow*ones(1,28) Ahigh*ones(1,14)];
A=[a1' a2' a3'];

%matrice W = stimulus layer , dim 4x42
whigh=1;
wlow=0.1;
w1=[whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12)
whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12) whigh*ones(1,2)
wlow*ones(1,12)];
w2=[wlow*ones(1,2) whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12)
whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12) whigh*ones(1,2)
wlow*ones(1,10)];
```



```

w3=[wlow*ones(1,4) whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12)
whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12) whigh*ones(1,2)
wlow*ones(1,8)];
w4=[wlow*ones(1,6) whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12)
whigh*ones(1,2) wlow*ones(1,12) whigh*ones(1,2)
wlow*ones(1,6)];
W=[w1
    w2
    w3
    w4];

%matrice L = competizione nello stimulus layer ,
dim 42x42
Lex=2; %valore di autoeccitazione
Lin=-0.8; %valore di competizione tra neuroni
L = Lin*ones(42,42);
for j = 1:42,
    L(j,j)=Lex;
end

%matrice H = competizione nel response layer , dim
4x4
Hex=1;
Hin=-0.8;
H = Hin*ones(4,4);
for j = 1:4,
    H(j,j)=Hex;
end

tau = 400; %costante di tempo
dt = 1; %passo d'integrazione

t = [0:dt:600];
D = length(t);

%inizializzazione variabili di stato
V_s = zeros(42,D);
V_r = zeros(4,D);
Y_s = zeros(42,D);
Y_r = zeros(4,D);

Y_a = [0 0.5 0]'; % uscite dell'attentional
layer imposte

```

```

%matrice degli imput per lo stimulus layer , dim
42x1

% rumore per lo stimulus layer e per il response
layer: m media, st dev
% standard.
m = 0.3;
st= 0.2;

%parametri della sigmoide
s =5;
teta = 0.5;
th=.8;

for i=1:144
    answ=0;
    corr=0;
    %aggiunta di rumore
    N_s = st*randn(42,1) + m;
    N_r = st*randn(4,1) + m;
    for k=1:length(t),
        Y_s(:,k) = 1./(1+ exp(-s*(V_s(:,k)-
teta)));
        Y_r(:,k) = 1./(1+ exp(-s*(V_r(:,k)-
teta)));
        V_s(:,k+1) = V_s(:,k) + dt/tau*(-V_s(:,k)
+ I(i,:) + N_s + A*Y_a + L*Y_s(:,k));
        V_r(:,k+1) = V_r(:,k) + dt/tau*(-V_r(:,k)
+ N_r + W*Y_s(:,k) + H*Y_r(:,k));

%         subplot(211)
%         stem([1:42],Y_s(:,k))
%         title('Neuroni dello Stimuli Layer')
%         xlabel('neurone')
%         ylabel('valore di attivazione')
%         axis([0 42 0 1])
%         subplot(212)
%         stem([1:4],Y_r(:,k))
%         title('Neuroni del Response Layer')
%         xlabel('neurone')
%         ylabel('valore di attivazione')
%         axis([0.8 4.2 0 1])
%         %pause(0.01)

```

```

        if Y_r(1,k)>th || Y_r(2,k)>th ||
Y_r(3,k)>th || Y_r(4,k)>th
            extractdata(Y_r(:,k),i,k);
        end
    end
end

end

save  data_prova data

% figure(2)
% title('Neuroni del Response Layer')
% subplot(221)
% plot(t,Y_r(1,:))
% title('Neurone 1 del Response Layer:BK')
% xlabel('tempo (ms)')
% ylabel('valore di attivazione')
% subplot(222)
% plot(t,Y_r(2,:))
% title('Neurone 2 del Response Layer:PR')
% xlabel('tempo (ms)')
% ylabel('valore di attivazione')
% subplot(223)
% plot(t,Y_r(3,:))
% title('Neurone 3 del Response Layer:MV')
% xlabel('tempo (ms)')
% ylabel('valore di attivazione')
% subplot(224)
% plot(t,Y_r(4,:))
% title('Neurone 4 del Response Layer:WX')
% xlabel('tempo (ms)')
% ylabel('valore di attivazione')

```

A2: Macro per la costruzione degli Input.

```
clear
clc
close all

I=zeros(144,42);
rig=1;
for i=1:8
    for j=1:14
        I(rig,i+14)=1;
        I(rig,j)=1;
        I(rig,j+28)=1;
        rig=rig+1;
    end
end

%data(:,1)contiene la codifica degli stimoli, come
segue:
%2= incongruent, 3=neutral
data_1=[2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        2*ones(8,1)
        3*ones(6,1)
        ones(32,1)];

%1= congruent
I_cong=zeros(16,42);
i=1;
j=1;
```

```

while i<112
    data_1(i:i+1,:)=1;
    I_cong(j:j+1,:)=I(i:i+1,:);
    i=i+14;
    data_1(i:i+1,:)=1;
    I_cong(j+2:j+3,:)=I(i:i+1,:);
    i=i+16;
    j=j+4;
end

I(113:144,:)= [I_cong
               I_cong];%aggiunta 32 stimoli
congruenti

data=[data_1 zeros(144,5)];

%data(:,2)contiene il target.
data(1:28,2)=ones(28,1);%target 1: B,K
data(29:56,2)=2*ones(28,1);%target 2: P,R
data(57:84,2)=3*ones(28,1);%target 3: M,W
data(85:112,2)=4*ones(28,1);%target 4: W,X
%aggiunta 32 stimoli congruenti

data_cong=[1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 3 3 4 4 4 4]';
data(113:144,2)=[data_cong
                data_cong];

save data data
save Inputs I
clear all

```

A3: Macro per l'analisi dei dati simulati.

```
clear all
close all

load data_prova
% data è costruita come segue:
% data(:,1) contiene il tipo di stimolo:
% 1=congruente
% 2=incongruente
% 3=neutro

%data(:,2) contiene il target [1:4]
%data(:,3) contiene la risposta [1:4]
%data(:,4) contiene il tempo di risposta in ms
%data(:,5) contiene la correzione [1:4]
%data(:,6) contiene il tempo della correzione in
ms

RT_cong_corr=0;
RT_neut_corr=0;
RT_incong_corr=0;

RT_cong_err=0;
RT_neut_err=0;
RT_incong_err=0;

correction=0;
w_correction=0;
k=1;
j=1;
w=1;
k1=1;
j1=1;
w1=1;

for i=1:144
    if data(i,3)~=0 %risposta data
        if data(i,1)==1 %congruente
            if data(i,2)==data(i,3)
                RT_cong_corr(k)=data(i,4);
                k=k+1;
            end
        end
    end
end
```

```

else
    RT_cong_err(k1)=data(i,4);
    k1=k1+1;
end

else if data(i,1)==2 %incongruente
    if data(i,2)==data(i,3)
        RT_incong_corr(j)=data(i,4);
        j=j+1;
    else
        RT_incong_err(j1)=data(i,4);
        j1=j1+1;
    end

else if data(i,1)==3 %neutro
    if data(i,2)==data(i,3)
        RT_neut_corr(w)=data(i,4);
        w=w+1;
    else
        RT_neut_err(w1)=data(i,4);
        w1=w1+1;
    end
end
end
end
end
if data(i,5)~=0 &&
data(i,5)~=data(i,2)%avvenuta correzione?
    w_correction=w_correction+1;
else if data(i,5)~=0 && data(i,5)==data(i,2)
    correction=correction+1;
end
end
end
end
end

disp('Valori Medi dei RT (ms)')
disp('cong_corr cong_err incong_corr incong_err
neut_corr neut_err')

means= [mean(RT_cong_corr) mean(RT_cong_err)
mean(RT_incong_corr) mean(RT_incong_err)
mean(RT_neut_corr) mean(RT_neut_err)];

disp(means)

```

```

disp('percentuals')
n_cong_corr=length(RT_cong_corr);
n_cong_err=length(RT_cong_err);
n_incong_corr=length(RT_incong_corr);
n_incong_err=length(RT_incong_err);
n_neut_corr=length(RT_neut_corr);
n_neut_err=length(RT_neut_err);

if RT_cong_corr(1)==0
    n_cong_corr=0;
end
if RT_cong_err(1)==0
    n_cong_err=0;
end
if RT_incong_corr(1)==0
    n_incong_corr=0;
end
if RT_incong_err==0;
    n_incong_err=0;
end
if RT_neut_corr(1)==0
    n_neut_corr=0;
end
if RT_neut_err(1)==0
    n_neut_err=0;
end
percentuals=[n_cong_corr/(n_cong_corr+n_cong_err)
n_cong_err/(n_cong_corr+n_cong_err)
n_incong_corr/(n_incong_corr+n_incong_err)
n_incong_err/(n_incong_corr+n_incong_err)
n_neut_corr/(n_neut_corr+n_neut_err)
n_neut_err/(n_neut_corr+n_neut_err)];

disp(percentuals*100)

disp('correction  w_correction')
disp([correction w_correction])

notgiven=144-length(find(data(:,3)));
disp('non date= ')
disp(notgiven)

```


A4: Funzione di registrazione della risposta e dei tempi di risposta.

```
function extractdata(R,i,t)
    global data answ corr
    th=.8;
    if answ==0 && corr==0%response found
        if R(1)>th
            data(i,3)=1;
            data(i,4)=t;
        else if R(2)>th
            data(i,3)=2;
            data(i,4)=t;
        else if R(3)>th
            data(i,3)=3;
            data(i,4)=t;
        else
            data(i,3)=4;
            data(i,4)=t;
        end
    end
    answ=1;
    return;
end
if answ==1 && corr==0 %correction found
    if R(1)>th && data(i,3)~=1
        data(i,5)=1;
        data(i,6)=t+0.1;
        corr=1;
        return;
    else if R(2)>th && data(i,3)~=2
        data(i,5)=2;
        data(i,6)=t+0.1;
        corr=1;
        return;
    else if R(3)>th && data(i,3)~=3
        data(i,5)=3;
        data(i,6)=t+0.1;
        corr=1;
        return;
    else if R(4)>th && data(i,3)~=4
```

```
        data(i,5)=4;  
        data(i,6)=t+0.1;  
        corr=1;  
        return;  
    end  
end  
end  
end  
end  
end
```

Bibliografia

Botvinick M., Braver T. S. & Barch D. M., Carter C. S., Cohen J. D. ‘Conflict monitoring and cognitive control’. *Psychological Review*, vol.108: 624-652, 2001.

Botvinick M. ‘Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function’. *Cognitive, Affective & Behavioral Neurosciences*, vol.7: 356-366, 2007.

Cefalù G. Relazione di tirocinio curriculare: ‘Analisi dati comportamentali relativi all’Eriksen Flanker Task’. *Seconda Facoltà di Ingegneria, corso di laurea in Ingegneria Biomedica*, 2011-2012.

Danielmeier C. & Ullspelger M. ‘Post – error adjustments’. *Frontiers in Psychology*, article 233, 2011.

Eriksen B. A. & Eriksen C. W. ‘Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task’. *Perception & Psychophysics*, vol.16: 143-146, 1974.

Gehring W. J., Goss B., Coles M. G. H., Meyer D. E., Donchin E. ‘A neural system for error detection and compensation’. *Psychological Science*, vol.4: 385-390, 1993.

Holroyd C. B. & Coles M. G. H. ‘The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, Dopamine, and the error related negativity’. *Psychological review*, vol.109: 679-709, 2002.

Maier M. E. & Steinhauser M., Hubner R. ‘In the error – related negativity amplitude related to error detectability? Evidence from effects of different error types’. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 2263-2273, 2008.

Maier M. E., Yeung N., Steinhauser M. ‘Error – related brain activity and adjustments of selective attention following errors’. *NeuroImage* ELSEVIER, 2339-2347, 2011.

MacLeod C. M. ‘Half a century of research on the Stroop Effect: An integrative review’. *Psychological Bulletin*, 163-203, 1991.

Mari V. Tesi di laurea in Ingegneria Medica: ‘Reti neurali neuromorfe: plasticità e darwinismo neurale’. *Università degli studi di Roma ‘Tor Vergata’*, 2008-2009.

Notebaert W., Houtman F., Van Opstal F., Gervers W., Fias W., Verguts T. ‘Post – error slowing: an orienting account’. *Cognition* ELSEVIER, 275-279, 2009.

Rabbitt P. M. A. ‘Error and error correction in choice response tasks’. *Journal of Experimental Psychology*, vol.71: 264-272, 1966.

Ridderinkhof K. R., van den Wildenberg W. P. M., Segalowitz S. J., Carter C. S. ‘Neurocognitive mechanisms of cognitive control: The role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward – based learning’. *Brain and Cognition* ELSEVIER, vol.56: 129-140, 2004.

Steinhauser M., Maier M., Hubner R. ‘Modelling behavioural measure of error detection in choice tasks: Response Monitoring versus conflict monitoring’. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, vol.34: 158-176, 2008.

Ringraziamenti

*Dedico questo testo e tutto l'impegno di questi anni a mia Madre
che mi insegna ogni giorno cosa 'impegno' voglia dire.*

Grazie a Sabrina

che, con i suoi modi coloriti, colora le mie giornate grigie.

Grazie ai miei zii e ai miei nonni

*che sono stati costantemente presenti nella mia vita,
che mi fanno provare la gioia di essere a casa ogni volta.*

Ringrazio mio Padre per essersi ricreduto

e per aver fatto il tifo per me: ce la potevo fare – infatti, ce l'ho fatta.

Ringrazio Alessandra e Luciana

*che hanno reso i momenti più difficili di questi anni i più felici,
i più divertenti.*

Grazie a Luca per la sua pazienza,

*per avermi supportato e sopportato in questi anni
opponendosi strenuamente al mio catastrofismo e al mio perfezionismo.*

Un ringraziamento va a tutti i miei più cari amici,

specialmente a quelli lontani

che spesso sono i più vicini.

Infine, ringrazio il mio relatore

che mi ha permesso di scoprire dove

l'Ingegneria e le Neuroscienze Cognitive si incontrano.