

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CAMPUS DI CESENA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**Fenomeni di interazione audio-visiva in  
soggetti sani e in soggetti autistici: analisi  
mediante rete neurale**

Tesi in

**Sistemi Neurali LM**

Relatore

*Prof.ssa Elisa Magosso*

Presentata da

*Giancarlo Angotti*

Sessione II

Anno Accademico 2013/2014

*A mamma e papà*

## **PAROLE CHIAVE**

*Modelli neurocomputazionali*

*Interazione audio-visiva*

*Sound-induced flash illusion*

*Finestra temporale di integrazione audio-visiva*

*Disordini dello spettro autistico*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo Primo</b>	
<b>Fenomeni di interazione audio-visiva: risultati di studi in soggetti sani e soggetti autistici</b>	<b>8</b>
1.1 Integrazione multisensoriale	8
1.2 Illusioni acustiche dovute alla modalità visiva	12
1.3 Illusioni visive dovute alla modalità acustica	13
1.4 Disturbi dello spettro autistico	20
1.5 Studi di integrazione multisensoriale nei soggetti autistici	22
<b>Capitolo Secondo</b>	
<b>Modello di rete neurale: descrizione qualitativa e quantitativa</b>	<b>29</b>
2.1 Introduzione	29
2.2 Descrizione qualitativa del modello	30
2.3 Descrizione matematica del modello	32
2.4 Risultati del modello di base	39
<b>Capitolo Terzo</b>	
<b>Analisi di sensitività del modello: risposta del modello (<i>flash illusion</i>) al variare del valore dei parametri</b>	<b>45</b>
3.1 Analisi del modello in condizioni di base per diversi valori di <i>Stimulus Onset Asynchrony</i> (SOA)	45
3.2 Analisi di sensitività del modello: comportamento in risposta a diversi SOA al variare dei parametri	55

## **Capitolo Quarto**

### **Risultati: simulazione del fenomeno illusorio (*flash illusion*) in soggetti sani e in soggetti sani**

**82**

4.1 Simulazioni soggetti sani

82

4.2 Simulazioni soggetti autistici

102

4.3 Analisi statistica dei risultati

107

### **Conclusioni**

**111**

### **Bibliografia**

**114**

# INTRODUZIONE

In ogni istante della nostra vita, gli oggetti e gli eventi del mondo esterno stimolano contemporaneamente più sensi del nostro organismo, fornendo informazioni di diversa natura, quali, ad esempio, informazioni tattili, acustiche, visive. Sebbene il nostro organismo sia dotato di organi sensoriali distinti e separati, le elaborazioni dei diversi stimoli devono essere integrate e combinate tra loro, per ottenere una percezione unica e coerente della realtà e fornire un adeguato output comportamentale. Negli ultimi decenni, una molteplicità di studi scientifici (sia neurofisiologici che psicofisici) ha infatti evidenziato come caratteristica fondamentale del nostro sistema nervoso la capacità di combinare e integrare informazioni di diversa natura sensoriale: tale capacità determina percezioni più accurate degli stimoli e degli eventi, consente di risolvere ambiguità in caso di stimoli conflittuali, e genera risposte più pronte. A livello neurale, l'interazione tra stimoli di diversa natura è stata evidenziata a diversi stadi di elaborazione corticale, sia a livello di aree corticali primarie, che a livello di aree corticali superiori di tipo associativo.

Tra i diversi tipi di interazione multisensoriale, uno dei più studiati è quello che riguarda l'interazione tra informazioni visive e informazioni acustiche. Un approccio largamente impiegato per studiare questo tipo di interazione consiste nell'imporre una situazione di conflitto tra le informazioni generate dai due differenti stimoli sensoriali.

Quando presentiamo ad esempio ad un osservatore uno stimolo acustico e un contemporaneo stimolo visivo, provenienti da posizioni spaziali diverse, la localizzazione dello stimolo acustico è percepita spostata verso la posizione spaziale in cui è applicato lo stimolo visivo. Questo effetto è generalmente conosciuto come effetto ventriloquo (*ventriloquist effect*). Questo fenomeno mette in evidenza un effetto di "cattura" della posizione spaziale acustica da parte dello stimolo visivo: nel dominio dello spazio è il senso della vista che influenza principalmente gli altri. Tale dominanza visiva sembra essere legata alla migliore risoluzione spaziale del sistema visivo rispetto agli altri sensi, per cui, in presenza di situazioni incerte o conflittuali, è il sistema più affidabile (ovvero quello visivo) a prevalere.

Molteplici studi hanno altresì dimostrato che nel dominio dei tempi è invece il senso dell'udito che tende a dominare la percezione, in conseguenza della maggiore

risoluzione temporale del sistema uditivo rispetto agli altri sensi. Tema principale di questa tesi è un importante esempio di come il senso dell'udito possa influenzare la percezione visiva, ovvero un fenomeno illusorio visivo indotto dal suono, descritto per la prima volta da Shams e alcuni colleghi nel lavoro "*What you see is what you hear*" (Nature, vol. 408, 2000). Tale fenomeno illusorio (denominato *sound-induced flash illusion* o *Shams illusion*) si verifica quando ai soggetti viene presentato un singolo flash accompagnato da due o più beep sonori: in tale caso i soggetti spesso riportano di aver visto due o più flash. Tale studio dimostra come stimoli acustici possono alterare la percezione visiva. In studi successivi, inoltre, è stata individuata una "finestra temporale", cioè l'intervallo temporale in cui avviene l'interazione sensoriale che dà luogo al fenomeno illusorio: più aumenta la distanza tra gli stimoli unimodali visivi e acustici, minore è l'occorrenza del fenomeno illusorio visivo.

Poiché l'interazione multisensoriale è alla base di molti processi cognitivi anche di alto livello (ad es. riconoscimento di oggetti, memorizzazione, linguaggio, comunicazione), in anni recenti i fenomeni di interazione multisensoriale sono stati studiati anche in soggetti che presentano disturbi psichiatrici e neurologici, quali ad es. i soggetti autistici; questi sono in particolare caratterizzati da deficit che coinvolgono la comunicazione e i meccanismi di interazione e integrazione con il mondo circostante.

Alcuni studi hanno dimostrato come l'effetto Shams si verifichi anche negli autistici, dimostrando quindi che anche questi soggetti, nonostante la patologia, mantengono la capacità di integrare stimoli di diversa natura sensoriale. Tuttavia si è evidenziata una differenza negli aspetti temporali dell'interazione tra soggetti autistici e soggetti sani. È stato infatti osservato che i soggetti autistici mostrano una maggiore propensione nel riportare l'illusione rispetto ai soggetti sani, e in particolare, presentano una finestra temporale d'integrazione che è superiore (circa doppia) rispetto ai sani.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è stato studiare, tramite un modello matematico di rete neurale, questo fenomeno di interazione audiovisiva che porta all'effetto illusorio visivo nei soggetti sani e nei soggetti autistici.

Il modello proposto si basa su un precedente modello di rete neurale sviluppato dal gruppo di Bioingegneria dell'Università di Bologna ("*A neurocomputational analysis of the sound-induced flash illusion*", Neuroimage, vol. 92, 2014). Tale modello, è in grado di simulare il fenomeno descritto da Shams.

Tuttavia questo modello presenta dei limiti, infatti è ottimizzato per simulare il fenomeno illusorio per un determinato valore di distanza temporale tra gli stimoli, non

prendendo in considerazione l'intera finestra temporale in cui si è osservato il fenomeno illusorio. Inoltre, tale modello era stato utilizzato solo per simulare il fenomeno illusorio in soggetti sani e non considerava le differenze osservate nei soggetti autistici.

In questo lavoro, il modello è stato opportunamente modificato ed utilizzato per studiare e simulare il fenomeno del *sound-induced flash illusion* in questi altri casi non trattati nella versione originale del modello. A tale scopo, una parte rilevante dell'attività svolta si è concentrata sullo svolgimento di un'analisi di sensitività del modello al fine di individuare quali variazioni dei parametri potessero spiegare l'illusione in un ampio intervallo temporale (come osservato in letteratura), nonché spiegare le differenze riportate tra soggetti sani e soggetti autistici.

Una volta individuate le variazioni da apportare al set di parametri, sono state effettuate varie prove e simulazioni per testare il modello modificato e confrontare i risultati del modello con i dati di letteratura.

La trattazione della tesi è suddivisa in 5 capitoli.

Il Capitolo 1 descrive i concetti fondamentali relativi all'integrazione multisensoriale e illustra i principali fenomeni di interazione audiovisiva, tra cui in particolare il *sound-induced flash illusion*, mostrando i risultati di studi in soggetti sani e in soggetti autistici.

Il Capitolo 2 descrive il modello di rete neurale utilizzato e le equazioni matematiche che lo costituiscono, e illustra il suo principio di funzionamento e, descrivendo i meccanismi alla base della riproduzione del fenomeno illusorio con la configurazione di base dei parametri.

Il Capitolo 3 riporta un'analisi di sensitività del modello, ovvero descrive come varia la risposta del modello al variare del valore di alcuni parametri, con particolare riferimento alla capacità del modello di riprodurre il fenomeno illusorio in una ampia finestra di distanze temporali tra gli stimoli acustici e visivi.

Il Capitolo 4 riporta i risultati delle simulazioni ottenute con il modello variando il set di parametri sulla base dei risultati del capitolo 3. In particolare, si evidenzia il ruolo di alcuni parametri nel riprodurre una maggiore propensione al fenomeno illusorio su ampie finestre temporale, così come osservato nei soggetti autistici.

Le conclusioni infine riportano la discussione dei risultati ottenuti, i limiti del modello e i possibili miglioramenti futuri.

## *Capitolo Primo*

# *Fenomeni di interazione audiovisiva: risultati di studi in soggetti sani e in soggetti autistici*

### **1.1 INTEGRAZIONE MULTISENSORIALE**

La percezione del mondo esterno è basata sull'integrazione di input e stimoli provenienti da differenti modalità sensoriali. In ogni istante della nostra vita riceviamo continuamente stimoli di diversa natura che forniscono contemporaneamente informazioni di diverso tipo e che combinano vie sensoriali differenti, come stimoli acustici, visivi, olfattivi, tattili.

Per molti anni il mondo scientifico ha guardato ad ogni senso come unico e separato dagli altri: ogni modalità sensoriale si pensava funzionasse separatamente dalle altre e che quindi ogni specifica informazione sensoriale venisse elaborata indipendentemente dalle altre.

Tuttavia in molte situazioni di tutti i giorni riceviamo input non solo di un'unica modalità, ma spesso sono input che hanno insieme caratteristiche di più modalità, i nostri sensi ricevono quindi spesso informazioni sensoriali correlate provenienti dallo stesso input esterno, questa informazione quindi deve essere elaborata nel nostro cervello al fine di dare una percezione unica dell'evento e di preparare un eventuale output.

Gli stimoli che riceviamo vengono elaborati simultaneamente nel nostro cervello, ognuno da apposite aree cerebrali dedicate, quali la corteccia visiva e la corteccia uditiva. Le singole elaborazioni dei diversi stimoli devono essere però integrate e combinate tra loro, in modo da dare un output adeguato e unico. Ciò implica che le singole aree cerebrali devono anche comunicare tra loro e si influenzano a vicenda.

Un ruolo primario e fondamentale del sistema nervoso è quello di convertire gli input sensoriali in un output univoco, in azioni dirette, integrando le informazioni di diverse modalità sensoriali. L'abilità di integrare informazioni per generare comportamenti opportuni e una corretta e completa percezione è strettamente collegata alle relazioni

spaziotemporali dei diversi input sensoriali [1]. L'importanza dei fattori spaziotemporali per l'integrazione multisensoriale emerge evidente nello studio dei deficit nell'elaborazione multisensoriali in soggetti clinici, quali i dislessici e, come vedremo, gli autistici.

Mentre la ricerca si focalizzava soprattutto sullo studio delle aree cerebrali separatamente, altri studi puntavano a dimostrare che l'interazione delle varie componenti all'interno di una rete neurale complicata come il cervello era fondamentale per capire funzionamento delle singole parti e al contempo della rete stessa [2].

Due o più modalità sensoriali possono quindi portare informazioni diverse dello stesso evento del mondo esterno, per esempio quando vediamo e sentiamo una persona parlare. Queste informazioni vengono poi integrate per dare un unico percepito (fig. 1.1a). Ma allo stesso tempo il sistema nervoso deve avere la capacità di discriminare quando arrivano insieme informazioni sensoriali non correlate tra loro, ma provenienti da due eventi diversi. Questo processo come vedremo può essere condizionato da diverse correlazioni spaziali e temporali.

Recenti lavori forniscono evidenze che l'integrazione multimodale può anche dare un feedback e influenzare le elaborazioni unimodali (fig. 1.1b).

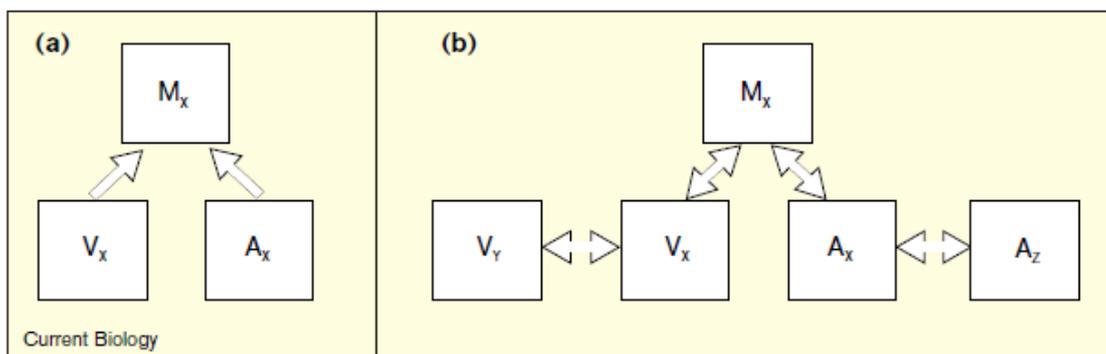


Fig. 1.1. Schema a blocchi interazione multimodale

Questo schema illustra le nozioni convenzionali di integrazione multimodale descritte. In un caso (a) abbiamo una informazione visiva ( $V_x$ ) e una acustica ( $A_x$ ) dello stesso evento (x) che vengono integrate per ottenere una rappresentazione multimodale ( $M_x$ ). Nell'altro (b) questa rappresentazione multimodale può dare anche un feedback sulle aree unimodali e influenzare l'elaborazione di stimoli unimodali successivi di eventi diversi ( $V_y$  e  $A_z$ ).

Un esempio di quest'ultimo caso viene dall'attenzione spaziale crossmodale. In questi casi si è mostrato che uno stimolo tattile che viene fornito in una posizione spaziale che non si conosce a priori può influenzare l'elaborazione di uno stimolo visivo presentato vicino a quello tattile [2].

A proposito di ciò uno studio tramite fMRI mostra che uno stimolo tattile congruente può influenzare ed aumentare la risposta neurale ad uno stimolo visivo nella corteccia visiva (che solitamente risponde a stimoli visivi unimodali) nel giro linguale.

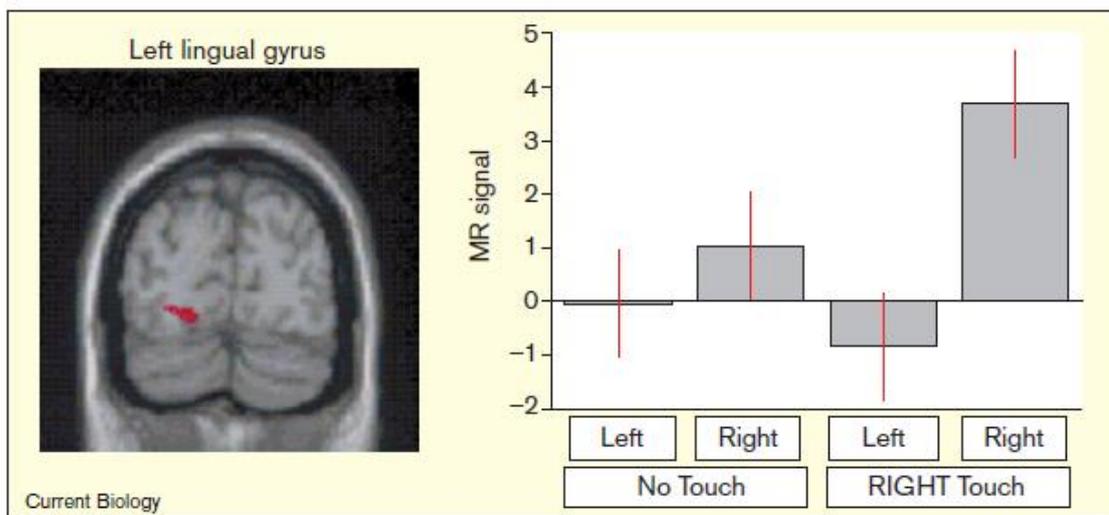


Fig. 1.2. Risultati studio fMRI sul feedback dell'interazione multimodale

Il giro linguale sinistro, visibile nella figura precedente in rosso durante la sua attivazione, è tradizionalmente considerato una regione della corteccia visiva retinotopica che si attiva in presenza di uno stimolo unimodale. Questa regione risponde in modo più pronunciato a uno stimolo visivo controlaterale (cioè proveniente dalla parte opposta del campo visivo rispetto a dove essa si trova, quindi a destra in questo caso) rispetto all'equivalente stimolo dato a sinistra (fig. 1.2) [2].

L'influenza dell'interazione multimodale si mostra quando viene fornito anche uno stimolo tattile concorrente nella parte destra del campo visivo. In questo caso si nota un aumento di attivazione della risposta neurale visiva, influenzata perciò dallo stimolo tattile.

L'integrazione multisensoriale è quindi una delle caratteristiche principali del funzionamento del cervello e delle aree nervose, necessaria al fine di ottenere una percezione ottimale della realtà che ci circonda. L'integrazione multisensoriale è

fondamentale anche per la percezione più accurata e più pronta di un singolo stimolo unimodale: quando il singolo stimolo unimodale è accompagnato da un secondo stimolo di una modalità differente, l'insieme delle due percezioni e la loro simultanea elaborazione consente una migliore percezione del singolo stimolo unimodale [3].

All'aumentare delle evidenze di una interazione tra i sensi nel nostro cervello, cresceva l'interesse per identificare le aree cerebrali in cui tale interazione potesse avere luogo. Inizialmente, l'integrazione tra le informazioni inoltre si pensava avvenisse solo in aree corticali associative di alto livello, deputate allo svolgimento di compiti cognitivi più complessi. Recenti studi ed esperimenti invece hanno suggerito che il fenomeno integrativo è presente già in aree corticali di basso livello (tradizionalmente considerate puramente unimodali), cioè all'inizio del processo di elaborazione degli input esterni, sebbene i meccanismi neurali alla base dei processi di interazione multisensoriale in aree unimodali di basso livello siano ancora oggetti di studio e dibattito. Ad esempio, studi sull'uomo portati avanti con l'uso dei potenziali evento-correlati (ERP) hanno mostrato esserci un'interazione acustico-somatosensoriale al livello della corteccia acustica. Altre registrazioni intercraniche di potenziali hanno evidenziato l'effetto di input visivi e somatosensoriali a livello della regione posteriore della corteccia acustica A1. Ciò quindi porta a pensare che stimoli anche se non prettamente acustici possono avere effetto sull'area acustica del cervello.

I differenti sensi non sono quindi trattati come moduli separati nel nostro cervello e, fin dai primi passi del processo di elaborazione, l'interpretazione di uno stimolo in una certa modalità (es. uno stimolo acustico) può essere influenzata da un'informazione proveniente da un'altra modalità.

Per studiare i fenomeni di integrazione multisensoriale (o integrazione *crossmodale*), si ricorre spesso a un approccio basato sulla creazione di situazioni di conflitto in cui due differenti modalità sensoriali forniscono informazioni discordanti circa uno specifico attributo dello stimolo o dell'evento. Una delle interazioni sensoriali maggiormente studiata, ricorrendo anche alla creazione di situazioni di conflitto, è quella che avviene tra la modalità visiva e la modalità acustica.

## **1.2 ILLUSIONI ACUSTICHE DOVUTE ALLA MODALITÀ VISIVA**

La nostra percezione del mondo trae quindi beneficio dalle informazioni provenienti da più modalità, visiva, acustica, tattile. Una frequente strategia per capire questo meccanismo e per esaminare il peso relativo di ogni singola modalità sensoriale

nell'ambito di una percezione complessiva sta nel fornire un'informazione espressa da due modalità in conflitto reciproco. Risultati di studi recenti hanno individuato la visione come la più importante e la più dominante delle modalità sensoriali nel dominio dello spazio.

In questo contesto vengono ad esempio imposte condizioni audiovisive spazialmente in conflitto tra loro, cioè due diversi stimoli (uno visivo e uno acustico) provengono da zone spaziali diverse. Quando vengono presentati ad un osservatore uno stimolo acustico e allo stesso tempo uno stimolo visivo, ma in una posizione spaziale diversa dall'acustico, la localizzazione dello stimolo acustico è percepita spostata verso la posizione spaziale di presentazione dello stimolo visivo. Questo effetto è generalmente conosciuto come effetto ventriloquo (*ventriloquist effect*). Questo fenomeno mette quindi in evidenza un effetto di cattura spaziale dello stimolo acustico da parte dello stimolo visivo. Gli stimoli seppure vengano dati da posizioni spaziali diverse, vengono percepiti come se provenissero dallo stesso punto, il punto nel quale è applicato lo stimolo visivo. Questo fenomeno è sfruttato dall'illusionista (detto appunto ventriloquo) che muovendo con la mano un pupazzo ed emettendo suoni senza muovere labbra inganna spettatore che ha l'illusione che sia il pupazzo a parlare. Nella comprensione del linguaggio però, questo fenomeno di illusione può essere accresciuto da fattori cognitivi addizionali.

Tuttavia, altri studi hanno mostrato che la cattura visiva della posizione spaziale dello stimolo acustico occorre non solo con stimoli complessi e con un significato semantico, ma anche con stimoli neutri e semplici, come uno spot luminoso o un tono acustico. Tali studi suggeriscono che lo shift della posizione spaziale acustica non è dovuta solo a fattori cognitivi, ma è dovuto, almeno in parte, ad un fenomeno di attrazione automatica del suono da parte di un simultaneo e spazialmente separato stimolo visivo.

Il ventriloquismo è intuitivamente quindi spiegato da una dominanza di tipo spaziale della visione rispetto agli altri sensi. Ma come questa dominanza si realizzi a livello neurale è ancora materia di dibattito.

Alcune teorie affermano che l'evoluzione ha dato un vantaggio agli stimoli visivi rispetto a quelli degli altri sensi, indipendentemente dalle condizioni dello stimolo. Un altro punto di vista alternativo assume che la dominanza del senso della vista risulta da un'integrazione ottima (in senso Bayesiano) dell'informazione visiva e di quella acustica. Secondo tale ipotesi, il nostro cervello si comporterebbe come un osservatore ideale (in senso Bayesiano) che combina le informazioni sulla base della loro

affidabilità per dedurre la localizzazione spaziale di uno stimolo. Secondo questa teoria quindi non c'è una dominanza intrinseca di un senso su un altro, ma è l'informazione più attendibile che domina sulle altre. Poiché la vista è il senso caratterizzato dalla maggiore acuità spaziale, l'informazione visiva essendo più attendibile domina su quella fornita dagli altri sensi, nei compiti di localizzazione spaziale.

L'esposizione a un conflitto dal punto di vista spaziale tra uno stimolo visivo e uno acustico, oltre a produrre un immediato effetto, appunto il ventriloquismo, produce un effetto anche a lungo termine. E' stato infatti dimostrato che la posizione dello stimolo acustico continua ad essere percepita spostata verso la posizione dello stimolo visivo anche offline, cioè quando l'input uditivo è presentato da solo. Questo fenomeno prende il nome di *ventriloquism aftereffect*.

Fenomeni illusori di percezione come questi sono usati per capire e studiare i meccanismi alla base dell'integrazione multisensoriale. Un diverso numero di fattori influenzano queste illusioni, come il timing di presentazione dei diversi stimoli, o quanto spazialmente sono lontani e diversi. Quando due modalità sensoriali portano informazioni conflittuali, la percezione è dominata dalla modalità maggiormente affidabile per il compito da effettuare in seguito alla ricezione di quelle informazioni. Come si è detto poco sopra, nel caso della discrepanza spaziale tra due stimoli, il senso della vista, che specifica più precisamente il luogo spaziale dell'input, prevale sul senso dell'udito producendo appunto il fenomeno del ventriloquismo. Pertanto la percezione della localizzazione spaziale dello stimolo acustico è influenzata dalla posizione dello stimolo visivo, mentre non accade (se non in misura non significativa) il contrario.

Viceversa, come specificato in seguito, nel dominio dei tempi i risultati sono differenti e si può verificare una influenza rilevante dello stimolo acustico sulla percezione dello stimolo visivo.

### **1.3 ILLUSIONI VISIVE DOVUTE ALLA MODALITÀ ACUSTICA**

Molteplici altri studi hanno dimostrato che nel dominio dei tempi è il senso dell'udito a dominare la percezione. Questo sembra essere dovuto a una migliore risoluzione temporale della modalità acustica rispetto a quella visiva. Infatti, gli stimoli acustici sono processati con una latenza inferiore e più velocemente rispetto agli stimoli visivi; pertanto nel dominio dei tempi, l'acuità del sistema uditivo è maggiore di quella del sistema visivo.

A proposito di ciò vari studi hanno quindi rivelato che la modalità visiva può essere fortemente influenzata da quella acustica nel dominio dei tempi.

Risultati di questi studi dicono che il suono può comportare una modifica della percezione delle caratteristiche temporali di un dato stimolo visivo, come la sua durata, la sua frequenza, la sua sincronizzazione. Non solo le caratteristiche temporali sono influenzate, anche l'intensità percepita di uno stimolo visivo può essere aumentata dal suono.

Altri studi ancora hanno dimostrato che il suono può altresì alterare la percezione della direzione di un movimento.

Oggetto principale di questa tesi è un importante esempio di come il senso dell'udito domina sulla visione, cioè un fenomeno illusorio visivo indotto dal suono che prende il nome "*sound-induced flash illusion*", descritto per la prima volta da Shams et al. [4]: quando un singolo flash è presentato con due o più beep sonori, i soggetti spesso riportano di aver visto due o più flash. Questa è anche chiamata *fission illusion*. Un'altra illusione chiamata *fusion illusion* è stata altresì descritta, dove un singolo beep causa la fusione di un doppio flash, ovvero i soggetti a fronte della presentazione di un singolo beep accompagnato da più flash hanno la percezione di aver visto un flash solo.

I meccanismi neurali e fisiologici alla base di questi complessi fenomeni sono tuttora oggetto di ricerca, studi psicofisici e di neuro-immagini hanno mostrato che l'alterazione indotta dal suono sulla percezione visiva è associata ad una modulazione e variazione nell'attività neurale della corteccia visiva. Più precisamente, potenziali evocati visivi (VEP) modulati dal suono in opportuni trials di ricerca, suggeriscono che questi effetti occorrono già a livello della corteccia occipitale, cioè già nei primi livelli di elaborazione dell'informazione..

Nel seguito, verranno descritti più dettagliatamente gli esperimenti di *sound-induced flash illusion* (o *fission illusion*) e gli esperimenti di *fusion illusion*, essendo questi (n particolare la *fission illusion*) i fenomeni investigati in questa tesi.

In un esperimento [4] venivano forniti due tipi di stimoli ai partecipanti, uno di tipo visivo e uno di tipo acustico (fig. 1.3). Lo stimolo visivo consisteva in un disco bianco uniforme proiettato al centro di uno schermo nero di un computer, in successione, da uno a quattro volte. L'input acustico consisteva in un beep fornito da un altoparlante. Se si dava input visivo una volta sola questo veniva accompagnato da 0-4 beep, mentre in caso di input visivi multipli si davano 0 o 1 beep.

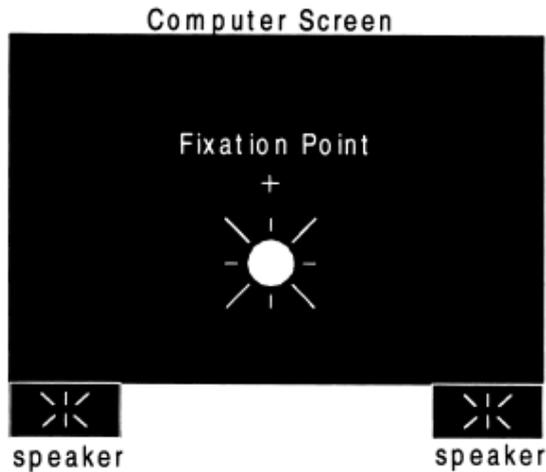


Fig. 1.3. Configurazione degli stimoli usata nell'esperimento

Il primo flash era sempre preceduto dal primo beep di 23 ms. Ogni beep aveva una durata di 7 ms, ogni flash una durata invece di 17 ms. Beep consecutivi erano separati da 57 ms, flash consecutivi da 50 ms. Il compito di ogni osservatore (8 in tutto) era quello di riportare il numero di flash ogni volta percepiti.

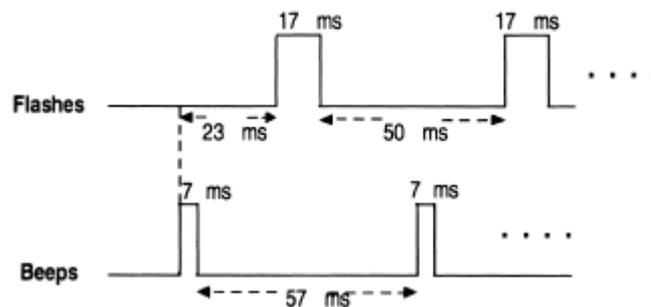


Fig. 1.4. Profilo temporale degli stimoli nell'esperimento

I risultati di questo esperimento sono mostrati in figura 1.5, la quale mostra i dati dei trial in cui veniva presentato un singolo flash. Il numero di flash percepiti è graficato in funzione dei beep applicati in ogni singolo trial. Gli osservatori hanno riportato di vedere un flash quando il numero di beep che lo accompagnavano era uno.

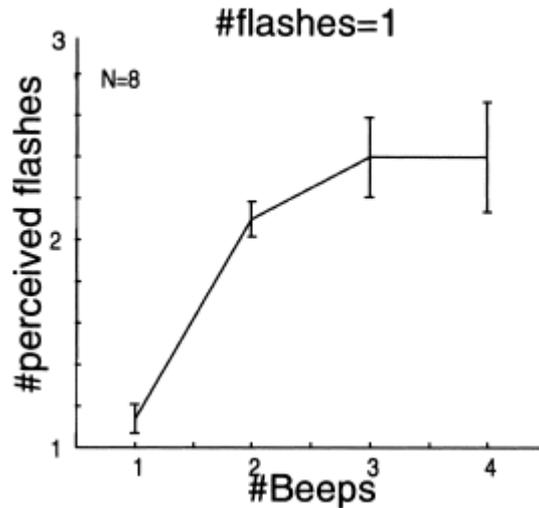


Fig. 1.5. Risultati esperimento con i flash illusori percepiti

Al contrario, essi hanno riportato di percepire due o più flash quando un flash solo era accompagnato da due o più beep. Il numero percepito di flash nei trial con un singolo flash e due, tre, quattro beep è significativamente più grande di quello percepito nei trial con un flash e un o nessun beep. E' a questo fenomeno che ci riferiamo come illusione visiva indotta dal suono (*sound induced flash illusion*). I risultati suggeriscono quindi che beep multipli cambiano la percezione di un singolo flash in multipli flash.

Tale fenomeno è stato inoltre dimostrato che non dipendeva dalla difficoltà del compito o dall'ambiguità degli stimoli forniti.

Tornando alla figura, notiamo che il numero dei flash percepiti aumenta col numero di beep. Ciò può far pensare che il numero di flash riportati è legato alla risposta del sistema uditivo in contrasto col visivo. Per verificare ciò sono stati effettuati altri trial, in cui c'era una discrepanza tra numero di flash e beep: il numero di beep era uno mentre il numero di flash variava da due a quattro. I risultati di questi trial sono mostrati nella figura successiva (fig. 1.6), dove il numero di flash percepiti è graficato in funzione del numero di flash forniti. Se la risposta degli osservatori è determinata dal numero di beep e quindi dal senso dell'udito ci aspetteremmo un andamento dipendente dal numero di beep, invece gli osservatori riportano flash percepiti concordi con quelli forniti e in contrasto col numero di beep. Quindi rispondono in base alla loro percezione visiva, non in base a meccanismi cognitivi derivati dal senso dell'udito.

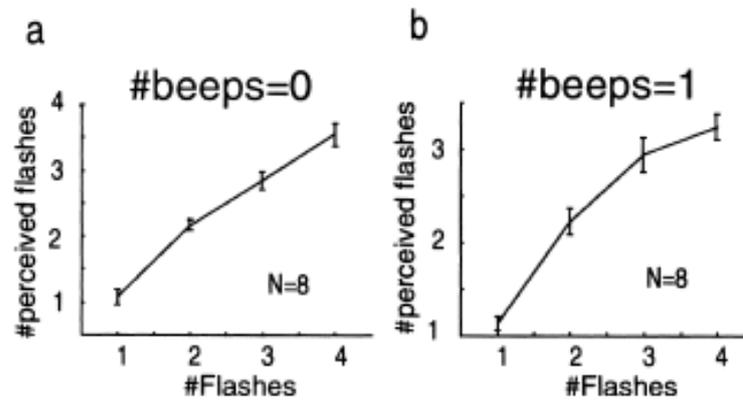


Fig. 1.6. Risultati dei trial di controllo dell'esperimento

Per cui i risultati di figura 1.6 dimostrano che il *sound-induced flash illusion* è un'illusione di percezione visiva e non è dovuta ad artefatti, come la difficoltà del compito o meccanismi cognitivi.

A questo punto ci chiediamo se il flash illusorio è simile a quello reale. Per rispondere consideriamo un altro grafico che combina i precedenti (fig. 1.7). Sull'asse delle ordinate abbiamo i flash percepiti, mentre sull'asse delle ascisse abbiamo il numero di beep e il numero di flash.

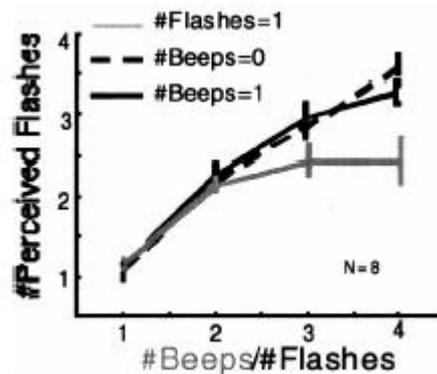


Fig. 1.7. Comparazione delle differenti condizioni nell'esperimento

Notiamo che la risposta degli osservatori era la stessa laddove erano esposti ad un flash accompagnato con due beep, o nel caso di due flash accompagnati con uno o nessun beep. Ciò suggerisce che un singolo flash accompagnato da due beep è percettivamente equivalente a due flash accompagnati da uno o nessun beep.

In base a questo esperimento, dunque, il numero di beep influenza il numero di flash percepiti. In questi studi, tuttavia, la temporizzazione degli stimoli era fissata ad un singolo valore. Lo studio di Shams prosegue chiedendosi fino a che distanza temporale i beep possono influenzare la percezione visiva, perché all'aumentare della distanza temporale tra il flash e i beep, il fenomeno illusorio diventa via via più improbabile. Per questo Shams e alcuni colleghi hanno effettuato un secondo esperimento che, sulla base dei risultati di quello appena descritto, vuole trovare e misurare una “finestra temporale” dentro la quale il suono altera la percezione visiva, cioè l'intervallo di tempo in cui avviene l'integrazione sensoriale e il “legame” tra gli stimoli di diversa modalità sensoriale. Tale finestra è stata definita *temporal binding window* (TBW).

La configurazione degli stimoli (visivi e acustici) era la stessa del primo esperimento, col disco visivo su uno schermo e gli altoparlanti ai lati. Cambia invece il numero di beep e flash. In questo caso in ogni trial un flash veniva accompagnato da due beep. Uno dei beep era sempre fisicamente contemporaneo ad un flash, mentre la presentazione temporale dell'altro beep variava da trial a trial secondo certi opportuni intervalli SOA (*stimulus onset asynchronies*): 25, 70, 115, 160, 205, 250 ms tra un beep e l'altro. Il beep solitario poteva precedere o seguire di un certo SOA la coppia flash-beep fornita simultaneamente (fig. 1.8).

Come nell'esperimento precedente il compito degli osservatori era quello di riportare il numero di flash percepiti.

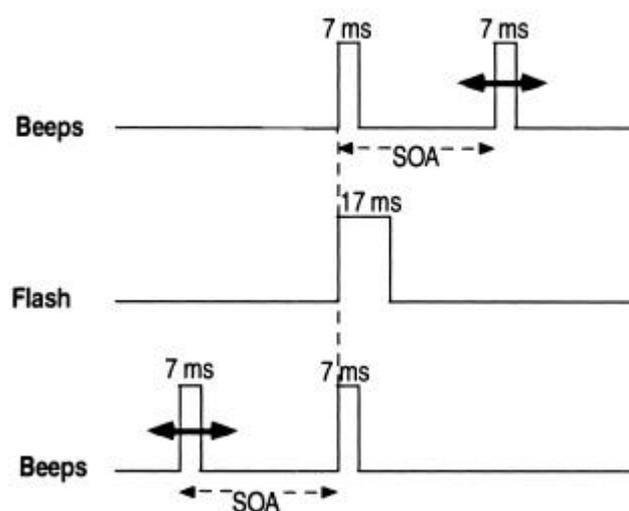


Fig. 1.8. Profilo temporale degli stimoli nel secondo esperimento

I risultati di questo secondo esperimento sono mostrati nella figura seguente (fig. 1.9): sull'asse delle ordinate è riportata la percentuale di trial in cui gli osservatori hanno visto più di un flash; questa può essere vista come una misura dell'intensità e della forza del fenomeno illusorio. Sull'asse delle ascisse è riportato il timing del beep variabile rispetto alla coppia contemporanea beep-flash (cioè il valore di SOA). Lo zero denota il momento in cui viene dato il flash, mentre la parte positiva e negativa denota il momento in cui viene dato il beep singolo, negativo se fornito prima del flash, positivo se fornito dopo. Notiamo che l'illusione diminuisce da  $\pm 70$  ms circa, ma tuttavia è ancora significativa a  $\pm 115$  ms.

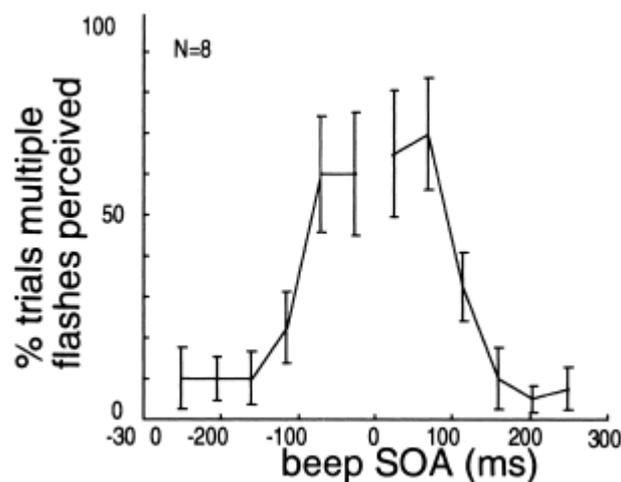


Fig. 1.9. Risultati del secondo esperimento

Quindi questi risultati suggeriscono che il fenomeno del flash illusorio tende a svanire quando il secondo beep è troppo lontano dal flash ed esce dalla finestra temporale d'integrazione.

La finestra d'integrazione è quindi fondamentale per l'occorrenza di tale fenomeno e obiettivo di molte ricerche è studiare e misurare tale finestra che ci consente di capire e misurare l'intervallo d'integrazione multisensoriale. Questa finestra non è infatti uguale per tutti i soggetti, e può essere modificata dalla presenza di patologie o anomalie. Particolarmente interessante è il caso dei soggetti autistici.

#### **1.4 DISTURBI DELLO SPETTRO AUTISTICO**

L'autismo è un disturbo psichiatrico e neurologico che coinvolge diverse funzioni cerebrali; si manifesta solitamente dai primi anni di età e comporta diversi deficit che coinvolgono la comunicazione e i meccanismi di integrazione sociale con le altre persone e di interazione con il mondo circostante, portando il soggetto all'isolamento.

Le cause eziologiche della sindrome sono molte e includono malformazioni genetiche, caratteristiche ambientali o nascita prematura. Ciò che sembra comune a tutti gli individui colpiti da autismo è un atipico comportamento in risposta a stimoli sensoriali, che li porta ad avere problemi di comunicazione e di interazione [5].

Le possibili cause e i sintomi sono quindi molteplici, a seconda della gravità cambiano da soggetto a soggetto, al che dare una definizione unica della sindrome è impossibile, per cui per tutta una serie di patologie che hanno in comune queste difficoltà di comunicazione e d'integrazione sociale si parla di *Disturbi dello Spettro Autistico* (ASD, *Autistic Spectrum Disorder*).

La ricerca sulla neurofisiologia dell'autismo si è focalizzata inizialmente sullo studio dell'elaborazione di semplici input sensoriali in diverse modalità, visiva, tattile, acustica [5].

Lo studio dell'elaborazione degli stimoli acustici è essenziale per capire l'origine dei disturbi autistici. Un metodo per misurare e studiare il percorso dell'informazione acustica e di come viene elaborata è attraverso le risposte del tronco encefalico in cui l'attività elettrica viene evocata da una serie di stimoli quali suoni e semplici toni. L'attività elettrica viene misurata tramite elettrodi posizionati sullo scalpo. Tali studi hanno però mostrato risultati contrastanti. Le risposte del tronco encefalico non sono sufficienti a spiegare i deficit di tutti i soggetti autistici, però suggeriscono che in questi soggetti differenze nell'elaborazione acustica (ad esempio discriminazione di toni e linguaggio) avvengono già in questa area [5].

Oltre all'attività tronco encefalica, l'elaborazione dell'informazione acustica è stata esaminata usando i potenziali evento correlati (ERP) con elettroencefalografia (EEG) e magnetoencefalografia (MEG). I risultati riportano delle latenze atipiche anche al livello della corteccia uditiva primaria [5].

In generale quindi studi neurofisiologici sull'elaborazione dell'informazione acustica negli autistici riportano un'attività neurale atipica all'inizio dell'elaborazione dello stimolo acustico, già a livello della corteccia acustica primaria. Tuttavia, alcuni studi mostrano capacità percettive aumentate dei soggetti autistici in risposta a stimoli

acustici. Per esempio, è stato mostrato che individui con autismo hanno una miglior capacità di discriminazione dei suoni in confronto ai soggetti sani [6].

Anche disturbi della sensibilità tattile sono riportati tra i disturbi tipici dell'autismo, anche se hanno ricevuto un'attenzione minore rispetto a disturbi di sensibilità acustica.

Vista l'eterogeneità dei disturbi autistici però anche questo dominio va approfondito.

I soggetti autistici riportano anche atipici comportamenti in seguito alla presentazione di stimoli visivi, ma anche qui, come nel caso dell'elaborazione acustica, i risultati sono contrastanti [5].

In generale, dati i risultati contrastanti, si ritiene che le abilità percettive degli autistici dipendono dalla natura e dalla complessità degli stimoli, nel caso di stimoli complessi c'è un calo delle capacità di percezione, nel caso di stimoli semplici invece un aumento [6] [7].

Oltre ad essere affetti da deficit che si presentano nei casi di stimoli sensoriali unimodali, i soggetti autistici riportano deficit anche nel caso di stimoli sensoriali multimodali. Tali deficit e comportamenti atipici si pensava fossero dovuti ad una inabilità ad elaborare contemporaneamente stimoli di diversa modalità. In realtà è stato dimostrato che i soggetti autistici presentano fenomeni illusori di percezione, il che indica che la capacità di interazione multisensoriale è presente in tali soggetti. Tuttavia, differenze rispetto ai soggetti sani sono state evidenziate negli aspetti temporali dell'elaborazione multisensoriale.

Differenze evidenti ed importanti sono altresì presenti per l'integrazione multisensoriale di basso e alto livello, cioè per i compiti cognitivi più complessi, quali il linguaggio e la sua comprensione.

E' noto che nell'autismo le difficoltà legate al comportamento sociale coesistono con gravi problemi in funzioni complesse cognitive, come la percezione, l'attenzione, la memoria, le emozioni, il linguaggio. La ricerca si è dedicata ad ognuna di queste aree, studiando come i soggetti autistici decodificano input esterni, come eseguono compiti attenzionali, di memoria, come elaborano le emozioni, se hanno o meno gravi deficit di linguaggio. I risultati sono contrastanti, in letteratura non si trova quindi una causa primaria e univoca delle varie disfunzioni associate all'autismo. Tuttavia, tali risultati hanno mostrato che una componente essenziale di tutte queste funzioni è il processo temporale dell'informazione. Tutte queste complesse funzioni richiedono l'interazione ed integrazione di informazioni tra varie aree cerebrali, processi che devono avvenire con precisi vincoli temporali [8].

Inoltre, è importante sottolineare che le anomalie dei soggetti autistici in compiti di alto livello, possono riflettere – almeno in parte – disabilità a più basso livello, quali ad esempio anomalie nell'interazione tra stimoli multisensoriali. Infatti, una alterazione nelle caratteristiche del flusso di informazioni in ingresso, può avere profonde implicazioni nelle successive elaborazioni di più alto livello. In particolare, data l'importanza della integrazione multisensoriale nell'apprendimento, nella percezione coerente della realtà, nel linguaggio, nella memorizzazione, una alterazione negli aspetti temporali dell'integrazione multisensoriale può ripercuotersi profondamente a tutti i livelli percettivi e cognitivi.

### **1.5 STUDI DI INTEGRAZIONE MULTISENSORIALE NEI SOGGETTI AUTISTICI**

Abbiamo visto come alcuni fenomeni di interazione multisensoriale nei soggetti sani siano stati messi in evidenza usando semplici input come flash e beep acustici, come il caso dello studio di Shams precedentemente trattato.

In uno studio del 2007 di van der Smagt et al. [9] il *sound-induced flash illusion* è stato usata per testare l'integrazione audiovisiva durante funzioni cognitive complesse nei soggetti autistici. Una integrazione multimodale anomala in questi soggetti può portare ad una diminuzione dell'occorrenza del fenomeno illusorio o ad una minore intensità dello stesso se confrontato con quello che avviene nei soggetti sani.

L'esperimento in questo studio consisteva in 12 condizioni differenti a cui sono stati sottoposti un gruppo di soggetti autistici e un gruppo di soggetti sani di controllo: 3 condizioni visive dove venivano presentati 1, 2 o 3 flash, combinate con 4 condizioni acustiche, 0, 1, 2 o 3 beep. Talvolta il numero di flash e beep presentati era uguale, altre volte no. La condizione più rilevante era quella di un unico flash presentato come nello studio di Shams. Come in quest'ultimo studio, anche qui sono stati usati dei beep provenienti da altoparlanti e dei flash provenienti da uno schermo, un disco bianco su sfondo nero. La presentazione del disco era di 17 ms. Nel caso di flash multipli presentati, la distanza temporale tra gli stimoli (SOA) visivi era di 50 ms. I beep invece avevano durata di 9 ms, separati da un SOA di 50 ms nel caso di beep multipli. La distanza tra il primo beep e il primo flash era di 17 ms (fig. 1.10).

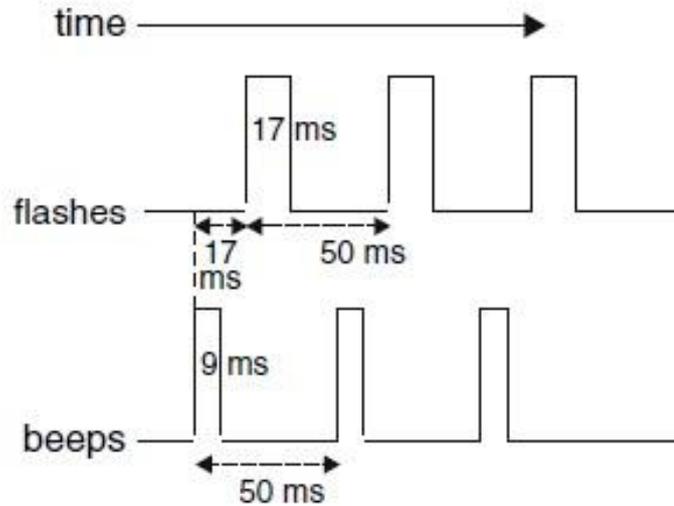


Fig. 1.10. Profilo temporale degli stimoli nell'esperimento

I risultati sono presentati nella figura successiva (fig. 1.11), il numero di flash riportati dai soggetti è riportato in funzione del numero di beep presentati. Ogni curva riferisce ad un diverso numero di flash presentato: 1, 2 o 3 flash.

Ciò che si prefiggeva tale esperimento era di mostrare se i soggetti autistici mostrassero una normale o anormale integrazione audiovisiva rispetto ai soggetti sani. Dal grafico si nota come l'aumento del numero di flash o del numero di beep porta ad un aumento del numero di flash percepiti. In particolare si osserva il fenomeno della *fusion illusion* nel caso di più flash associati ad un singolo beep (i soggetti tendono a fondere insieme più flash e a percepire quindi un numero inferiore di flash rispetto al numero effettivamente presentato) e il fenomeno della *fission* (o *flash illusion*) in cui i soggetti tendono a percepire un numero superiore di flash nel caso in cui il numero di beep presentati sia superiore al numero di flash presentati. Tale studio dimostra che, nelle condizioni sperimentali adottate, i fenomeni illusori sono presenti anche nei soggetti autistici e sono paragonabili a quelli dei soggetti sani, suggerendo che i soggetti autistici preservano la capacità di integrare informazioni audiovisive [9].

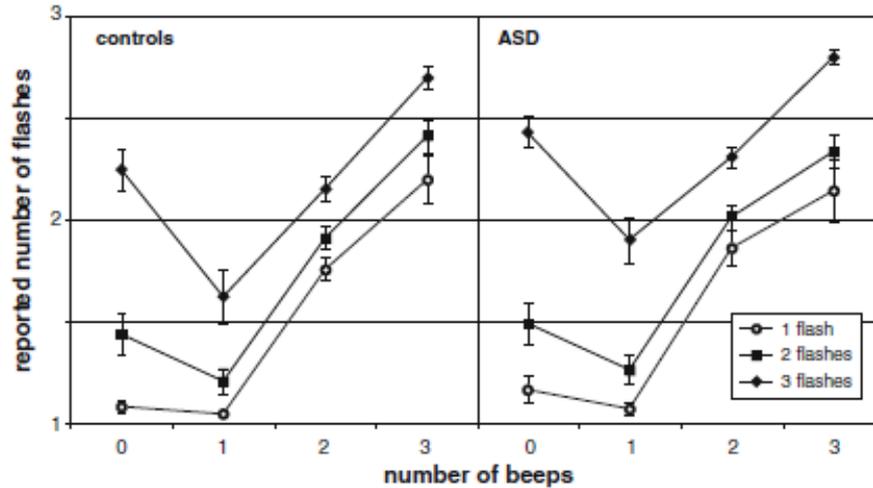


Fig. 1.11. Effetti del numero dei beep presentati sul numero di flash riportati per soggetti sani e autistici

Tuttavia, come evidenziato precedentemente, di fondamentale importanza nell'integrazione multisensoriale sono gli aspetti temporali; mentre l'interazione tra stimoli temporalmente vicini può essere funzionalmente utile in quanto i due stimoli hanno un'elevata probabilità di provenire da uno stesso evento ed oggetto, stimolo temporalmente molto separati devono essere processati e identificati come tali data l'elevata probabilità che provengano da oggetti od eventi differenti. Gli aspetti temporali di interazione multisensoriale sembrano essere alterati nei soggetti autistici. Per esempio Szlag et al. [8] hanno mostrato come bambini autistici abbiano difficoltà a riprodurre la lunghezza di stimoli visivi e acustici presentati con una durata standard. Ciò significa che ci sono anomalie nel processamento temporale delle informazioni e degli stimoli multisensoriali.

Una differenza importante tra soggetti autistici e sani è l'abilità di combinare parti di informazioni in una percezione unica.

Studi recenti, infatti, hanno mostrato differenze nella capacità dei soggetti autistici di combinare le informazioni provenienti da differenti modalità. Un esempio di questa elaborazione multisensoriale alterata è la ridotta suscettibilità all'effetto McGurk. L'effetto McGurk si verifica quando si osserva un movimento delle labbra che suggerisce la pronuncia di una certa sillaba mentre se ne ascolta un'altra diversa; il suono percepito è influenzato dalla visione, e quindi si ha la sensazione di percepire una sillaba che è una via di mezzo tra quella vista e quella ascoltata. Nel caso dei soggetti autistici questo effetto è meno evidente rispetto ai soggetti sani [10].

Uno studio recente si è occupato di evidenziare eventuali differenze temporali nell'elaborazione di informazioni di stimoli semplici acustici e visivi tra soggetti sani e autistici, in particolare tra bambini e adolescenti con uno sviluppo normale (TD, typical development) e bambini e adolescenti autistici [11].

In precedenza è stato descritto uno studio che si prefiggeva di dimostrare il fenomeno illusorio descritto da Shams nei soggetti autistici. Tale studio indicava l'abilità preservata, nei soggetti autistici, di interazione multisensoriale; dal momento che in essi si presentavano fenomeni illusori simili a quelli dei soggetti sani. Tuttavia tale studio non esaminava se fossero eventualmente presenti differenze nella *temporal binding window* tra soggetti sani ed autistici. Lo studio che descriveremo adesso si è occupato proprio di questo. L'ipotesi era che cambiamenti nei parametri temporali degli stimoli acustici e visivi utilizzati per produrre l'illusione, potessero dare delle differenze nella finestra d'integrazione di stimoli multisensoriali nei soggetti autistici.

Come anche nello studio di Shams che descrisse il fenomeno illusorio di un flash indotto dal suono, anche in questo caso è stato fornito come stimolo visivo un flash dato su uno schermo nero e come stimoli acustici dei beep forniti da un altoparlante.

L'obiettivo era quindi verificare se un beep sonoro singolo fornito prima o dopo ad un flash accompagnato da un beep, causasse l'illusione di un ulteriore flash. Cruciale è il timing con cui il beep ulteriore veniva fornito, se prima o dopo la coppia flash-beep e soprattutto a che distanza temporale da questi.

Per ogni trial è stato fornito quindi uno stimolo visivo di durata 21 ms e in contemporanea un beep sonoro lungo 7 ms. A seconda della condizione il flash poteva essere accompagnato da 0, 1 o 2 beep. La condizione un flash accompagnato da due beep è stata quella usate per definire la finestra temporale in cui avviene l'integrazione sensoriale sia per soggetti di controllo sani sia per soggetti autistici [11].

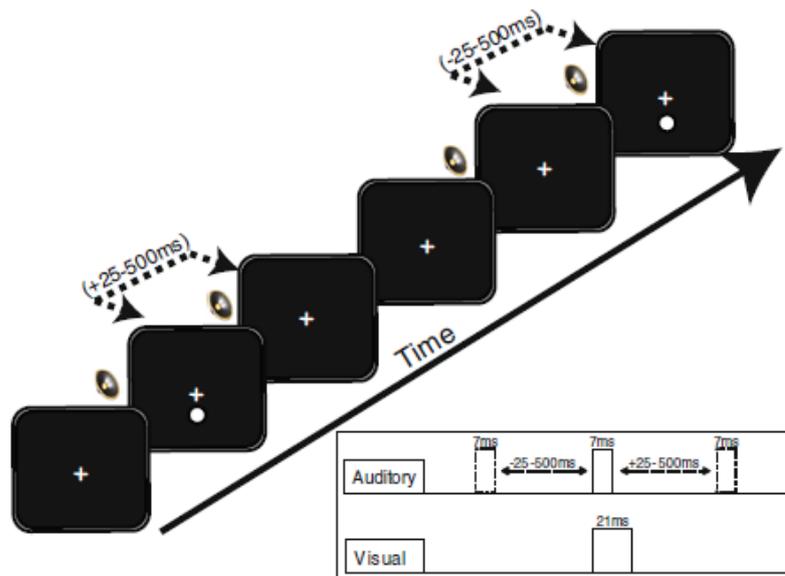


Fig. 1.12. Configurazione degli stimoli e loro profilo temporale

In tali condizioni, i 2 beep sono stati presentati a diversa distanza temporale tra loro (SOAs), mentre un beep veniva fornito sempre insieme a un flash, l'altro beep precedeva (condizione SOA negativo) o seguiva (condizione SOA positivo) la coppia a distanza di volta in volta diversa. La distanza tra i 2 beep andava da 25 ms a 500 ms secondo il seguente incremento: 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 (fig. 1.12).

Per ogni condizione SOA è stata verificata l'occorrenza del fenomeno illusorio, e i risultati (fig. 1.13) dimostrano una forte presenza del fenomeno illusorio. Tra i due gruppi, sani di controllo (TD) e autistici, sono state fatte comparazioni sia nella condizione un flash accompagnato da due beep, quindi la condizione che comporta l'illusione, sia nella condizione di controllo di un flash accompagnato da un singolo beep, atta a verificare che il fenomeno illusorio occorrente dipendesse dal secondo beep fornito e non si verificasse sempre. E' importante notare che, anche in questa condizione di controllo (1 flash e 1 beep), sia i soggetti sani che i soggetti autistici talvolta riportavano di aver visto un flash in più, anche se la percentuale era maggiore per soggetti autistici.

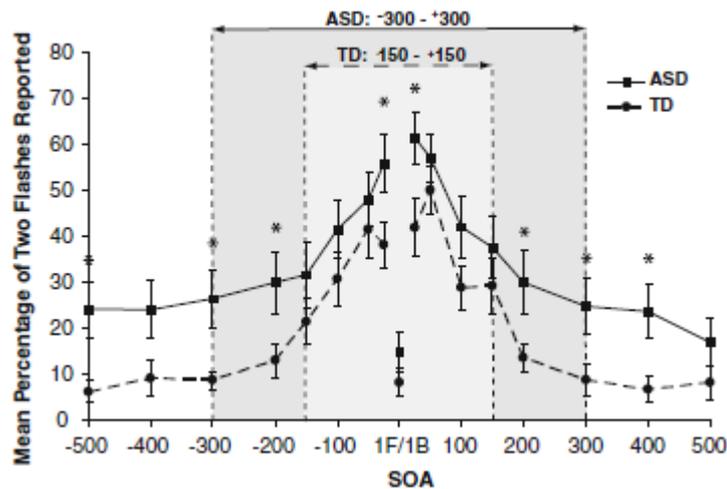


Fig. 1.13. Risultati dell'esperimento per soggetti sani e autistici

Come si vede in figura, il fenomeno illusorio è significativamente influenzato dal valore di SOA (per entrambi i gruppi di soggetti, il fenomeno illusorio diminuisce al crescere della distanza temporale tra i due beep), confermando quindi l'importanza dell'aspetto temporale nell'integrazione di stimoli sensoriali di modalità diverse. Ma si può notare una significativa differenza tra i due gruppi di soggetti: infatti al crescere della distanza temporale tra i due beep, i soggetti sani mostrano una diminuzione del fenomeno illusorio molto più rapida dei soggetti autistici, sebbene anche in questi l'illusione sia decrescente al crescere della distanza temporale tra i due beep acustici. Ciò indica quindi che i soggetti autistici mostrano una maggiore propensione nel riportare l'illusione rispetto ai soggetti sani.

Un'analisi statistica effettuata mediante t-test, che confronta l'incidenza del fenomeno illusorio ad ogni SOA rispetto alla condizione di controllo (1 flash e 1 beep), mette in evidenza una differenza significativa tra il numero di flash percepiti nella condizione due beep e 1 flash rispetto alla condizione di controllo in una determinata finestra temporale. Tali analisi suggeriscono approssimativamente una larghezza doppia della finestra temporale d'integrazione nei soggetti autistici, che precisamente va da -300 ms a 300 ms, mentre la finestra dei soggetti sani va da -150 ms a 150 ms.

Tale esperimento suggerisce dunque che i soggetti autistici presentino una finestra temporale d'integrazione maggiore, all'interno della quale essi sono portati a legare insieme stimoli multisensoriali di natura differente. Una possibile spiegazione di ciò è

che nei soggetti autistici i vincoli e le dinamiche temporali tra le regioni cerebrali possono essere alterati [11].

I risultati riportati sono quindi in accordo con lo studio presentato in precedenza, mostrando che l'integrazione multisensoriale di stimoli visivi e acustici di basso livello avviene anche negli autistici; questo studio, in più, suggerisce una differenza nella finestra di integrazione multisensoriale tra i soggetti sani e i soggetti autistici.

## *Capitolo Secondo*

# *Modello di rete neurale: descrizione qualitativa e quantitativa*

### **2.1 INTRODUZIONE**

Finora sono stati descritti gli aspetti generali e le caratteristiche dell'integrazione multisensoriale, in particolare dell'integrazione audiovisiva. Ciò sia per quanto riguarda la normale fisiologia in soggetti sani, sia poi anche per quanto concerne ciò che succede per soggetti autistici.

Il nostro obiettivo ora è simulare tramite un modello matematico di rete neurale questo fenomeno di integrazione. A questo scopo, un modello preesistente è stato opportunamente modificato allo scopo di approfondire lo studio di fenomeni d'interazione audiovisiva, in particolare il fenomeno di un flash illusorio indotto dal suono, nei soggetti sani e nei soggetti autistici per rimarcare se e come ci sono delle differenze tra le due popolazioni.

Il modello qui proposto si basa su un precedente modello di rete neurale sviluppato dal gruppo di Bioingegneria dell'Università di Bologna [12]. Tale modello, tramite dei parametri fissati, è in grado di simulare il fenomeno descritto da Shams, quindi il flash visivo illusorio indotto da beep sonori.

Tuttavia questo modello presenta dei limiti:

1. è ottimizzato per simulare il fenomeno illusorio soltanto nel caso in una specifica situazione, non prendendo per esempio in considerazione una variabilità del range temporale in cui vengono serviti ai soggetti i beep sonori;
2. riguarda una simulazione dell'integrazione audiovisiva per soggetti sani e non patologici, quindi non considerando che determinati parametri possano essere influenzati dall'insorgere della patologia.

Per approfondire questi ulteriori aspetti quindi, come vedremo in seguito, sono state apportate opportune modifiche allo scopo di simulare e studiare il fenomeno dell'integrazione in questi altri casi.

## 2.2 DESCRIZIONE QUALITATIVA DEL MODELLO

Il modello base da cui si è partiti consiste in due catene, due strati monodimensionali di  $N$  neuroni, uno strato rappresenta l'area visiva e l'altro strato rappresenta l'area acustica (fig. 2.1). Ogni cerchio grigio rappresenta un neurone, ogni linea invece rappresenta una connessione sinaptica tra i neuroni. Le linee che terminano con una freccia indicano connessioni sinaptiche eccitatorie, quelle che terminano con un pallino indicano connessioni sinaptiche inibitorie.

Ogni neurone codifica le informazioni provenienti da una specifica posizione nello spazio. Tutti i neuroni sono topologicamente allineati, quelli che occupano posizioni vicine codificano posizioni prossimali nello spazio. Si è assunto che tra i neuroni dello stesso layer, ci sia una distanza di  $1^\circ$ : dato che  $N$  è stato scelto essere uguale a 180, ogni strato copre un'area di  $180^\circ$  dello spazio visivo in un caso e acustico nell'altro.

Questi valori sono fittizi e sono stati scelti per non appesantire troppo il modello dal punto di vista computazionale.

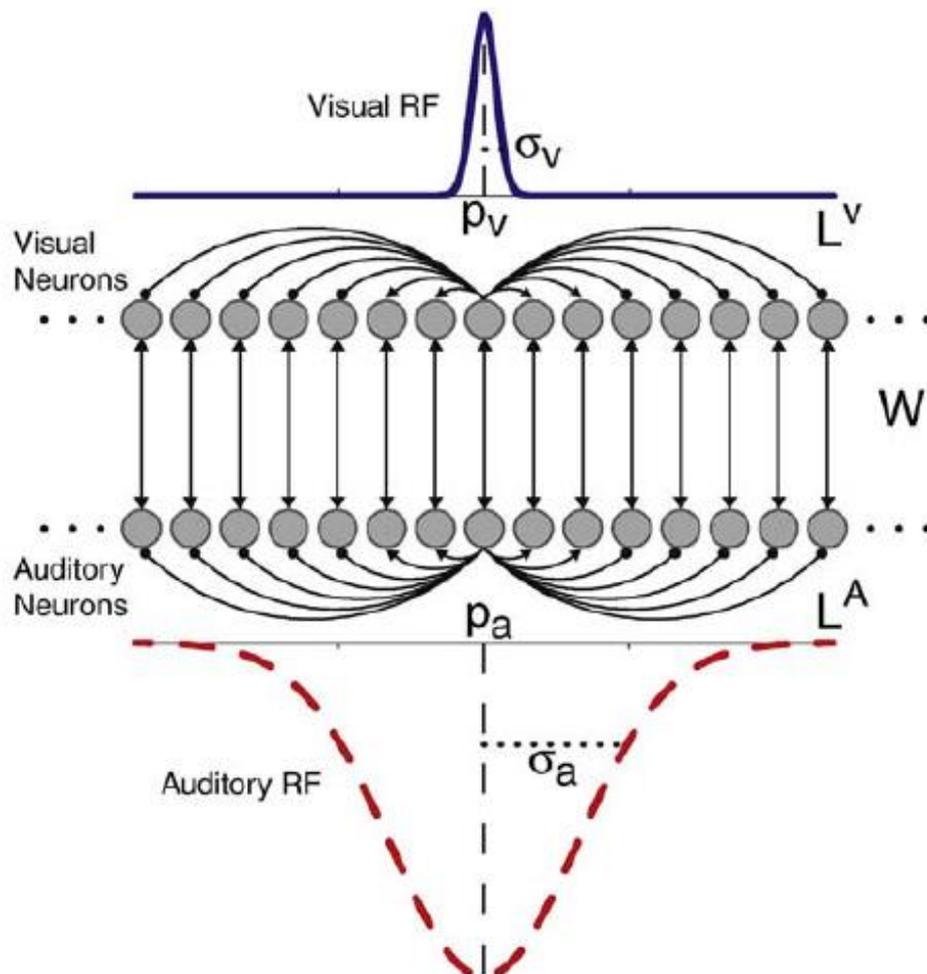


Fig. 2.1. Schema di organizzazione della rete neurale

La risposta neurale è descritta mediante un'equazione differenziale con una dinamica del primo ordine, che simula le proprietà integrative della membrana cellulare, e da una caratteristica statica sigmoideale, che stabilisce la presenza di una soglia inferiore e di una saturazione superiore per l'attivazione neurale. Il valore di saturazione è stato imposto a 1, quindi tutte le uscite sono normalizzate al valore massimo.

Gli elementi neurali all'interno di ciascuno strato sono connessi tra loro attraverso sinapsi laterali (sinapsi *intra-area*). Inoltre ogni neurone riceve degli input anche dai neuroni dell'area sensoriale opposta (sinapsi *inter-area*). Così l'ingresso totale ricevuto da ogni neurone risulta la somma di tre contributi: un input esterno, un input proveniente dai neuroni della stessa area unisensoriale attraverso le sinapsi laterali, un input cross-modale proveniente dai neuroni dell'altra modalità sensoriale.

Gli input visivi e acustici esterni sono rappresentati ognuno con una componente spaziale e una componente temporale. Gli aspetti spaziali sono descritti con una funzione Gaussiana che simula uno stimolo locale visivo o acustico, quindi un flash o un beep, che origina da una posizione limitata dello spazio, filtrato poi dai campi recettivi dei neuroni (*receptive fields*, RFs). Il punto centrale di tale funzione Gaussiana ( $p^a$  e  $p^v$  come mostrati in figura precedente, rispettivamente per lo stimolo acustico e lo stimolo visivo) corrisponde alla posizione di applicazione dello stimolo dal mondo esterno, mentre la deviazione standard ( $\sigma^a$  e  $\sigma^v$ ) è in relazione con la larghezza del campo recettivo. Nel modello si considera come ipotesi che il sistema visivo sia spazialmente più preciso rispetto a quello acustico, per cui si assume  $\sigma^v$  minore di  $\sigma^a$ .

Gli aspetti temporali degli input invece sono descritti usando una cinetica del secondo ordine. Questa è caratterizzata da due costanti di tempo, rispettivamente  $\tau^a$  e  $\tau^v$ , una per la modalità acustica e una per quella visiva.

Per l'input cross-modale è stato assunto che i neuroni delle due aree siano reciprocamente connessi uno ad uno da sinapsi eccitatorie. Più precisamente, un neurone riceve eccitazione solo dal neurone dell'altra modalità sensoriale posto in corrispondenza della sua stessa posizione spaziale. La connessione tra le due aree è simmetrica.

Gli input laterali originano invece dalle connessioni intra-area all'interno della stessa area unimodale. Queste connessioni includono sinapsi laterali sia di tipo eccitatorio che di tipo inibitorio, e hanno una disposizione classica a "*cappello messicano*", caratterizzata da una zona centrale eccitatoria circondata da un anello inibitorio. Così ogni neurone eccita (ed è eccitato da) quelli vicini, e inibisce (ed è inibito da) quelli più

distanti. In questo modo stimoli distali della stessa modalità tendono a reprimersi reciprocamente, interagendo tramite un meccanismo competitivo.

### 2.3 DESCRIZIONE MATEMATICA DEL MODELLO

In seguito, ciascun neurone sarà descritto attraverso un apice,  $m$ , che ne indica la specifica area corticale ( $m = a$  o  $v$ , dove  $a$  è riferita all'area acustica e  $v$  a quella visiva), e da un pedice,  $j$ , che si riferisce alla posizione spaziale relativa a quell'area ( $j = 1, 2, 3, \dots, 180$ ). L'input e l'output della rete di un particolare neurone all'istante di tempo  $t$  sono indicati rispettivamente con  $u(t)$  e  $y(t)$ . Perciò,  $y_j^m(t)$  rappresenta l'output di un neurone nella posizione  $j$ -esima appartenente alla modalità  $m$ , e può essere descritta dalla seguente equazione del primo ordine:

$$\tau \frac{dy_j^m(t)}{dt} = -y_j^m(t) + F(u_j^m(t)) \quad (1)$$

dove  $\tau$  è la costante di tempo del neurone e  $F(u)$  rappresenta una relazione di tipo sigmoideale:

$$F(u_j^m) = \frac{1}{1 + e^{-s(u_j^m - \theta)}} \quad (2)$$

dove  $s$  e  $\theta$  sono i parametri che stabiliscono, rispettivamente, la pendenza e la posizione centrale della funzione sigmoideale. La caratteristica sigmoideale è visibile nella figura seguente (fig. 2.2). Il valore di saturazione è stato imposto a 1, così che le attività neurali siano normalizzate al valore massimo.

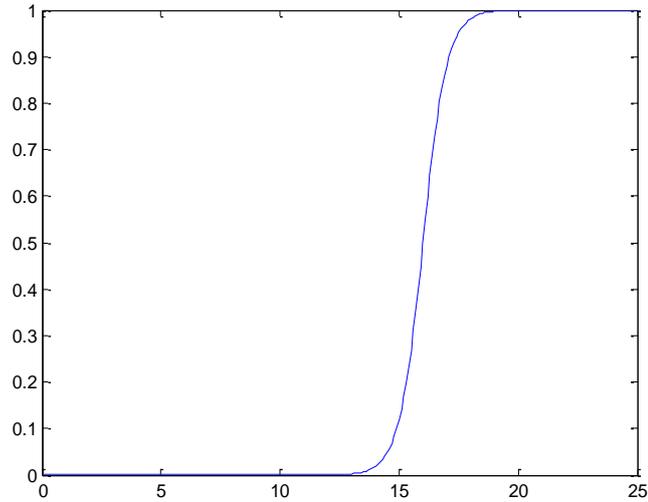


Fig. 2.2. Caratteristica statica sigmoideale dei neuroni della rete

Per semplicità in questo lavoro tutti i neuroni appartenenti ad entrambe le aree sono stati definiti utilizzando gli stessi parametri e la stessa costante di tempo nelle eq. (1) e (2).

L'input totale che arriva ad un neurone (la quantità  $u_j^m(t)$  nell'eq. (1)) è il risultato di due componenti: la prima (detta componente "inside") è il contributo delle sinapsi laterali provenienti dai neuroni della stessa area ed è indicata come  $l_j^m(t)$ ; la seconda (detta componente "outside") è il risultato della combinazione tra un input esterno  $e_j^m(t)$ , e un input cross-modale  $c_j^m(t)$ , cioè proveniente dai neuroni dell'altra modalità, trasmesso al neurone target attraverso le sinapsi inter-area eccitatorie.

Per simulare l'input laterale,  $l_j^m(t)$ , i neuroni all'interno di ogni area interagiscono tramite le sinapsi laterali eccitatorie e inibitorie: ogni neurone eccita ed è eccitato dai neuroni prossimali, ed inibisce ed è inibito dai neuroni più distali. Quindi, l'input che un neurone visivo o acustico riceve dagli altri neuroni della sua stessa area è definito come:

$$l_j^m(t) = \sum_k L_{jk}^m \cdot y_k^m(t) \quad (3)$$

dove  $y_k^m(t)$  è l'attività del neurone pre-sinaptico della modalità  $m$  alla posizione  $k$ , mentre  $L_{jk}^m(t)$  è la forza della sinapsi laterale che va dal neurone pre-sinaptico in posizione  $k$  al neurone post-sinaptico in posizione  $j$ , entrambi della stessa modalità.

Queste sinapsi, come già accennato, sono organizzate secondo la distribuzione classica detta a “cappello messicano” così definita:

$$L_{jk}^m(t) = \begin{cases} L_{ex0} \cdot e^{-\frac{(d_{jk})^2}{2\sigma_{ex}^2}} - L_{in0} \cdot e^{-\frac{(d_{jk})^2}{2\sigma_{in}^2}} & \text{se } d_{jk} \neq 0 \\ 0 & \text{se } d_{jk} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

In questa equazione,  $L_{ex0}$  e  $\sigma_{ex}$  definiscono una funzione Gaussiana eccitatoria, mentre  $L_{in0}$  e  $\sigma_{in}$  una inibitoria, e  $d_{jk}$  rappresenta la distanza tra il neurone pre-sinaptico in posizione  $k$  e il neurone post-sinaptico in posizione  $j$  nella stessa area.

Per ottenere la distribuzione delle sinapsi a “cappello messicano” è stato imposto che  $L_{ex0} > L_{in0}$  e  $\sigma_{ex} < \sigma_{in}$ . Ciò fa sì che ogni neurone ecciti quelli vicini e inibisca quelli lontani.

Gli elementi situati all'estremità della catena potrebbero non ricevere gli stessi input dagli altri, producendo così degli effetti di bordo indesiderati. Per evitare questa problematica si assume che lo strato di neuroni abbia una struttura circolare. Perciò, per la distanza  $d_{jk}$  si assume la seguente definizione:

$$d_{jk} = \begin{cases} |j - k|, & \text{se } |j - k| \leq N/2 \\ N - |j - k|, & \text{se } |j - k| > N/2 \end{cases} \quad (5)$$

dove  $N (=180)$  è il numero totale di neuroni in ogni area.

La condizione nulla per  $d_{jk}=0$  evita i cosiddetti autoanelli, cioè casi di autoeccitazione e/o autoinibizione dei neuroni. Le figure seguenti (fig. 2.3) mostrano la funzione Gaussiana eccitatoria, quella inibitoria e la differenza tra le due.

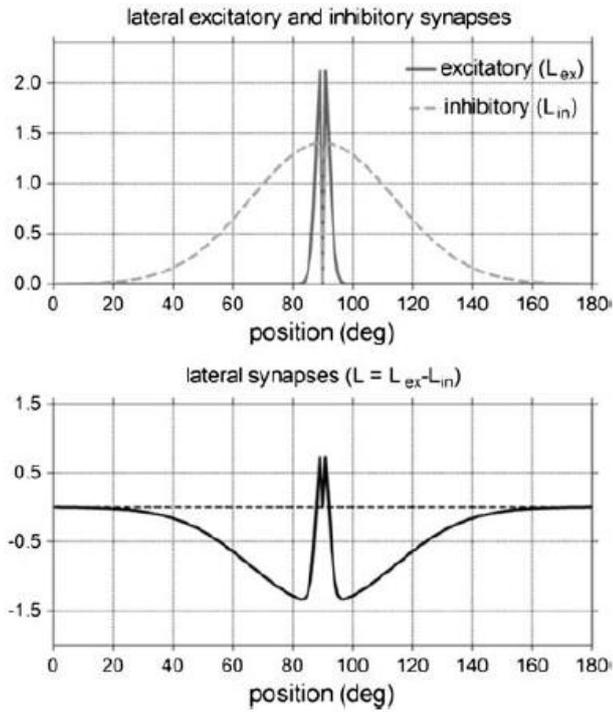


Fig. 2.3. Distribuzione a “cappello messicano” delle sinapsi laterali di un neurone

Per minimizzare il numero di ipotesi alla base del modello, le sinapsi laterali sono assunte con lo stesso pattern (questo descritto del “*cappello messicano*”) e con lo stesso valore dei parametri per entrambe le aree.

Gli input esterni sono simulati mediante una funzione Gaussiana spaziale, per simulare il campo recettivo dei neuroni. Considerando uno stimolo visivo o acustico spazialmente localizzato e centrato alla posizione  $p^m$ , l’input entrante alla rete può essere descritto come:

$$e_j^m(t) = E_0^m e^{-\frac{(d_j^m)^2}{2(\sigma^m)^2}} \quad (6)$$

dove  $E_0^m$  rappresenta la forza dello stimolo,  $d_j^m$  è la distanza tra il neurone in posizione  $j$  e lo stimolo alla posizione  $p^m$ , e  $\sigma^m$  definisce la larghezza del campo ricettivo (RF) del neurone. Come descritto in precedenza per le sinapsi laterali, per evitare indesiderati

effetti di bordo, anche gli input esterni e i campi recettivi sono implementati per avere una struttura circolare. Per cui, la distanza  $d_j^m$  è definita come:

$$d_j^m = \begin{cases} |j - p^m|, & \text{se } |j - p^m| \leq N/2 \\ N - |j - p^m|, & \text{se } |j - p^m| > N/2 \end{cases} \quad (7)$$

L'input cross-modale,  $c_j^m(t)$ , è ottenuto assumendo che ogni neurone riceve un'eccitazione dal neurone dell'altra modalità posto nella corrispondente posizione spaziale, c'è quindi una connessione reciproca uno a uno tra i neuroni delle due aree:

$$c_j^m(t) = W \cdot y_j^m(t - \Delta t). \quad (8)$$

Con  $W$  indichiamo il peso della reciproca eccitazione tra i neuroni delle due aree.  $\Delta t$  è il ritardo (*delay*) che rappresenta la latenza con cui l'input cross-modale è scambiato tra la corteccia visiva e l'acustica.

L'input esterno e l'input cross-modale, entrambi di tipo eccitatorio, sono responsabili della componente *outside* dell'input. Tuttavia, prima che questi influenzino la risposta neurale, vengono filtrati da un'equazione differenziale del secondo ordine che simula la dinamica temporale dello stimolo nella corteccia, cioè simula gli aspetti temporali dei campi recettivi.

Indicando con  $o_j^m(t)$  la componente *outside* degli input dopo questo filtraggio, abbiamo:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} o_j^m(t) = \delta_j^m(t); \\ \frac{d}{dt} \delta_j^m(t) = \frac{G^m}{\tau^m} \cdot [e_j^m(t) + c_j^m(t)] - \frac{2 \cdot \delta_j^m(t)}{\tau^m} - \frac{o_j^m(t)}{(\tau^m)^2}; \end{cases} \quad (9)$$

dove  $G^m$  rappresenta il guadagno,  $\tau^m$  definisce le costanti di tempo della dinamica. Quest'ultima equazione rappresenta una risposta all'impulso di secondo ordine con due poli reali coincidenti. Questa è frequentemente usata nei modelli di reti neurali per simulare l'evoluzione temporale degli input neurali e le dinamiche delle sinapsi.

Nell'esempio della prossima figura (fig. 2.4) è mostrata l'evoluzione temporale della componente *outside* dell'input che arriva al neurone target visivo o acustico (A), quando uno stimolo impulsivo esterno è applicato (B).

Come si nota l'input esterno acustico è più forte, ma leggermente più breve del visivo, la risposta neurale dei neuroni acustici è più rapida di quella visiva; per via della sua costante di tempo più piccola torna a riposo prima dell'area visiva che rimane attiva più a lungo.

La linea tratteggiata orizzontale rappresenta la soglia di attivazione neurale, quando l'input in ingresso al neurone è forte da superare tale soglia il neurone si attiva e risponde all'input.

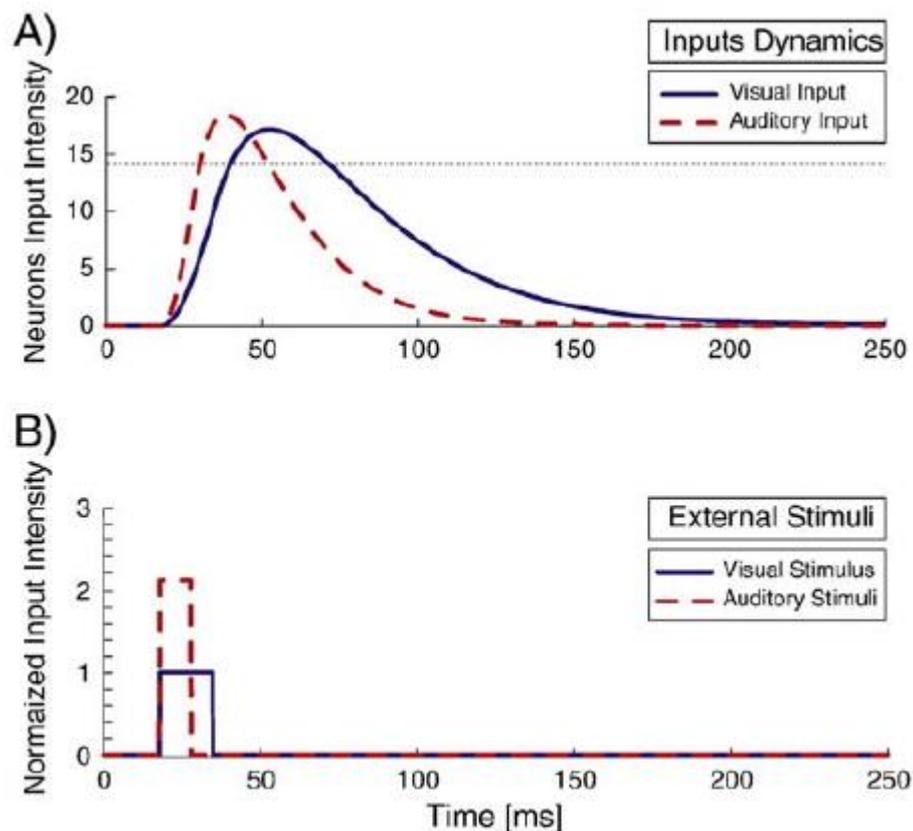


Fig. 2.4. Evoluzione temporale della componente outside (A) dopo aver dato stimolo esterno (B)

In base a quanto detto precedentemente, l'input totale,  $u_j^m(t)$ , ricevuto da un neurone della modalità  $m$  alla posizione  $j$  è definito come:

$$u_j^m(t) = l_j^m(t) + o_j^m(t). \quad (10)$$

Come detto è quindi la somma delle componenti precedentemente descritte: il contributo delle sinapsi laterali e il contributo delle sorgenti esterne, cioè la somma dell'input fornito dall'esterno e del contributo delle sinapsi inter-area.

Per quanto riguarda l'assegnazione di tutti i parametri del modello, i valori sono stati dati in base a dati presenti in letteratura e in accordo a tutti i criteri discussi in precedenza. Sotto è riportata una tabella con i valori del modello base.

<b>Neuroni</b>					
N=180	$\theta=16$	s=2	$\tau=5$ ms		
<b>Dinamica input</b>					
$G^v=e^1$	$\tau_v=25$ ms	$G^a=e^1$	$\tau_a=15$ ms		
<b>Campi recettivi</b>					
$E_{0v}=1$	$\sigma_v=4$	$E_{0a}=3$	$\sigma_a=32$		
<b>Sinapsi</b>					
W=0.35	$\Delta t=16$ ms	$L_{ex0}=2$	$\sigma_{ex}=3$	$L_{in0}=1.8$	$\sigma_{in}=24$

Tab. 2.1

Evidenze fisiologiche hanno mostrato che nel cervello il processo dell'informazione acustica è più veloce, e i neuroni corticali acustici hanno una minore latenza di quelli della corteccia visiva. Insieme a ciò, la corteccia visiva presenta campi recettivi spaziali più piccoli, e quindi una maggior risoluzione spaziale, ma di contro presentano una minore risoluzione temporale.

In questo modello quindi, i neuroni visivi hanno campi recettivi spaziali più piccoli rispetto a quelli acustici, ma una maggiore costante di tempo. Queste sono le uniche

differenze tra le due aree, tutti gli altri parametri (per esempio i parametri della dinamica delle sinapsi) sono stati assunti uguali per tutti i neuroni delle aree, per semplicità e per ridurre le assunzioni nel modello.

Per quanto riguarda i parametri dei neuroni, l'ascissa centrale,  $\theta$ , è assegnata per avere un'attività trascurabile dei neuroni in condizioni di riposo, cioè in assenza di input esterni. La pendenza della relazione sigmoideale,  $s$ , è assegnata per avere una transizione graduale, non repentina, dalla situazione di riposo alla saturazione in risposta ad uno stimolo dall'esterno.

I parametri che invece stabiliscono la forza e l'ampiezza delle sinapsi laterali in entrambe le aree sono assegnati per soddisfare delle precise condizioni: l'inibizione deve essere forte per garantire un meccanismo competitivo tra due stimoli all'interno della stessa area, il bilancio tra inibizione ed eccitazione deve essere tale da evitare problemi di instabilità, per esempio un'incontrollata eccitazione che si propaga in tutta l'area.

La forza delle sinapsi inter-area ( $W$ ) è assegnata in modo che sia sufficientemente alta affinché l'input cross-modale proveniente da una data area possa rinforzare la risposta dei neuroni dell'altra area laddove questi neuroni siano vicini alla loro soglia di attivazione. Nello stesso tempo il valore di questa sinapsi è tenuta sufficientemente bassa in modo che un input esterno in una data modalità non induca un'attività "fantasma" nell'area dell'altra modalità, cioè che i neuroni di quest'ultima non si attivino in mancanza dello stimolo per cui sono specifici.

## **2.4 RISULTATI DEL MODELLO DI BASE**

Il modello fin qui descritto con i parametri assegnati come visto, è in grado quindi di simulare il caso dell'illusione di un flash visivo indotto dal suono.

Innanzitutto il modello si comporta correttamente in risposta a stimoli unisensoriali, come mostrato in figura 2.5 e in figura 2.6.

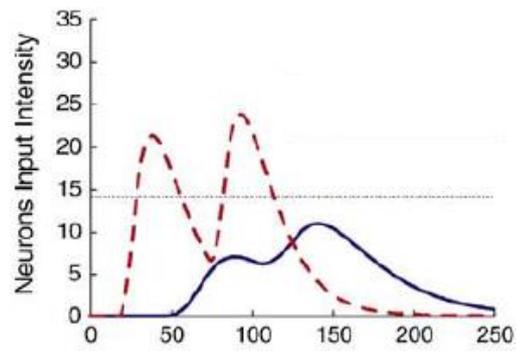
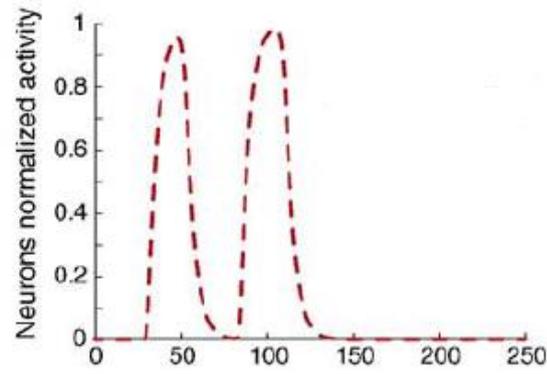
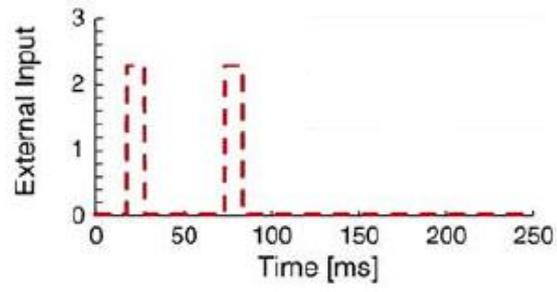
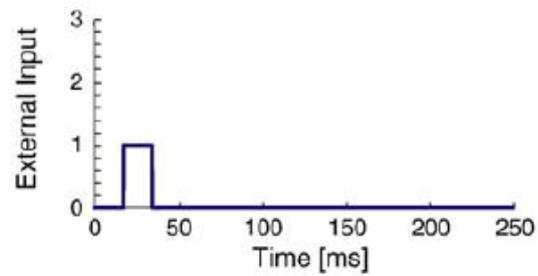


Fig. 2.5. Risposta del modello a stimoli unisensoriali acustici



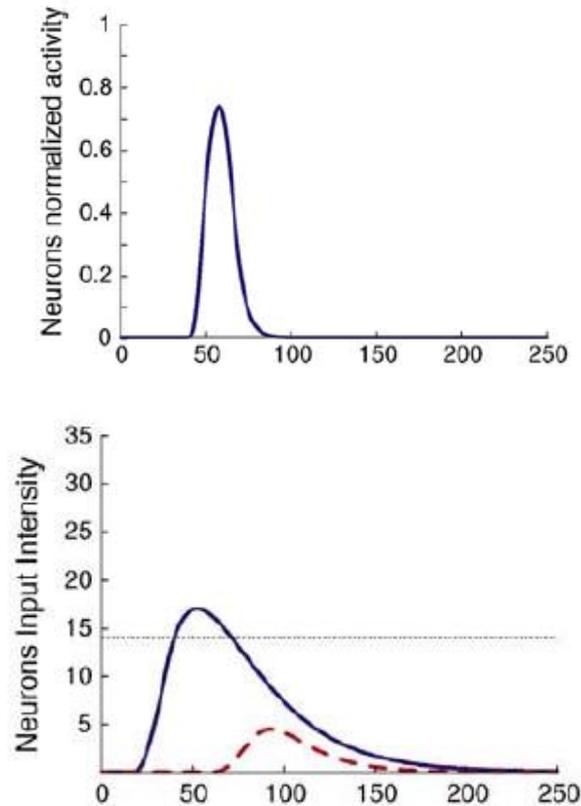


Fig. 2.6. Risposta del modello a uno stimolo unisensoriale visivo

Nella figura 2.5 alla rete vengono presentati in ingresso due stimoli acustici in successione ad una distanza di 56 ms l'uno dall'altro. Nella figura 2.6 invece alla rete viene dato in ingresso un singolo stimolo visivo. Si può osservare che solo l'area che riceve la stimolazione si attiva (acustica nel primo caso, visiva nel secondo caso), mentre l'area non stimolata rimane silente.

In realtà, vista la presenza delle sinapsi inter-area, i neuroni dell'altra modalità risentono dell'attività dei neuroni direttamente stimolati dall'input esterno, ma la loro attività resta al di sotto della soglia al di sopra della quale abbiamo l'attivazione (terze immagini delle figure 2.5 e 2.6).

Quindi è stata verificata la capacità della rete di riprodurre l'illusione visiva, ossia quella riportata da Shams, e sono stati dati alla rete due input acustici e un input visivo contemporaneo al primo beep sonoro (fig. 2.7).

In questo caso notiamo un picco di attività neurale visiva provocato dall'input fornito dall'esterno, ma in seguito ne notiamo un altro che, visto che l'input visivo fornito dall'esterno era uno solo, corrisponde al flash percettivo illusorio (fig. 2.9). Questo è

dovuto all'attività nell'area acustica (fig. 2.8), risultato del secondo input esterno, trasmessa all'area visiva attraverso le sinapsi inter-area.

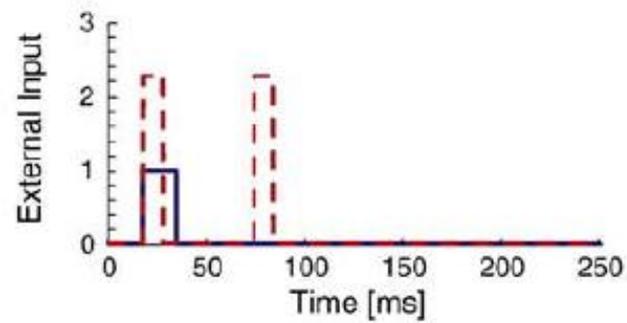


Fig. 2.7. Input esterni acustici e visivi dati insieme

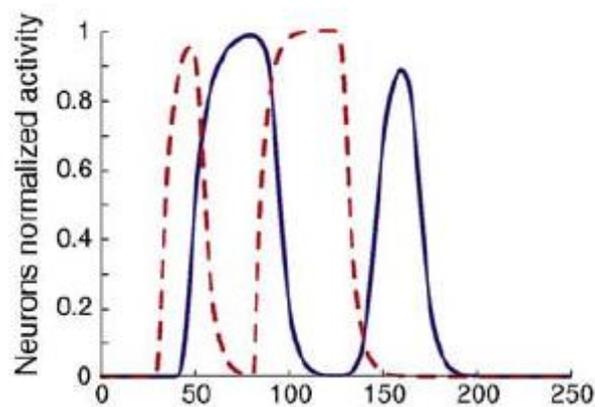


Fig. 2.8. Attività neuroni acustici e visivi in risposta agli stimoli esterni visivi e acustici

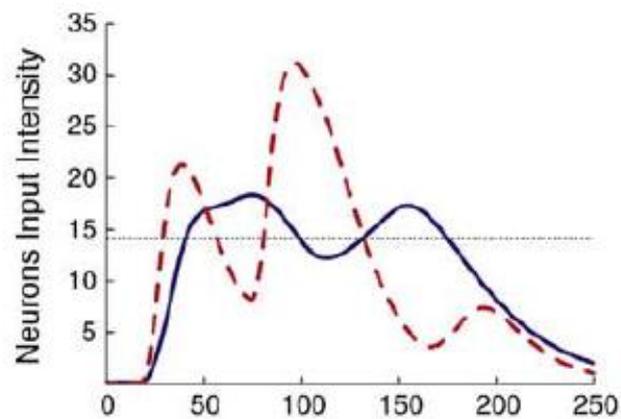


Fig. 2.9. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici in risposta agli stimoli esterni

Si nota in particolare in questa ultima figura (fig. 2.9) che un solo input visivo produce un'attività neurale sopra soglia; tuttavia quando lo stimolo visivo è accompagnato da un input acustico, l'attività neurale visiva resta sopra soglia più a lungo, quindi i neuroni visivi sono più attivi, di conseguenza l'attività dell'area visiva è più forte e più lunga. Ciò fa sì che nonostante vada poi sotto soglia con la sua costante di tempo, non lo faccia di molto, e quindi quando arriva l'input dall'area acustica provocato dal secondo beep tramite le sinapsi inter-area, l'attività neurale dei neuroni visivi torna sopra soglia. Come dimostrato nell'esperimento di Shams, il fenomeno illusorio non è debole, ma resiste anche a modifiche di intensità dell'input fornito e modifiche delle caratteristiche temporali. Tuttavia se diminuisce l'intensità dello stimolo acustico, diminuisce anche l'intensità del percepito illusorio visivo, di conseguenza se l'input acustico è troppo basso, l'illusione non avviene perché l'attività dell'area acustica non influenza abbastanza l'area visiva (fig. 2.10).

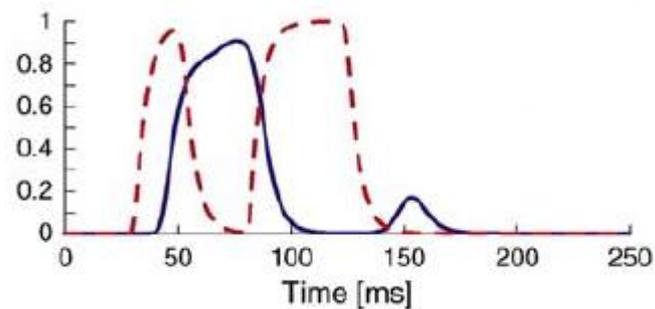


Fig. 2.10. Attività neuroni acustici e visivi in risposta agli stimoli esterni visivi e acustici abbassando intensità stimoli

Stessa cosa avviene se si aumenta la distanza (SOA) tra i due beep acustici, si è visto che già con una distanza di 65 ms l'illusione non occorre più (fig. 2.11).

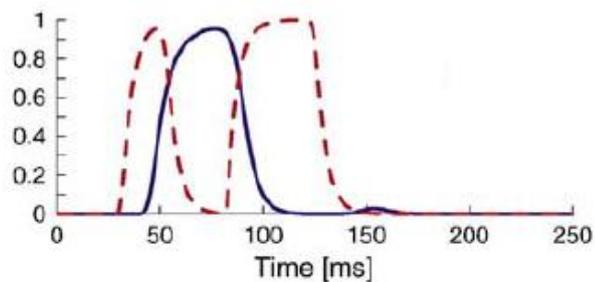


Fig. 2.11. Attività neuroni acustici e visivi in risposta agli stimoli esterni visivi e acustici aumentando distanza temporale tra i due stimoli acustici

Questi risultati dimostrano quindi che il modello può simulare l'effetto illusorio di percezione di un flash indotto dal suono. Tuttavia è ottimizzato per simulare questo effetto solo nel caso di una distanza tra i due beep (SOA) pari a 56 ms. In questo lavoro di tesi invece vogliamo simulare l'effetto per più distanze temporali.

In particolare i nostri obiettivi sono:

1. simulare il fenomeno illusorio a distanze temporali (SOA) tra i beep differenti, specificatamente in un intervallo che va da 25 ms a 500 ms;
2. simulare il caso in cui l'illusione visiva avvenga qualora un primo beep è dato da solo ed è seguito dopo un certo SOA da una coppia di un beep e un flash dati insieme (mentre il modello è ottimizzato laddove il primo beep e il flash sono contemporanei e poi seguiti da un secondo beep);
3. vogliamo valutare tutto questo non solo per dei soggetti sani, ma anche per soggetti autistici, simulando quindi l'integrazione audiovisiva e l'effetto Shams anche per questa categoria di soggetti.

Per questo, come vedremo nel prossimo capitolo, abbiamo effettuato un'analisi di sensibilità del modello di base, al fine di apporre opportune modifiche dei parametri per poter perseguire questi obiettivi.

## *Capitolo Terzo*

### *Analisi di sensitività del modello: risposta del modello (flash illusion) al variare del valore di alcuni parametri*

#### **3.1 ANALISI DEL MODELLO IN CONDIZIONE DI BASE PER DIVERSI VALORI DI STIMULUS ONSET ASYNCHRONY (SOA)**

Nel capitolo precedente è stato descritto il modello matematico da cui si è partiti e i suoi limiti. Il nostro obiettivo è testare il fenomeno dell'illusione visiva dovuta a beep sonori in una finestra temporale più ampia rispetto a quella per il quale il modello è stato ottimizzato. In particolare il modello era ottimizzato per riprodurre il fenomeno illusorio qualora i due beep sonori fossero temporalmente separati di 56 ms.

In questo lavoro, invece, vogliamo testare l'illusione visiva nel caso in cui l'intervallo temporale che separa i due stimoli acustici (SOA) vari in un range molto più ampio: da 25 ms a 500 ms. In particolare i valori utilizzati per l'SOA sono quelli indicati in letteratura, ovvero 25 ms, 50 ms, 100 ms, 150 ms, 200 ms, 300 ms, 400 ms, 500 ms.

Inoltre è necessario distinguere due condizioni di stimolazione che, negli esperimenti riportati in letteratura, si sono mostrate entrambe in grado di produrre il fenomeno illusorio.

Condizione 1: il primo beep è contemporaneo al primo flash e il secondo beep è isolato (fig. 3.1). Ovvero la stimolazione (A+V) precede A.

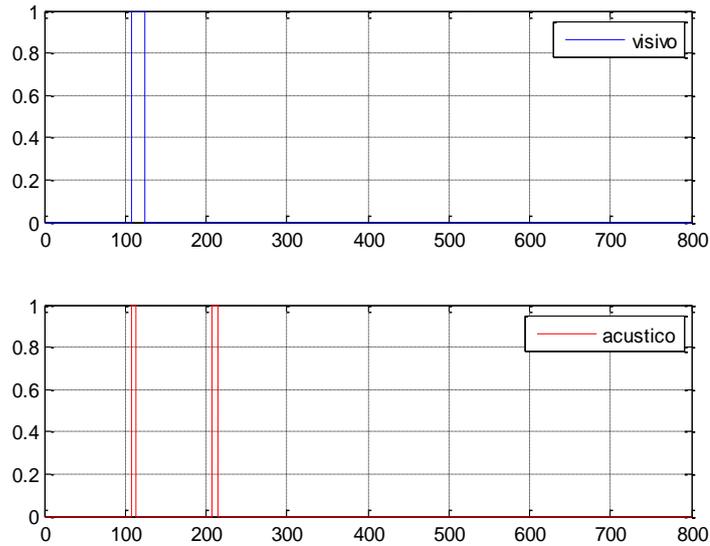


Fig. 3.1. Configurazione stimolazione condizione 1

Condizione 2: il primo beep è isolato e il secondo beep è contemporaneo al flash (fig. 3.2). La stimolazione A precede (A+V).

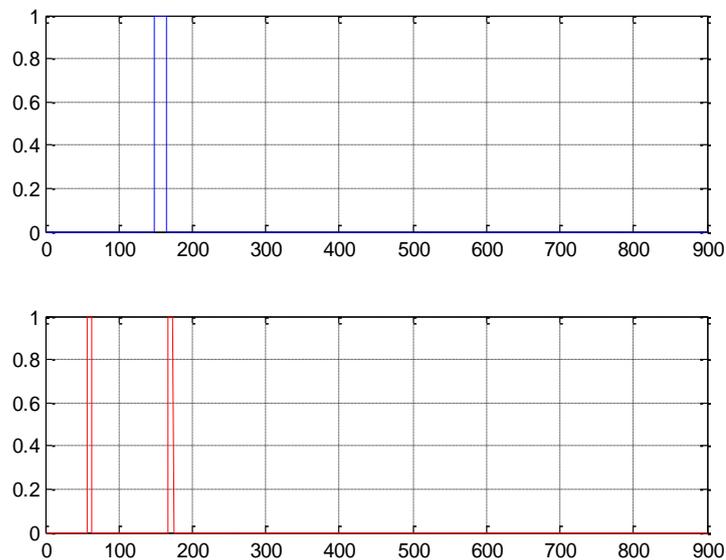


Fig. 3.2. Configurazione stimolazione condizione 2

Il primo passo è stato quindi quello di testare il modello andando a vedere cosa succede per questi valori diversi di SOA. Si noti che in queste prime simulazioni tutti i parametri del modello sono stati mantenuti al loro valore basale.

Essendo il modello ottimizzato per un valore di SOA tra i due beep di 56 ms, cominciamo a vedere cosa succede a una distanza di 50 ms.

### SOA=50 ms (condizione 1)

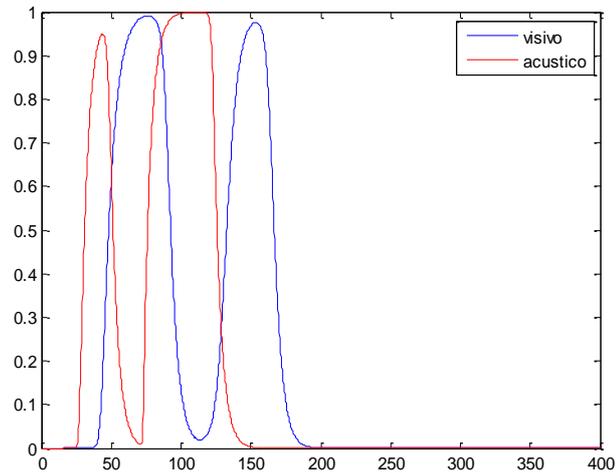


Fig. 3.3. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms tra i beep nella condizione 1

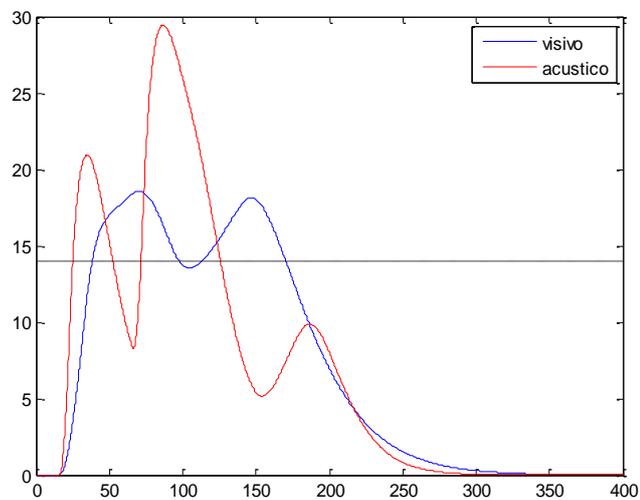


Fig. 3.4. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms tra i beep nella condizione 1

Notiamo un picco di attività neurale visiva (blu) provocato dall'input fornito dall'esterno, seguito da un secondo picco che corrisponde ad un flash percettivo illusorio (fig. 3.3). Questo è dovuto all'attività in corso nell'area acustica (fig. 3.3), risultato del secondo input esterno acustico (rosso), trasmessa all'area visiva attraverso

le sinapsi inter-area. Per cui per un SOA di 50 ms il modello replica bene l'effetto Shams.

Si noti che la linea tratteggiata nella figura 3.4 (e nelle figure analoghe nel seguito) indica la soglia di attivazione neurale, ovvero il valore dell'input al di sotto del quale il neurone resta praticamente silente. Il valore di tale soglia dipende dai parametri utilizzati per la funzione sigmoideale di attivazione neurale.

### SOA=100 ms (condizione 1)

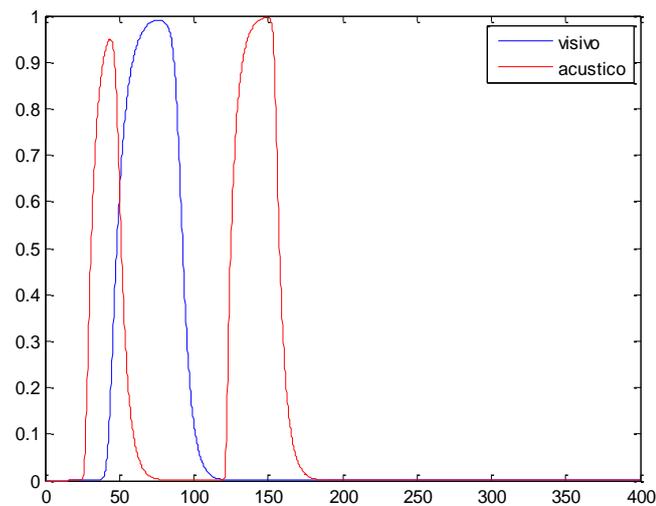


Fig. 3.5. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms tra i beep nella condizione 1

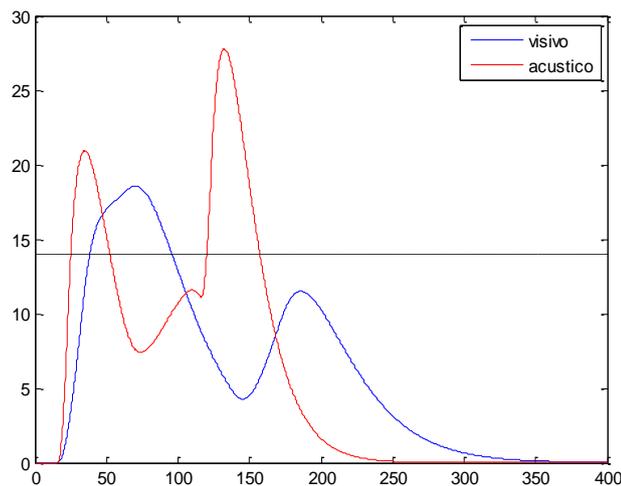


Fig. 3.6. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms tra i beep nella condizione 1

Anche in questo caso notiamo un primo picco visivo dovuto all'input visivo esterno fornito (figura 3.5), ma non ne notiamo un secondo; possiamo tuttavia notare che si

verifica un secondo picco nell'input visivo dovuto all'attività dei neuroni acustici in seguito alla presentazione del secondo beep, ma tale input non supera la soglia di attivazione neurale, per cui non si verifica la percezione di un ulteriore flash (figura 3.6). Infatti come visibile nella figura 3.5 non abbiamo una ulteriore attività visiva in seguito alla presentazione dell'altro beep. Quindi il modello, per un SOA di 100 ms non riesce a replicare il fenomeno, di conseguenza non vi riuscirà neanche per SOA superiori. Vediamo comunque per completezza, come si comporta il modello per un SOA di 150 ms.

### SOA=150 ms (condizione 1)

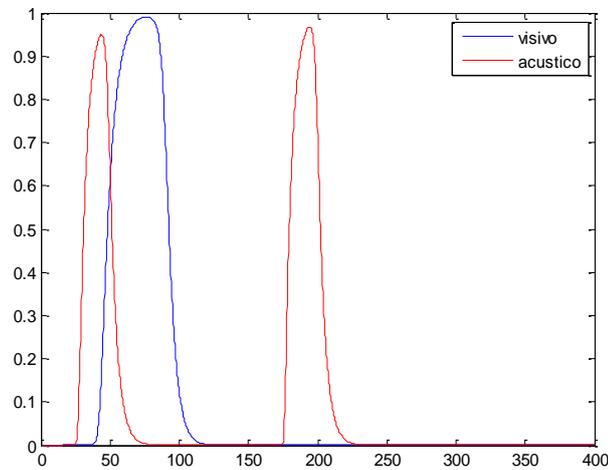


Fig. 3.7. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 150 ms tra i beep nella condizione 1

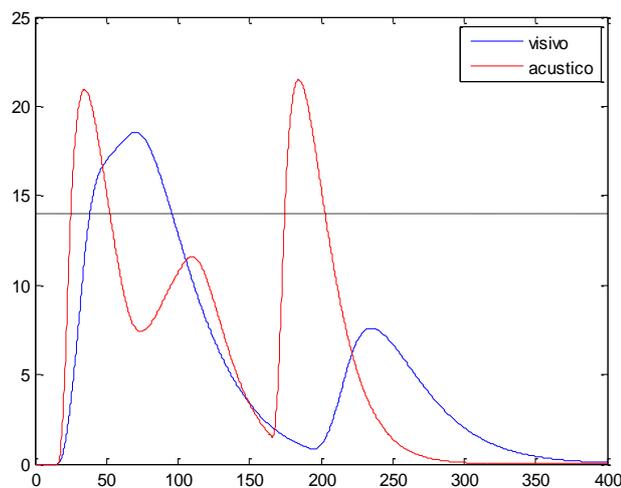


Fig. 3.8. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 150 ms tra i beep nella condizione 1

Come nel caso precedente abbiamo solo un picco visivo dovuto all'input esterno, mentre il secondo beep non fornisce all'area visiva un input sufficiente per far sì che i neuroni visivi superino la soglia di attivazione.

In conclusione, quindi il modello per SOA superiori a 50 ms non riesce a replicare l'illusione. Complessivamente questo limite è dovuto al fatto che il secondo beep, presentandosi con ritardo elevato dal primo beep (e quindi dallo stimolo visivo) agisce sovrapponendosi all'input visivo precedente quando ormai quest'ultimo è sceso troppo rispetto alla soglia di attivazione. Pertanto il contributo dovuto al secondo beep non è in grado di portare l'input visivo nuovamente sopra soglia. Questo limite sembra quindi essere dovuto principalmente a una dinamica ( $\tau_v$ ) del visivo troppo veloce.

### SOA=25 ms (condizione 1)

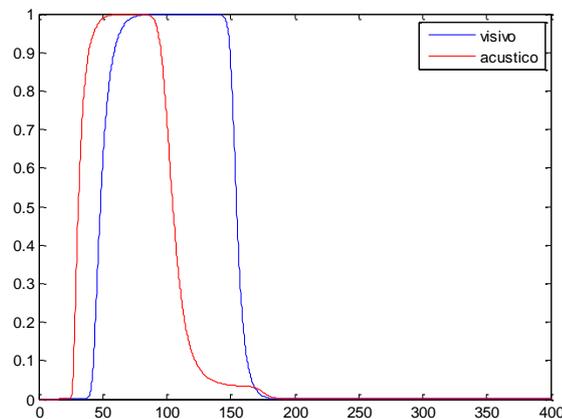


Fig. 3.9. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms tra i beep nella condizione 1

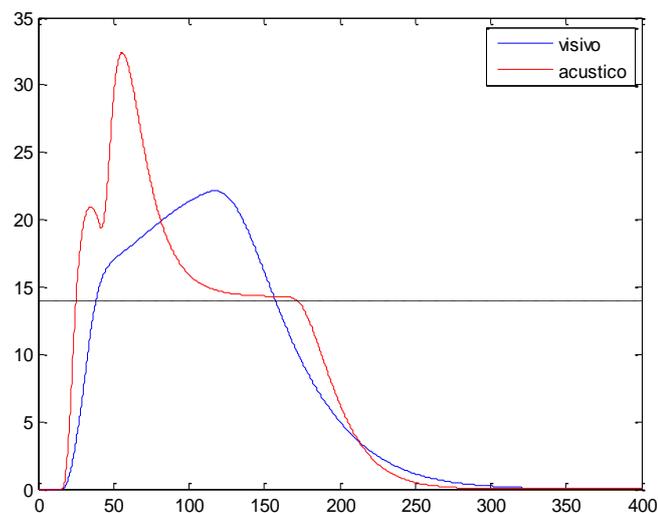


Fig. 3.10. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 25 ms tra i beep nella condizione 1

Stavolta notiamo subito un andamento differente rispetto ai precedenti: si verifica un unico picco acustico ed un unico elevato e duraturo picco visivo (fig. 3.9). Infatti, i due beep acustici sono molto vicini e la dinamica temporale dei neuroni acustici ( $\tau_a=15$  ms) non è sufficiente per permettere di generare due attivazioni separate. Di conseguenza i due beep acustici determinano una relativamente lunga attivazione nell'area acustica; quest'ultima, attraverso le sinapsi inter-area, determina una unica e prolungata attivazione nell'area visiva.

Quindi, anche per un SOA di 25 ms il modello non riesce a replicare l'illusione a causa del limite sulla dinamica temporale dei neuroni acustici.

Vediamo ora come si comporta il modello nella condizione 2, laddove il primo beep venga dato singolo e poi sia seguito, dopo un certo SOA, da un beep e un flash dati insieme.

Cominciamo con un SOA di 25 ms.

### SOA=25 ms (condizione 2)

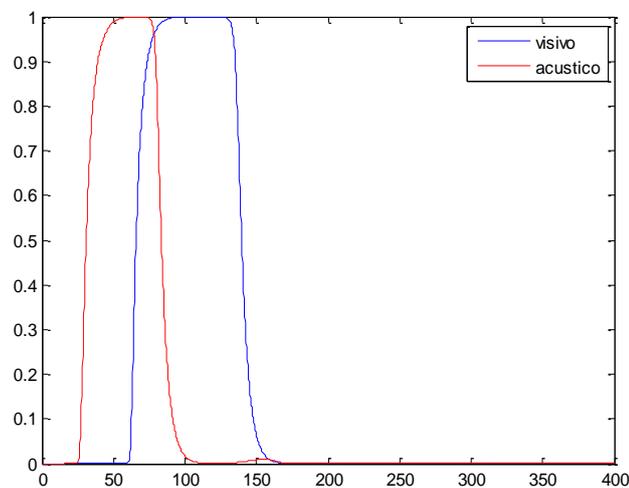


Fig. 3.11. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms tra i beep nella condizione 2

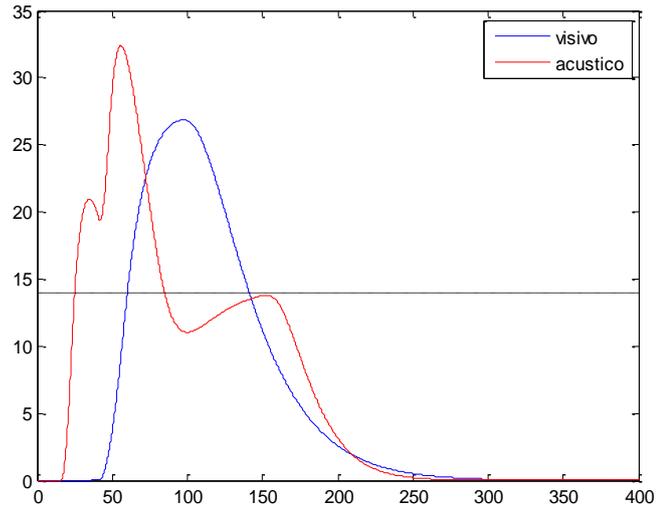


Fig. 3.12. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 25 ms tra i beep nella condizione 2

Anche in questo caso si nota come a causa della vicinanza dei due beep acustici, essi non vengono percepiti separati e si ha un'unica attivazione nell'area acustica. Questa, insieme all'input visivo fornito dall'esterno determina una prolungata (e unica) attivazione visiva. Non si ha dunque il fenomeno illusorio di un secondo flash.

**SOA=50 ms (condizione 2)**

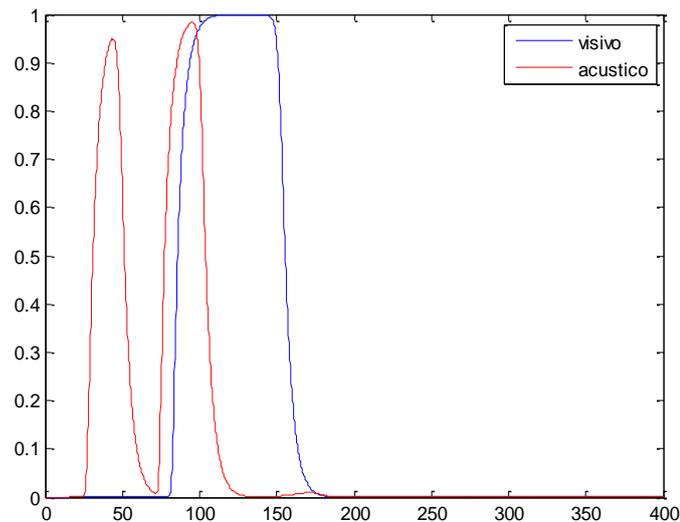


Fig. 3.13. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms tra i beep nella condizione 2

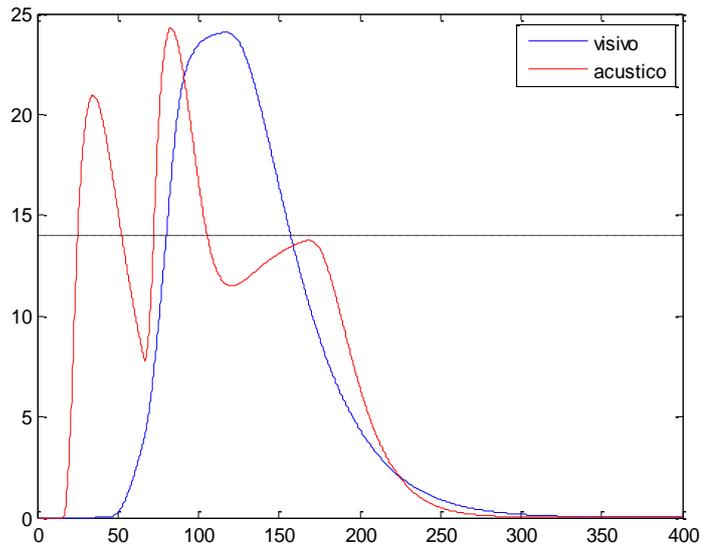


Fig. 3.14. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms tra i beep nella condizione 2

Anche in questo caso si ha un'unica prolungata attivazione nell'area visiva, dovuta all'influenza esercitata dal doppio beep. In questo caso, il primo beep ha l'effetto di generare un input non nullo all'area visiva ancora prima che venga presentato lo stimolo visivo (infatti l'input all'area visiva è diverso da zero già un poco prima di 50 ms). Questo accelera e rinforza l'attivazione nell'area visiva conseguente alla presentazione del flash, che è a sua volta rinforzata dal secondo beep. Notiamo anche che l'elevato e prolungato picco visivo influenza l'area acustica, per via delle sinapsi inter-area, la cui attività infatti non scende subito a zero, ma risale per scendere poi lentamente.

### SOA=100 ms (condizione 2)

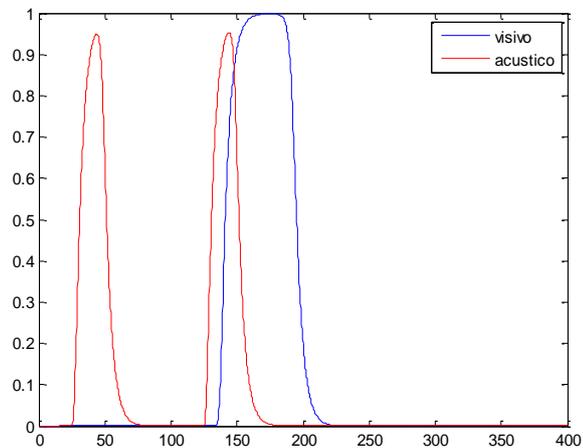


Fig. 3.15. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms tra i beep nella condizione 2

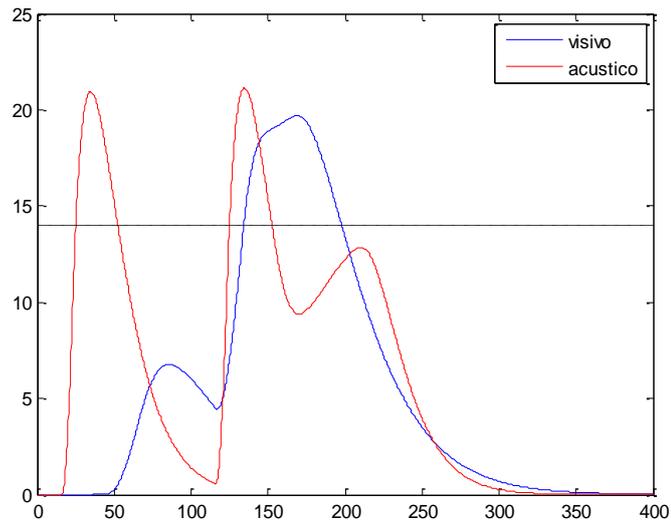


Fig. 3.16. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms tra i beep nella condizione 2

Rispetto ai casi precedenti qui notiamo come il picco visivo abbia una durata inferiore. Questo perché l'input all'area visiva causata dal primo beep tende a ridursi prima che giunga il flash unito al secondo beep, per cui l'effetto nell'area visiva è quasi esclusivamente dovuto al solo input visivo esterno fornito insieme al secondo beep. Quindi anche in questo caso il modello non riesce a simulare l'effetto Shams. Mano a mano che aumenta l'SOA il risultato non cambia.

Vediamo per completezza il caso di un SOA di 200 ms.

### SOA=200 ms (condizione 2)

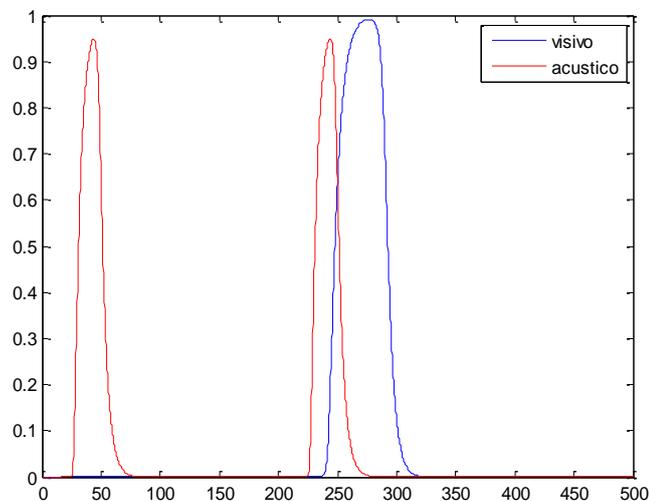


Fig. 3.17. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 200 ms tra i beep nella condizione 2

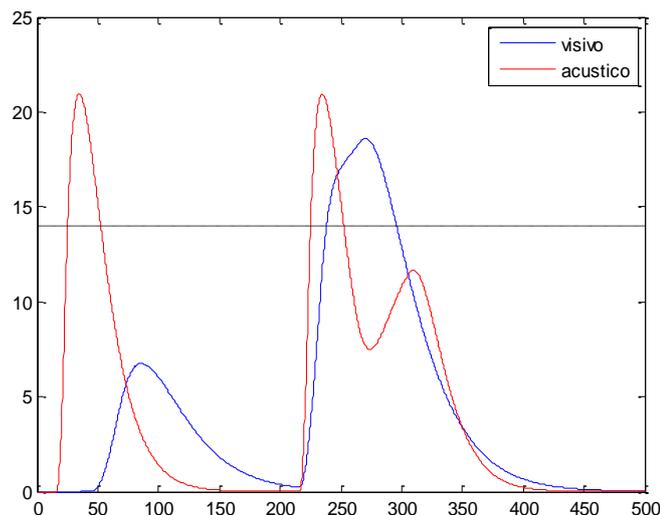


Fig. 3.18. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 200 ms tra i beep nella condizione 2

Anche qui il picco visivo è uno e causato dall'input visivo esterno. Notiamo che la prima attivazione acustica determina un input non nullo all'area visiva, ma è di fatto insufficiente a influenzare la risposta al singolo flash e quindi non è in grado di portare alla percezione del flash illusorio. Pertanto, il modello con i valori di base dei parametri non è adatto a replicare l'effetto Shams in nessun caso della condizione 2.

### 3.2 ANALISI DI SENSITIVITÀ DEL MODELLO: COMPORTAMENTO IN RISPOSTA A DIVERSI SOA AL VARIARE DEI PARAMETRI

Poiché il modello, con i valori basali dei parametri non è in grado di riprodurre il fenomeno illusorio per diversi SOA e nelle due condizioni 1 e 2, si è proceduto a verificare se, variando i valori di alcuni parametri, il modello fosse in grado di replicare il fenomeno illusorio in un set più vasto di configurazione degli input. Il passo successivo è stato quindi provare a variare i parametri per analizzare il comportamento del modello. Per prima cosa si è pensato di agire sulle costanti di tempo  $\tau_v$  e  $\tau_a$  per modificare quindi la dinamica e l'andamento degli input in arrivo ai neuroni.

Vediamo cosa succede aumentando  $\tau_v$ .

$\tau_v=30$ ;

SOA=100 ms (condizione 1)

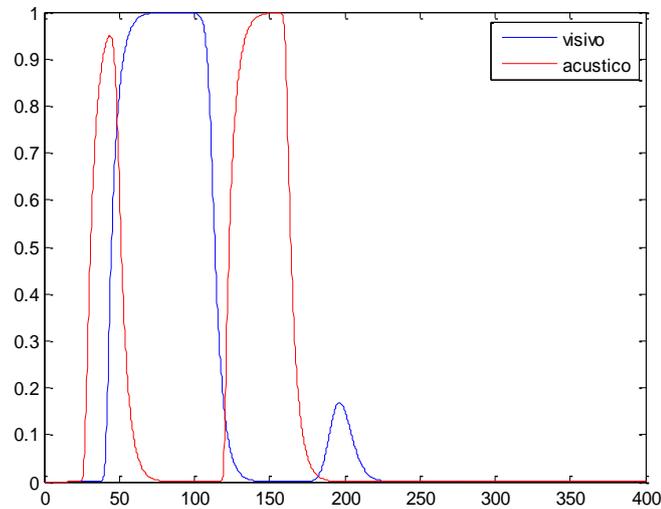


Fig. 3.19. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con  $\tau_v=30$

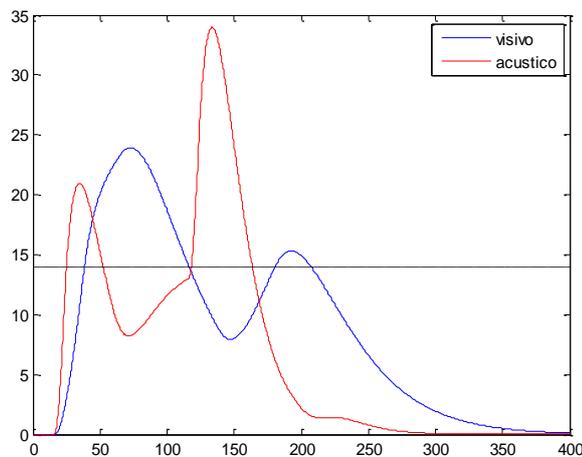


Fig. 3.20. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con  $\tau_v=30$

Se confrontiamo queste ultime figure con le 3.5 e 3.6 che mostravano l'andamento sempre per un SOA di 100 ms, notiamo subito la differenza nell'andamento dell'attività dei neuroni. L'attività dei neuroni visivi è più lenta, di conseguenza quando arriva il secondo beep, l'area acustica dà un'influenza che è, questa volta, in grado di far risalire l'input visivo oltre la soglia di attivazione. In realtà questa è ancora troppo lieve per portare all'illusione visiva di un altro flash. Infatti se osserviamo la fig. 3.17, il secondo picco visivo è molto piccolo, sotto 0,2. Per risolvere casi ambigui, nel modello e in

questo lavoro abbiamo fissato una soglia minima che denota se l'attivazione neurale determina una percezione. Tale soglia è stata fissata arbitrariamente al valore 0,4, cioè l'attività neurale deve raggiungere almeno il 40% del suo valore massimo, perché ad essa corrisponda una percezione.

Vediamo che succede se si aumenta ancora  $\tau_v$ .

**$\tau_v=35$ ;**

**SOA=100 ms (condizione 1)**

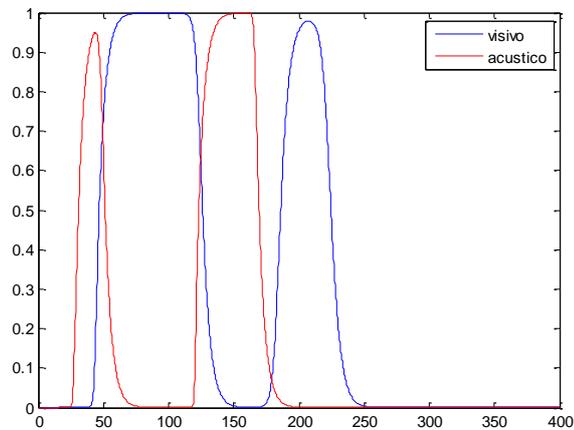


Fig. 3.21. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con  $\tau_v=35$

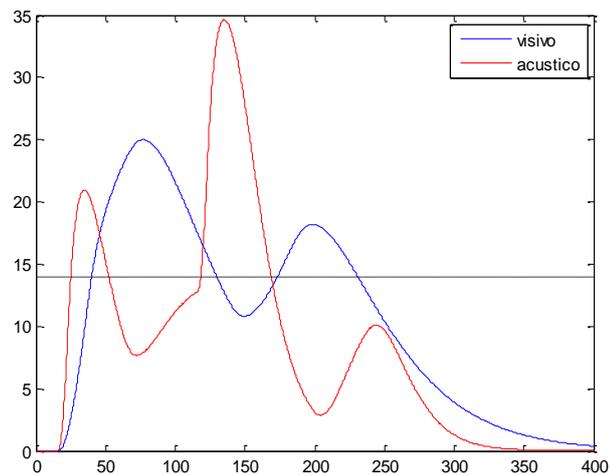


Fig. 3.22. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con  $\tau_v=35$

Aumentando ancora la costante di tempo della dinamica visiva, l'influenza del secondo beep è questa volta sufficiente a far risalire l'attività neurale visiva oltre la soglia e

portare così alla percezione illusoria. Quindi aumentando la costante  $\tau_v$  abbiamo ottenuto la simulazione del flash illusorio per un SOA pari a 100 ms.

$\tau_v=35$ ;

**SOA=150 ms (condizione 1)**

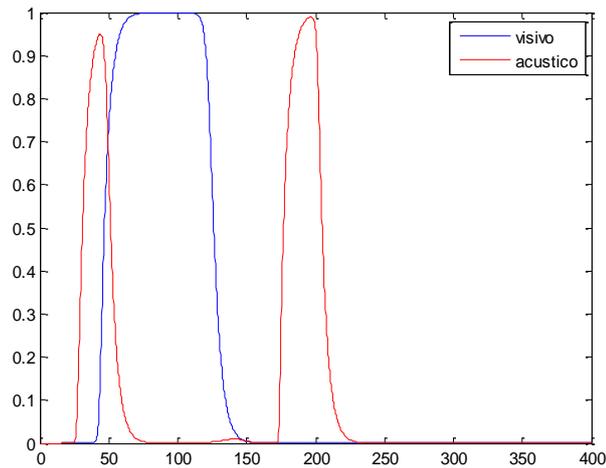


Fig. 3.23. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 150 ms con  $\tau_v=35$

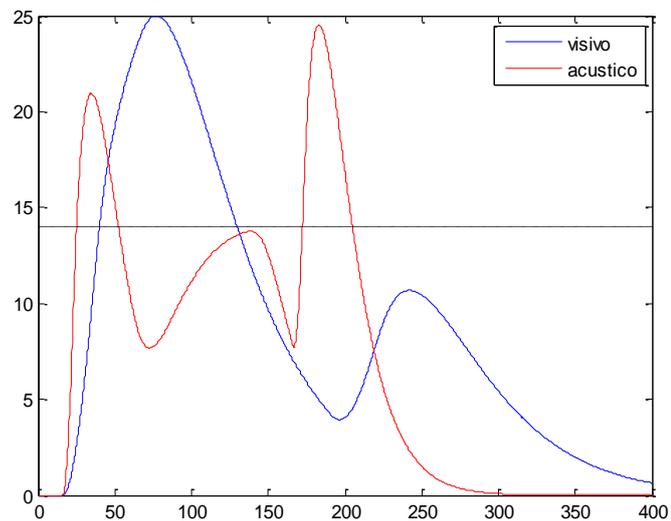


Fig. 3.24. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 150 ms con  $\tau_v=35$

Anche questa volta notiamo un primo picco nell'input totale che arriva all'area visiva dovuto allo stimolo esterno. Si osserva anche un secondo picco nell'input visivo dovuto

al secondo beep, ma tale input non supera la soglia di attivazione neurale, per cui non abbiamo illusione di un ulteriore flash dovuto al secondo beep. Quindi nonostante l'aumento della costante di tempo, il modello non riesce a replicare il fenomeno per un SOA pari a 150 ms. Perciò per ottenere il fenomeno anche per SOA ancora maggiori, si dovrà alzare ancora la costante gradualmente. Tuttavia è importante notare che valori maggiori della costante di tempo  $\tau_v$  favoriscono l'emergere del fenomeno illusorio per SOA elevati, ma nel contempo non permettono il verificarsi della percezione illusoria per stimoli con SOA piccolo (in tal caso si tende infatti a generare uno stimolo visivo prolungato). Una possibilità è quindi immaginare che il valore di  $\tau_v$  vari in un range di valori che tenga conto sia della variabilità inter-individuo sia della variabilità intra-individuo (dovuta ad esempio ad una “rumorosità” nei parametri neurali). Vediamo ora che succede se aumentiamo la costante di tempo acustica  $\tau_a$ .

**$\tau_a=20$ ;**

**SOA=100 ms (condizione 1)**

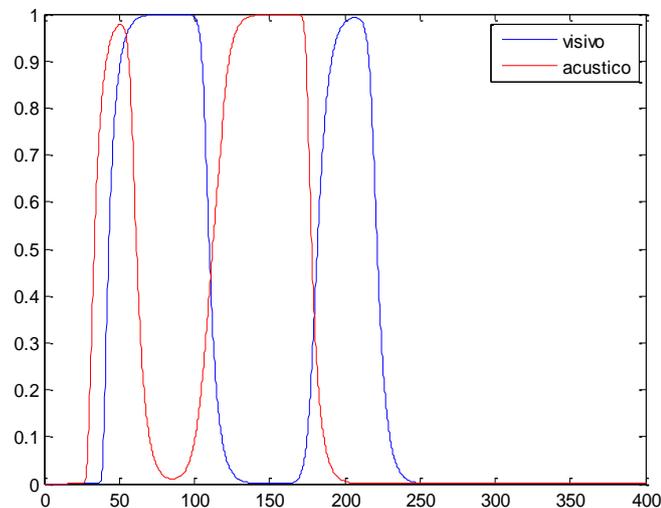


Fig. 3.25. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con  $\tau_a=20$

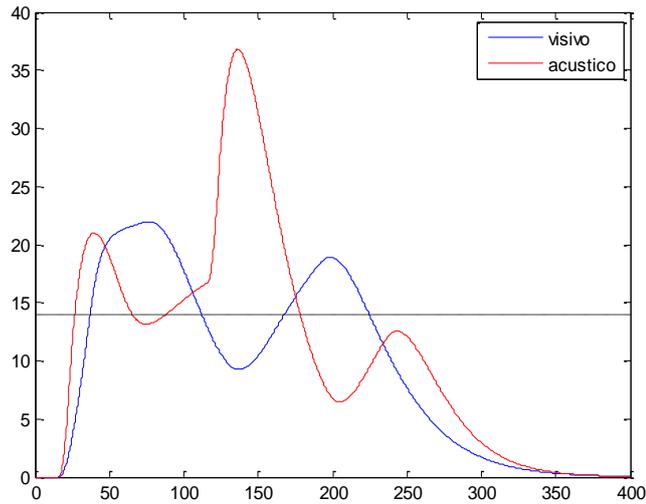
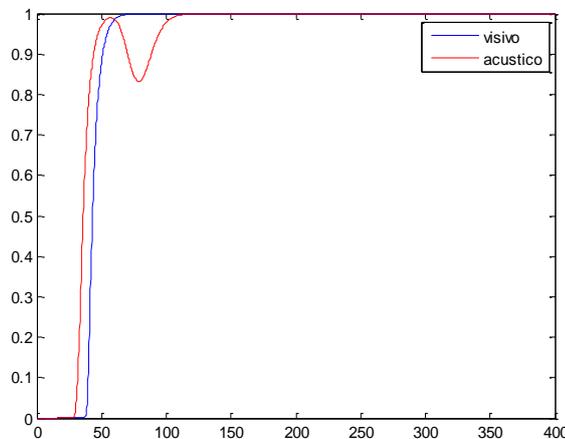


Fig. 3.26. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con  $\tau_a=20$

L'attività acustica è più elevata e ciò influenza più a lungo l'area visiva, di conseguenza il secondo beep riporta oltre la soglia l'attività visiva e si ha quindi il secondo picco che indica l'effetto illusorio del secondo flash. Tuttavia, per SOA maggiori questo incremento di  $\tau_a$  non è sufficiente poiché l'attività visiva andrà tanto in basso che l'attività acustica non riuscirà ad influenzarla abbastanza da farla andare sopra soglia. Vediamo quindi cosa succede se aumentiamo ancora la costante  $\tau_a$ .

**$\tau_a=25$ ;**

**SOA=100 ms (condizione 1)**



3.27. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 150 ms con  $\tau_a=25$

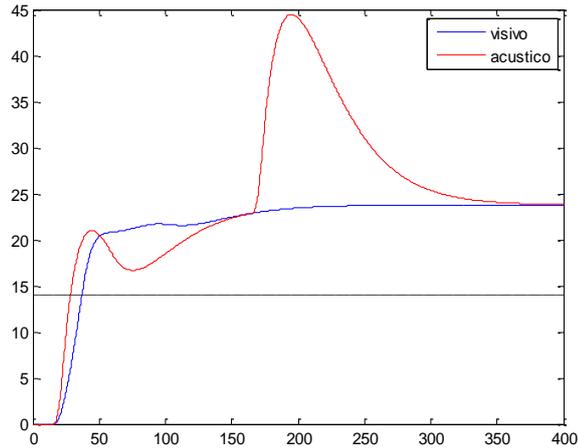


Fig. 3.28. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 150 ms con  $\tau_a=25$

Aumentando ancora la costante acustica notiamo un effetto finora mai incontrato. La costante di tempo dell'attività acustica è più lenta e questa con la sua azione impedisce di fatto all'attività visiva di diminuire, ma la eccita molto. Questo effetto già forte aumenta ancora di più quando arriva poi il secondo beep. Le due aree si influenzano a vicenda e l'attività dei neuroni va e rimane in saturazione.. Per cui alzare troppo la costante acustica non è una soluzione accettabile; il modello è molto sensibile a questo parametro.

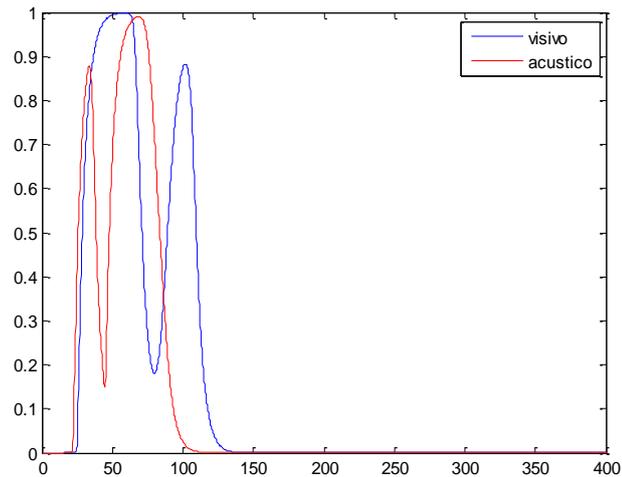
Per riuscire a simulare più casi quindi si è deciso di usare dei parametri che variassero in un certo range, con una distribuzione uniforme. In particolare uno di questi parametri è la costante di tempo visiva  $\tau_v$ , in quanto abbiamo visto come a seconda del suo valore consente l'occorrenza dell'illusione visiva per diversi SOA. La costante di tempo acustica  $\tau_a$  invece è stata mantenuta bassa e non variabile, in quanto valori più alti di  $\tau_a$  tendono a dare origine a fenomeni di attivazione duratura (come mostrato in figura 3.27) o fenomeni oscillatori (le attività nelle due aree oscillano tra 0 e il valore massimo, effetto qui non mostrato). Inoltre un valore di  $\tau_a$  sufficientemente basso, consente di ottenere la separazione dei due beep acustici ad SOA di 25 ms.

In questo caso, a seconda del valore di  $\tau_v$ , che veniva casualmente campionato dalla distribuzione uniforme, si è ottenuto che l'illusione visiva occorreva in pochi casi, in particolare per gli SOA più bassi della condizione 1, mentre non occorreva in nessun caso nella condizione 2. Il range all'interno del quale il parametro  $\tau_v$  è stato uniformemente campionato è tra 8 e 28. Inoltre per dare una maggiore variabilità alle simulazioni altri parametri che variavano in certo range sono stati:  $W$  (forza delle

connessioni sinaptiche),  $E_{0a}$  e  $E_{0v}$  (forza degli input esterni acustici e visivi). In particolare il range di variabilità per  $W$  era tra 0,4 e 0,6; per  $E_{0a}$  tra 3 e 3,5; per  $E_{0v}$  tra 1 e 2.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=10$ ;

**SOA=25 ms (condizione 1)**



3.29. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 1

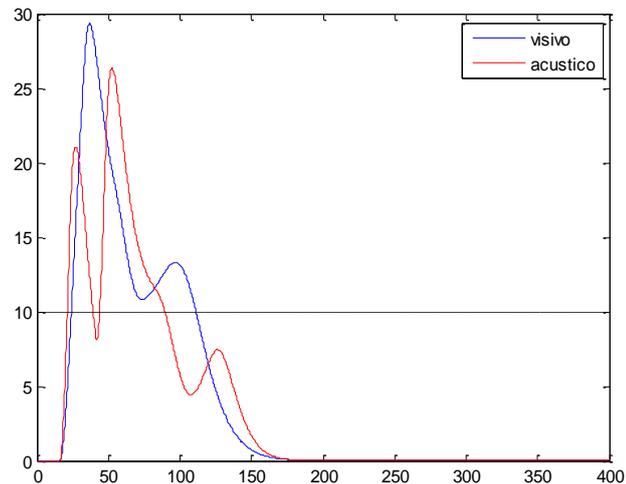


Fig. 3.30. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 25 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 1

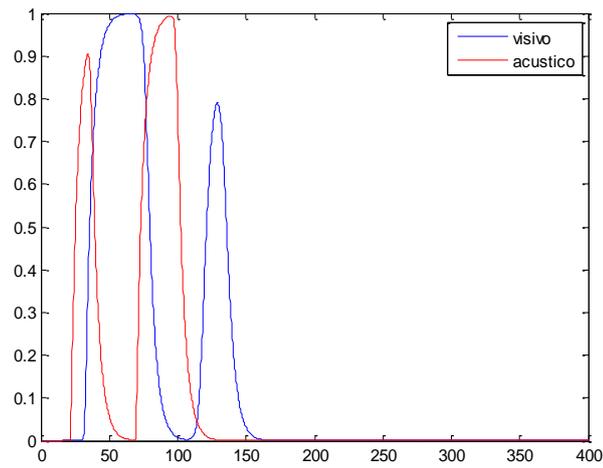
In questo caso notiamo come la costante di tempo acustica bassa consente la separazione dei due beep acustici, che quindi vengono percepiti separati, e l'influenza

del secondo beep è questa volta sufficiente a far risalire l'attività neurale visiva oltre la soglia e portare così alla percezione illusoria.

Vediamo per l'SOA di 50 ms con un altro valore random della costante visiva.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=16$ ;

**SOA=50 ms (condizione 1)**



3.31. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 1

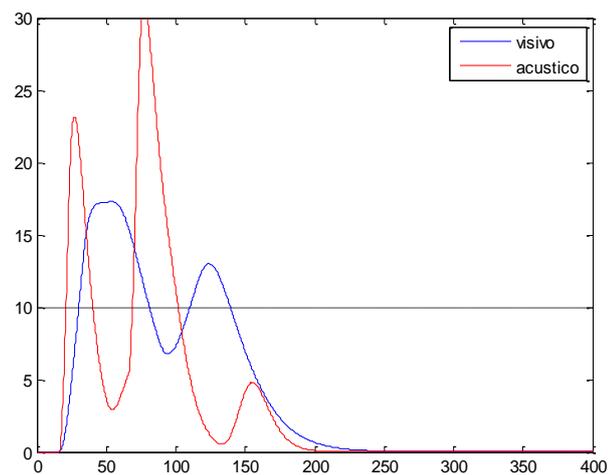
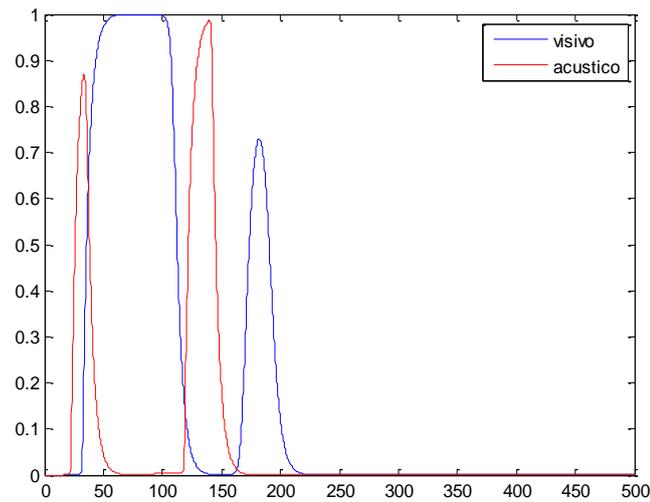


Fig. 3.32. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 1

Anche in questo caso i due beep acustici vengono percepiti ben separati, e l'influenza del secondo beep è tale da riuscire a far risalire l'attività neurale dell'area visiva oltre la soglia e portare così alla percezione illusoria di un secondo flash.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=25$ ;

**SOA=100 ms (condizione 1)**



3.33. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 1

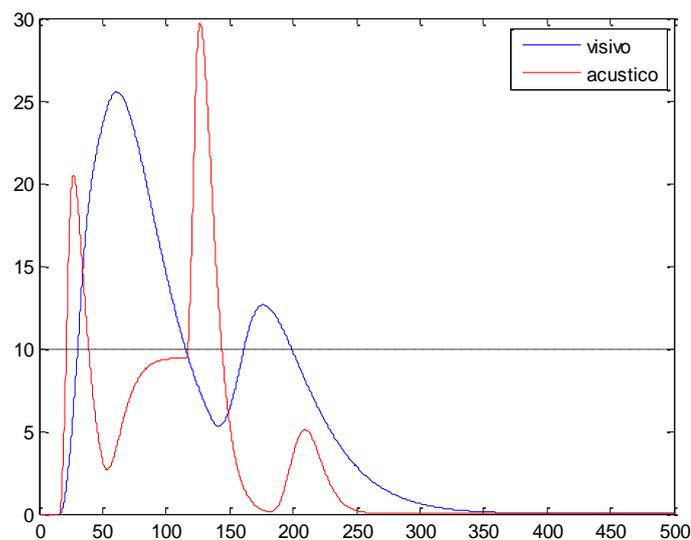


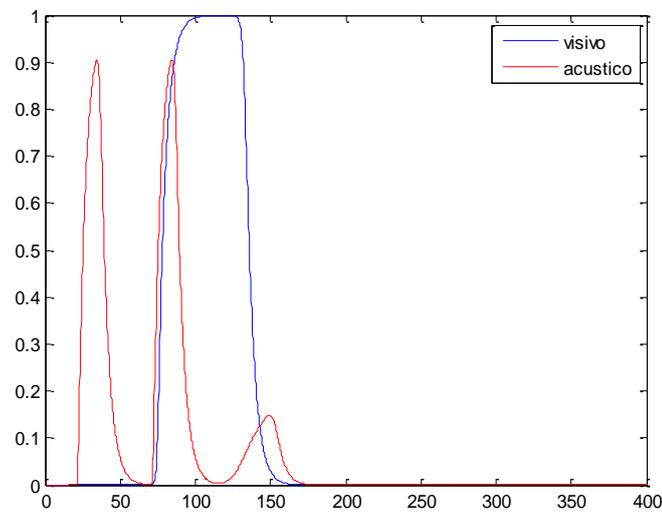
Fig. 3.34. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 1

Anche questa volta l'influenza del secondo beep è tale da riuscire a far risalire l'attività neurale dell'area visiva oltre la soglia, grazie anche alla costante di tempo visiva che fa diminuire lentamente la dinamica dovuta al flash dato.

Vediamo un esempio per la condizione 2.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=16$ ;

**SOA=50 ms (condizione 2)**



3.35. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 2

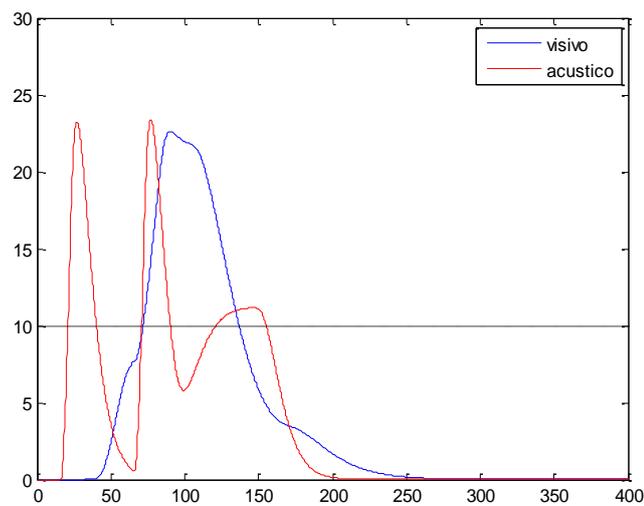


Fig. 3.36. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms con  $\tau_v$  variabile nella condizione 2

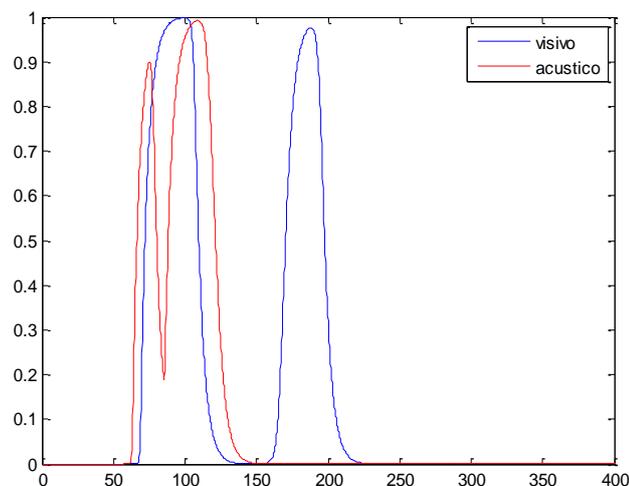
Qui il picco visivo è uno e causato dall'input visivo esterno. La prima attivazione acustica determina un leggero input non nullo all'area visiva, che si attiva prima dell'arrivo dello stimolo esterno, ma è insufficiente a dare un'attività tale da portare alla percezione del flash illusorio.

A questo punto si è deciso di agire su un altro parametro, il ritardo (*delay*) tra le due aree, cioè il tempo impiegato dall'informazione per andare da un'area all'altra attraverso le sinapsi inter-area (es. da quella visiva a quella acustica, lo abbiamo chiamato *DelVA*) e viceversa (da quella acustica a quella visiva, *DelAV*). Questo ritardo nel modello iniziale era stato supposto come parametro fisso ed uguale. In un primo tempo quindi l'idea è stata quella di variarlo in un range, ma risultati sono stati insoddisfacenti. Per cui il ritardo è stato supposto non solo variabile all'interno di un range, ma diverso da un'area all'altra, in particolare il ritardo dall'area acustica all'area visiva (*DelVA*) è stato scelto maggiore del ritardo dall'area visiva all'area acustica (*DelAV*). In questo caso sono stati ottenuti diversi casi di stimoli SOA in cui occorreva l'illusione del secondo flash, e in entrambe le condizioni. In queste simulazioni i parametri *DelAV* e *DelVA* sono stati uniformemente campionati negli intervalli 5-15 il primo, 45-120 il secondo.

Vediamo qualche esempio.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=14$ ;  $DelAV=12$ ;  $DelVA=72$ ;

**SOA=25 ms (condizione 1)**



3.37. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 1

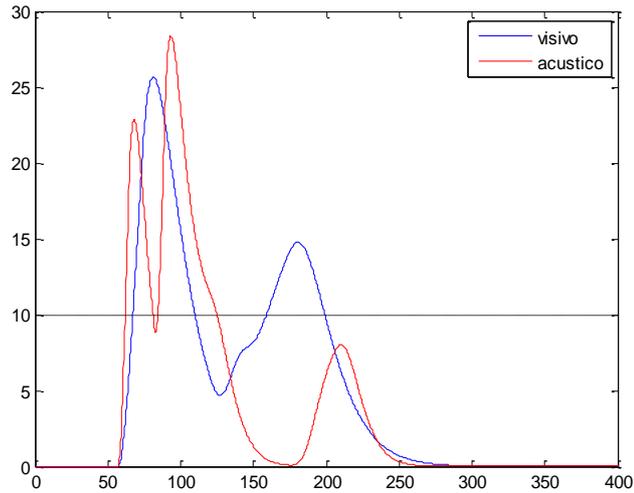
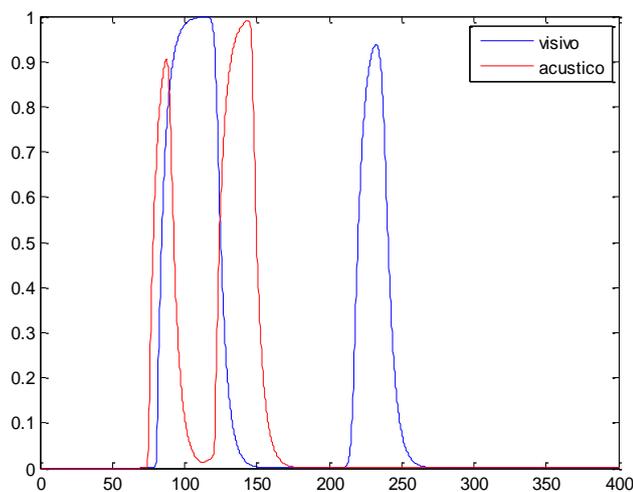


Fig. 3.38. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 25 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 1

In questo caso, SOA di 25 ms, i due picchi dei beep forniti sono molto vicini, ma comunque distinguibili e separati per via della costante di tempo acustica bassa, e in grado di influenzare l'area visiva che andando oltre soglia genera flash illusorio. Vediamo casi di SOA a 50 ms e 100 ms simulati sempre considerando parametri variabili.

**$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=15$ ; DelAV=9; DelVA=50;**  
**SOA=50 ms (condizione 1)**



3.39. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 1

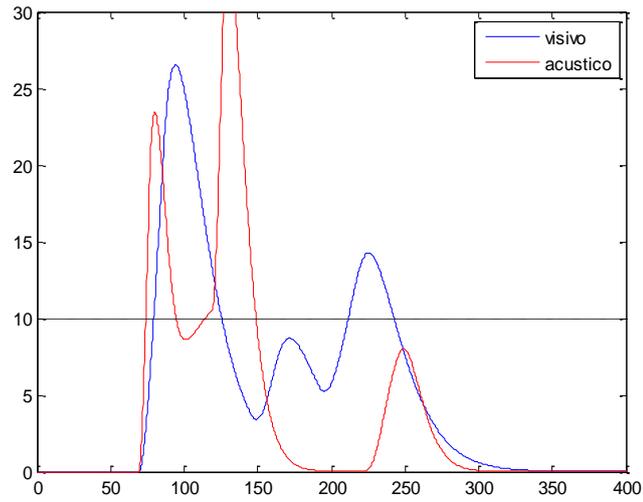
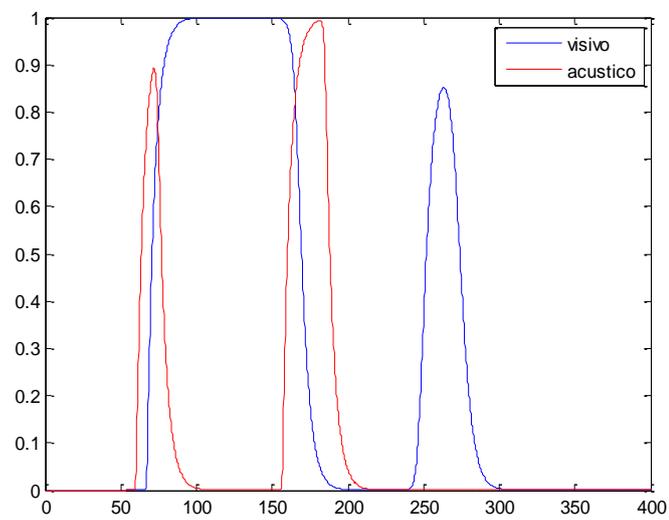


Fig. 3.40. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 1

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=25$ ; DelAV=10; DelVA=100;  
**SOA=100 ms (condizione 1)**



3.41. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 1

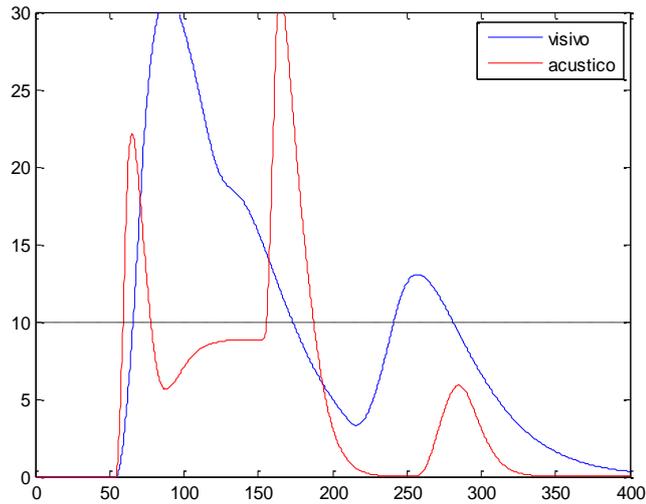


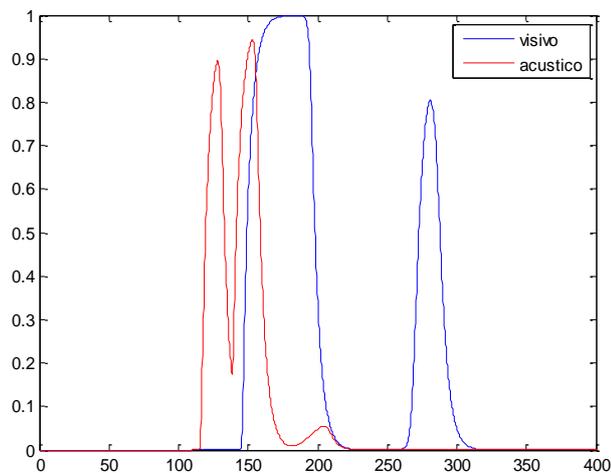
Fig. 3.42. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 1

Come si può notare subito in entrambi i casi abbiamo il secondo picco che denota l'occorrenza del secondo flash illusorio dovuto ai beep. Quindi con la generazione random dei parametri variabili, in particolare la costante di tempo visiva, il ritardo  $DelAV$  e il ritardo  $DelVA$ , riusciamo ad ottenere l'effetto Shams in più casi di stimoli SOA nella condizione 1.

Vediamo ora qualche esempio nella condizione 2.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=16$ ;  $DelAV=8$ ;  $DelVA=88$ ;

**SOA=25 ms (condizione 2)**



3.43. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 2

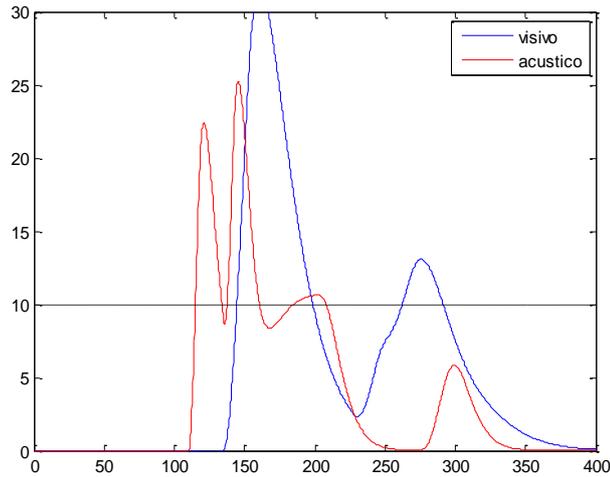
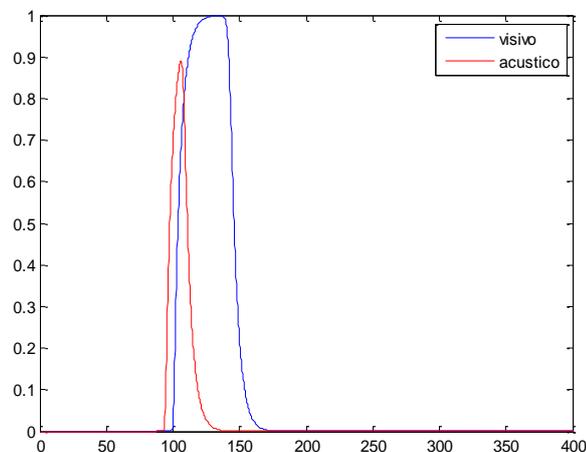


Fig. 3.44. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 25 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 2

Con una opportuna combinazione di valori per i parametri  $\tau_v$ ,  $DelAV$  e  $DelVA$  (campionati casualmente da distribuzioni uniformi) si riesce ad ottenere l'effetto Shams nella condizione 2, primo beep dato singolo, il flash dato invece in contemporanea al secondo beep. In questo caso notiamo bene il secondo picco visivo, l'attività acustica infatti influenza abbastanza l'area visiva da permettere all'attività visiva di andare nuovamente oltre la soglia. Possiamo sincerarci che l'effetto illusorio sia dovuto veramente ai 2 beep e che non si verifichi nel caso di un solo beep.

**$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=16$ ;  $DelAV=8$ ;  $DelVA=88$ ;**  
**SOA=0 (condizione di controllo, 1 flash 1 beep)**



3.45. Attività neuroni acustici e visivi nella condizione 1 flash 1 beep con parametri e ritardo variabili

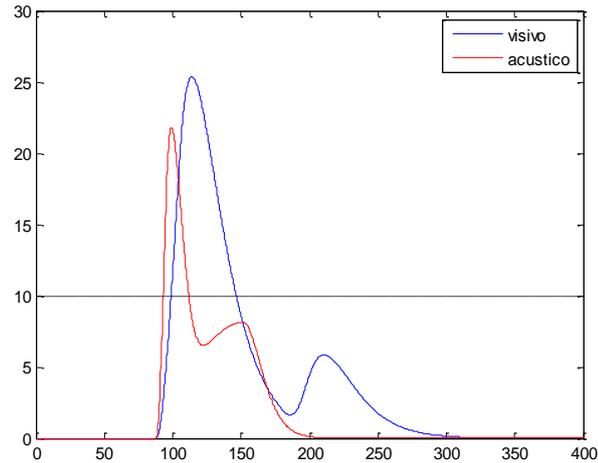


Fig. 3.46. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici nella condizione 1 flash 1 beep con parametri e ritardo variabili

Nella condizione di controllo (1 flash 1 beep) il secondo picco visivo non occorre, quindi l'effetto Shams è davvero dovuto al primo beep dato singolarmente prima.

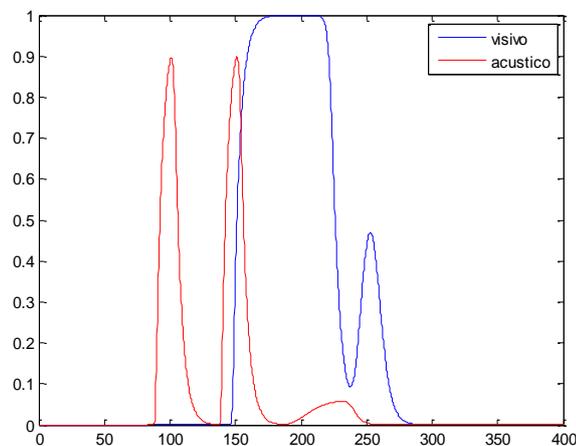
Si noti che, anche negli altri casi qui riportati di illusione del secondo flash, ci siamo sincerati che quei valori dei parametri non determinassero l'illusione in corrispondenza a un singolo flash e a un singolo beep.

Questi sono degli esempi positivi per far vedere che la scelta dei parametri variabili e dei ritardi variabili è servita a simulare l'effetto Shams, ma a volte nella generazione random dei parametri sono usciti valori che non portavano all'illusione visiva.

Vediamo ora per un SOA di 50.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=21$ ;  $DelAV=12$ ;  $DelVA=109$ ;

**SOA=50 ms (condizione 2)**



3.47. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 2

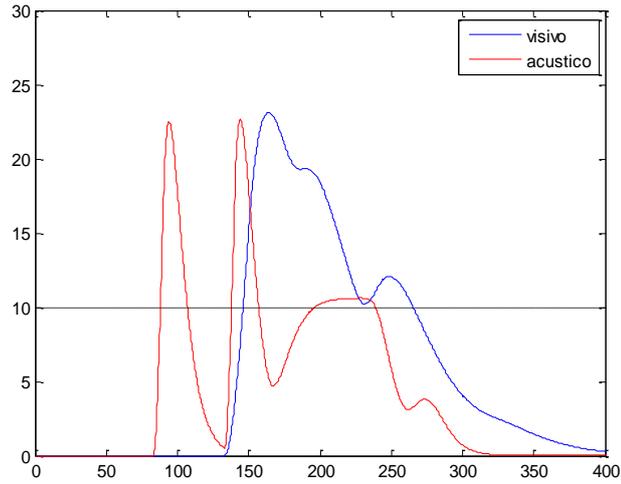
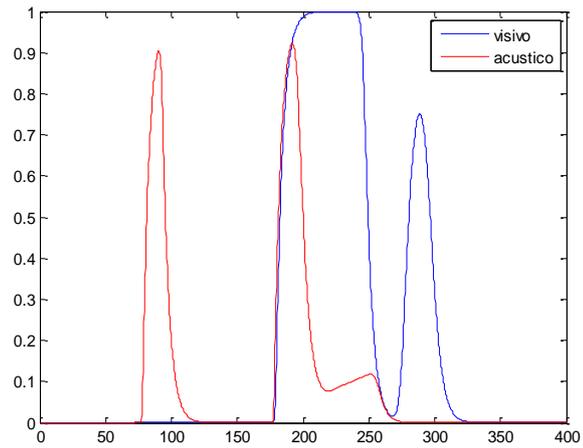


Fig. 3.48. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 2

E anche per un SOA di 100 ms.

$\tau_a=7$ ;  $\tau_v=20$ ;  $DelAV=12$ ;  $DelVA=95$

**SOA=100 ms (condizione 2)**



3.49. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 2

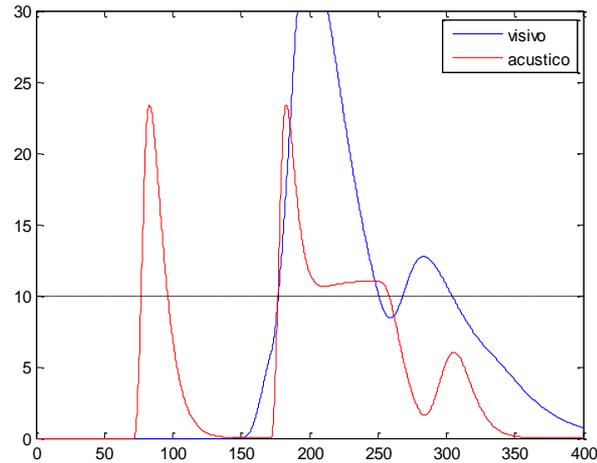


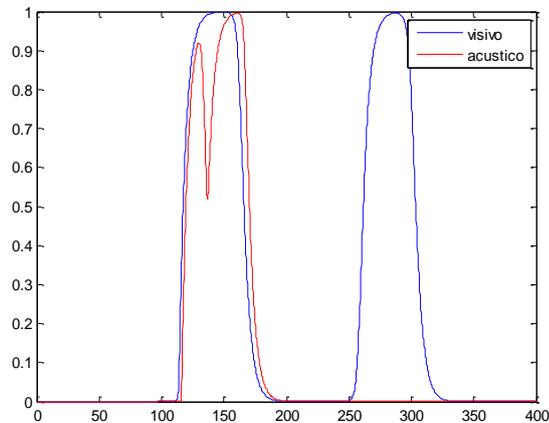
Fig. 3.50. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con parametri e ritardo variabili nella condizione 2

Anche in questi casi quindi la scelta di aver messo la costante di tempo visiva variabile e i ritardi variabili tra le due aree ci consente di simulare l'effetto Shams anche nel caso di stimoli ad SOA di 50 ms e 100 ms nella condizione 2.

Infine, abbiamo voluto analizzare l'effetto di introdurre delle latenze nella elaborazione dell'informazione acustica nell'area acustica: ovvero l'input subisce un ritardo puro prima di cominciare ad essere processato. Questa modifica è stata introdotta per cercare di simulare i risultati riportati da Foss-Feig [11] in base ai quali flash illusori erano percepiti (anche nei soggetti sani) anche per SOA maggiori a 100 ms, sebbene in percentuale bassa, nonché anche nel caso della situazione di controllo di un flash e un beep. Mentre tali risultati non erano ottenibili variando esclusivamente i parametri  $\tau_v$ ,  $DelAV$  e  $DelVA$ . Avendo simulato casi con due beep, i ritardi puri inseriti nel modello sono stati 2,  $DelA1$  la latenza di risposta dei neuroni acustici al primo beep,  $DelA2$  la latenza di risposta dei neuroni acustici al secondo beep. L'intervallo di variabilità scelto per questi due parametri è stato tra 5 e 15.

Quindi vediamo qualche esempio di diversi SOA nelle due condizioni con l'aggiunta di questi ritardi puri.

$\tau_v=23$ ;  $DelAV=10$ ;  $DelVA=63$ ;  $DelA1=10$ ;  $DelA2=5$ ;  
**SOA=25 ms (condizione 1)**



3.51. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 1

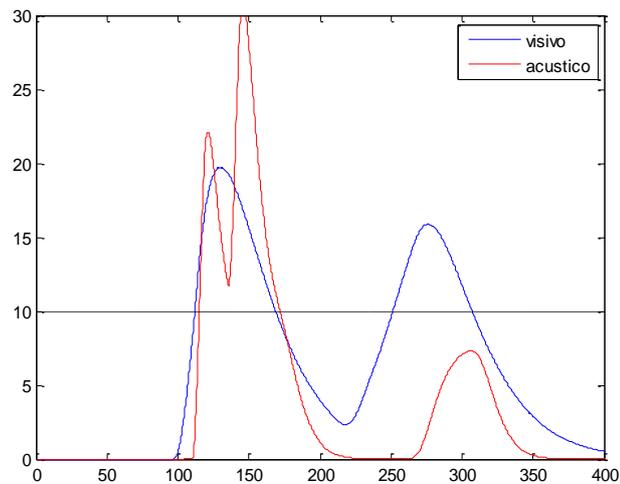
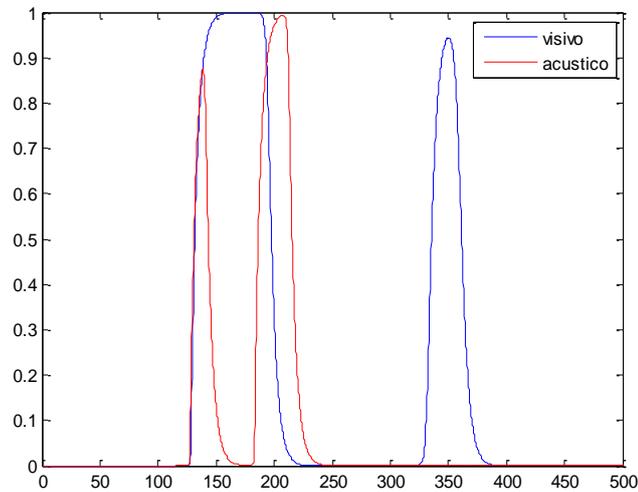


Fig. 3.52. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 25 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 1

Aggiungendo due ritardi pure sui neuroni acustici in questa condizione di SOA di 25 ms riusciamo a simulare l'effetto Shams. Il secondo picco acustico è in questo caso molto alto, risente dell'attività visiva causata dal primo flash. Di conseguenza agisce in maniera rilevante a sua volta sull'area visiva facendo salire sopra la soglia l'attività neurale visiva e portando al flash illusorio.

$\tau_v=22$ ; DelAV=5; DelVA=94; DelA1=14; DelA2=11;  
SOA=50 ms (condizione 1)



3.53. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 1

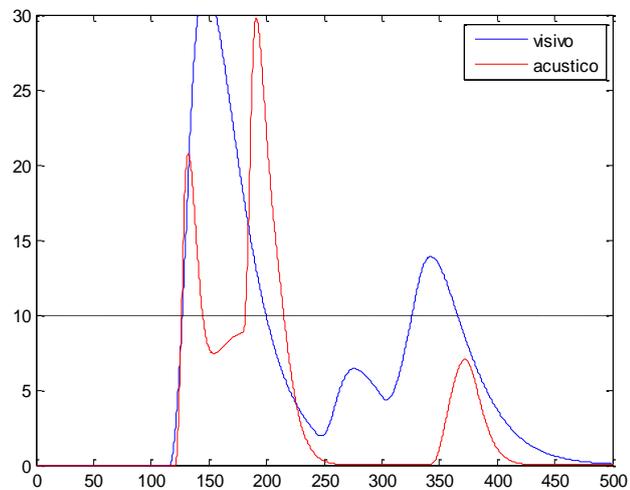
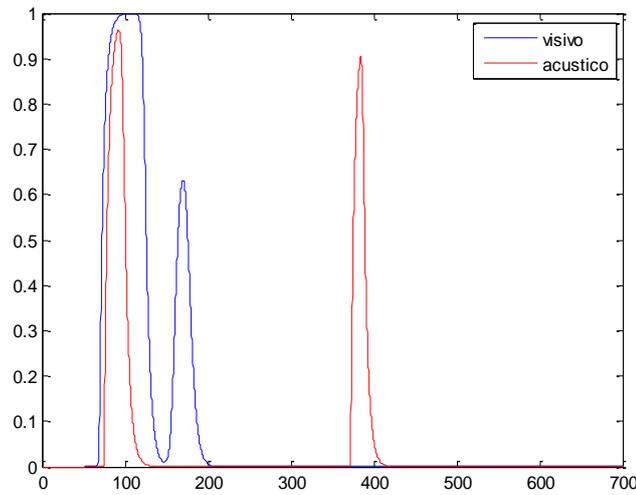


Fig. 3.54. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 1

Anche in questo caso (SOA di 50 ms) con questa impostazione dei parametri riusciamo a simulare l'effetto. L'attività acustica è forte (il secondo picco molto alto influenzato dal primo flash), di conseguenza influenza l'area visiva la cui attività va oltre la soglia di attivazione. Vediamo per SOA molto grandi.

$\tau_v=24$ ;  $DelAV=6$ ;  $DelVA=78$ ;  $DelA1=9$ ;  $DelA2=6$ ;

SOA=300 ms (condizione 1)



3.55. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 300 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 1

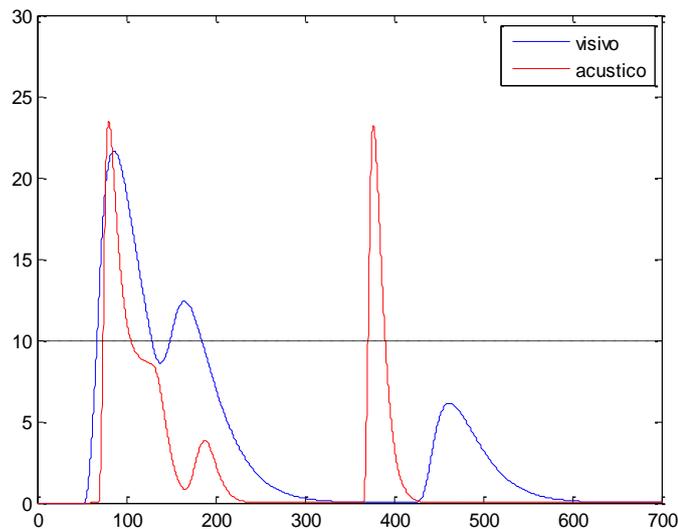


Fig. 3.56. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 300 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 1

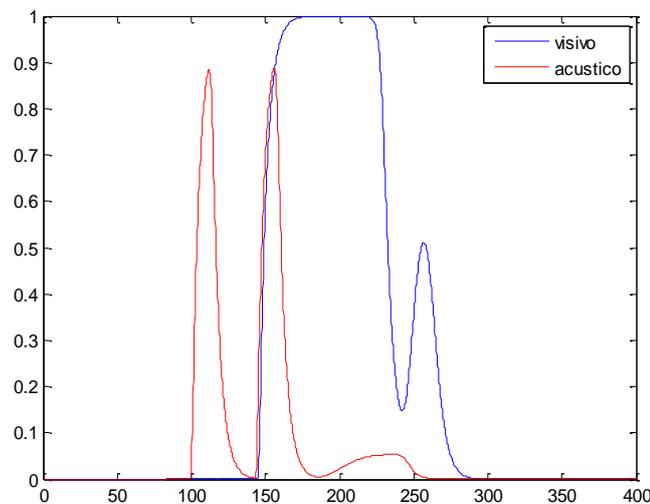
Come vediamo anche per un SOA molto grande, 300 ms, l'effetto illusorio si verifica. Tuttavia è importante notare che il flash illusorio non è dovuto al secondo beep, infatti notiamo che l'influenza causata da quest'ultimo c'è, ma non abbastanza forte da portare l'attività visiva oltre soglia. L'illusione è causata quindi dal primo beep. Ma ciò è in

linea con lo studio di Foss-Feig, secondo il quale l'occorrenza dell'illusione per SOA molto grandi è simile all'occorrenza dell'illusione nella modalità di controllo, quando viene fornito un singolo flash accompagnato da un singolo beep [11].

Quindi con lo stesso set di parametri, di cui alcuni variabili come la costante di tempo visiva, i ritardi tra le aree (in particolare con  $DelVA > DelAV$ ), i ritardi puri sull'area acustica possiamo ottenere potenzialmente l'effetto Shams a tutti gli SOA esaminati nella condizione 1 (sebbene, per valori elevati di SOA al di sopra di 150 ms, l'effetto Shams non sia conseguente al secondo beep ma sia un effetto "spurio" della presentazione di un singolo flash e di un singolo beep)

Vediamo ora nella condizione 2.

**$\tau_v=16$ ;  $DelAV=8$ ;  $DelVA=57$ ;  $DelA1=10$ ;  $DelA2=18$ ;  
SOA=50 ms (condizione 2)**



3.57. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

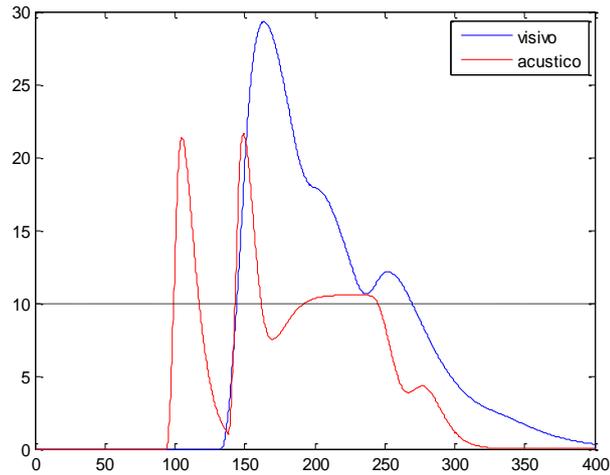
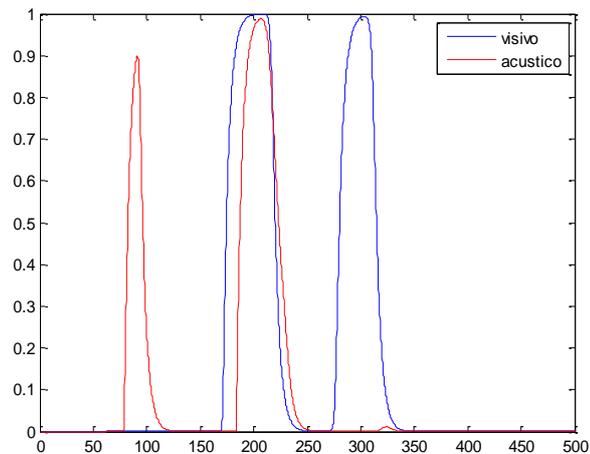


Fig. 3.58. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 50 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

In questo esempio per un SOA di 50 ms, il modello riesce a simulare il secondo flash illusorio usando il set di parametri variabili e i ritardi puri nell'area acustica, i due picchi acustici attivano molto l'area visiva e provocano l'attivazione neurale che porta alla percezione di un secondo flash.

**$\tau_v=16$ ; DelAV=11; DelVA=50; DelA1=16; DelA2=7;**  
**SOA=100 ms (condizione 2)**



3.59. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

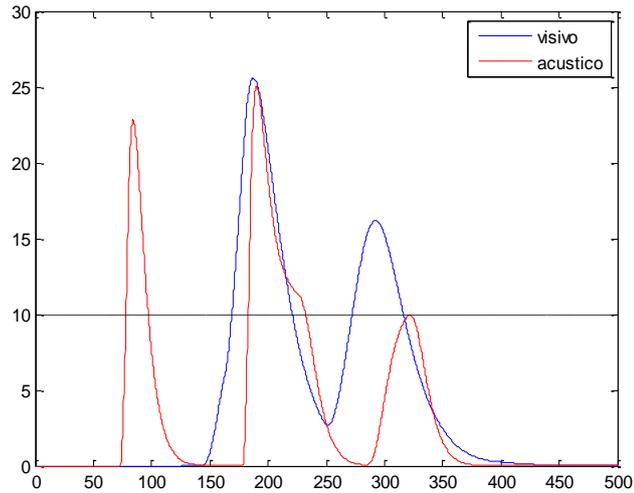
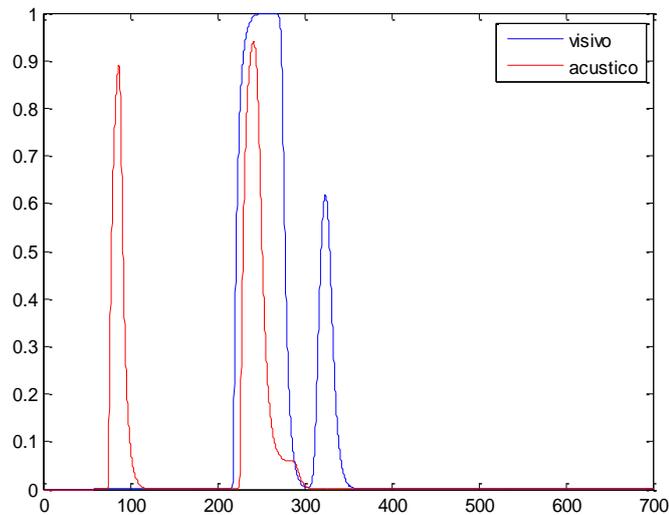


Fig. 3.60. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 100 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

Anche in queste ultime figure, che riguardano il caso di SOA di 100 ms, si nota come il modello riesca a simulare l'illusione. La risposta all'input visivo esterno fornito è resa più forte dal primo beep (la risposta visiva comincia prima che arriva il flash esterno), influenza a sua volta l'attività dell'area acustica che ancora a sua volta agirà sull'area visiva portando all'illusione.

**$\tau_v=18$ ;  $DelAV=14$ ;  $DelVA=88$ ;  $DelA1=12$ ;  $DelA2=9$ ;  
**SOA=150 ms (condizione 2)****



3.61. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 150 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

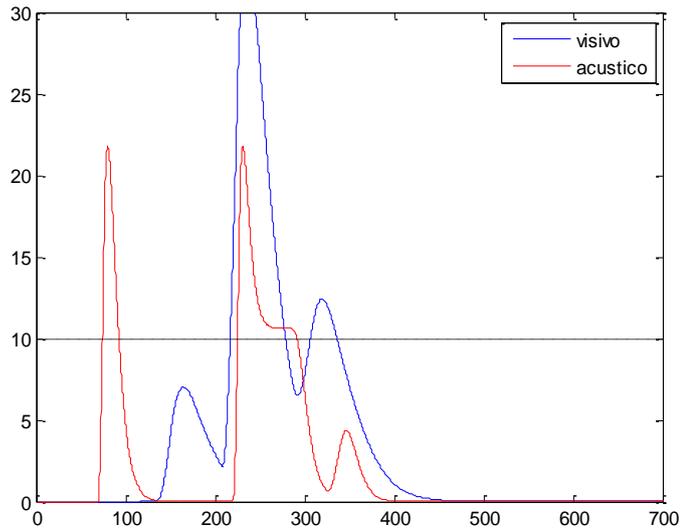
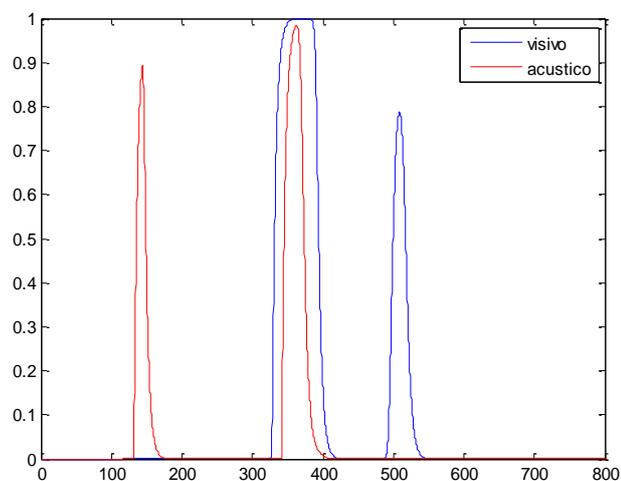


Fig. 3.62. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 150 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

Anche in quest'ultimo esempio, il modello riesce a simulare l'illusione visiva. Il primo beep attiva già l'area visiva la cui attività cresce, rispondendo quindi già da attiva e non da una condizione di riposo all'input visivo esterno. L'influenza poi del secondo beep fa risalire l'attività dei neuroni visivi causando l'illusione.

**$\tau_v=22$ ; DelAV=5; DelVA=108; DelA1=9; DelA2=12;**  
**SOA=200 ms (condizione 2)**



3.63. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 200 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

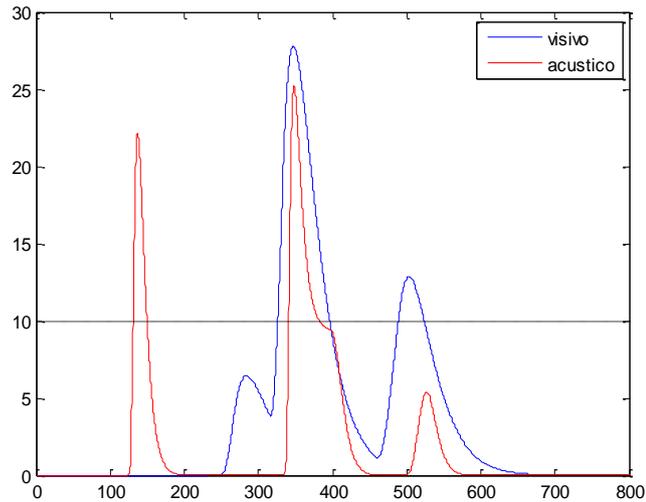


Fig. 3.64. Dinamica totale input dei neuroni target visivi e acustici ad un SOA di 200 ms con parametri e ritardo tra le aree variabile e ritardi puri sui neuroni acustici nella condizione 2

Anche in quest'ultimo esempio, il caso di uno degli SOA maggiori, 200 ms, il modello riesce a simulare l'illusione visiva. Il primo beep notiamo attiva già l'area visiva, che poi risponde all'input visivo esterno. L'influenza poi del secondo beep fa risalire l'attività dei neuroni visivi causando l'illusione.

Quindi siamo partiti da un set di parametri fissi di base per il modello che ci dava il fenomeno illusorio in solo un caso specifico, e siamo arrivati ad un altro set in cui variano alcuni parametri (quali la costante di tempo visiva, i ritardi tra le aree, i ritardi puri nell'area acustica) che potenzialmente può darci il fenomeno in più casi, in diversi stimoli SOA, e in entrambe le condizioni sperimentali che ci interessano. Essendo il set variabile, altre volte i parametri random ottenuti non sono stati tali da ottenere la simulazione dell'illusione del secondo flash, per questo come vedremo nel prossimo capitolo sono state fatte più prove e un certo numero di simulazioni.

## Capitolo Quarto

### *Risultati: simulazione del fenomeno illusorio (flash illusion) in soggetti sani e in soggetti autistici*

#### 4.1 SIMULAZIONI SOGGETTI SANI

Nel capitolo precedente è stato mostrato come attraverso un'analisi di sensitività del modello per i diversi valori di SOA di nostro interesse, si è arrivati alla scelta e all'impostazione di un certo set di parametri:  $W=0,4-0,6$ ;  $E_{0a}=3-3,5$ ;  $E_{0v}=1-2$ ;  $\theta=12$ ;  $\tau_a=7$ ;  $\tau_v=8-28$ ;  $DelAV=5-15$ ;  $DelVA=45-120$ ;  $DelA1=5-20$ ;  $DelA2=5-20$ . Gli altri valori sono stati tenuti ai valori di base visibili nella tabella 2.1.

Come abbiamo detto, il modello iniziale era ottimizzato per simulare l'effetto Shams con un SOA tra il primo e il secondo beep pari a 56 ms e con il primo beep e il flash presentati contemporaneamente. Il nostro obiettivo invece è stato simulare l'effetto Shams per diversi valori di SOA: 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 ms e in due condizioni diverse di stimolazione (il beep singolo precede o segue la coppia beep + flash).

Inoltre, ci poniamo l'obiettivo di simulare la *sound-induced flash illusion* non solo per una popolazione di soggetti sani, ma anche per una popolazione di soggetti autistici: in particolare, vogliamo verificare se differenze nel set di parametri del modello sono in grado di spiegare la più ampia finestra temporale di integrazione multisensoriale (cioè di occorrenza dell'illusione) nei soggetti autistici rispetto ai sani.

Avendo usato un set di parametri che variano uniformemente all'interno di un range di valori, sono state fatte più prove di simulazione per verificare l'occorrenza dell'illusione visiva ai diversi SOA, al fine poi di ricavare un valore medio e una deviazione standard relativi alla occorrenza percentuale del fenomeno ad ogni SOA. In particolare sono stati simulati 10 ipotetici soggetti e per ogni soggetto sono state ripetute 10 simulazioni ad ogni SOA. Ad ogni simulazione, i valori dei parametri sono stati campionati a caso da una distribuzione uniforme.

A questo punto per ogni SOA sono stati analizzati i dieci grafici che mostravano l'attivazione neurale delle aree visive ed acustiche di ogni singolo "soggetto", per

vedere laddove si verificasse l'effetto illusorio del secondo flash; in questo modo si è ottenuto, per ogni ipotetico soggetto e per ogni SOA la percentuale di occorrenza dell'illusione. Così facendo, per ogni SOA si ottengono 10 valori di percentuale di occorrenza dell'illusione.

Di questi valori è stato trovato poi il valore medio (che indica la percentuale media in cui si è verificato l'effetto Shams per ogni SOA) e la deviazione standard. E' stato quindi calcolato l'*errore standard della media* (SEM, *standard error of the mean*), che misura la deviazione standard della media campionaria. Alla fine quindi si è ottenuto un grafico che riporta sulle ascisse i valori dei vari SOA e sulle ordinate il valore medio della percentuale di occorrenza dell'illusione per ogni SOA d'interesse.

Oltre a queste prove, sono state fatte delle simulazioni per testare il modello nella condizione di controllo, ovvero quella in cui venivano dati solo un flash e un beep insieme, al fine di verificare per quali valori di SOA, la condizione di un flash più due beep si differenziasse dalla condizione un flash più un beep (cioè per verificare in quale condizione di SOA, l'illusione fosse una conseguenza genuina del secondo beep e non un fenomeno spurio dovuto esclusivamente alla presentazione di un flash simultaneo a un beep). In particolare sono state fatte anche in questo caso dieci prove, in cui in ognuna si ripetevano quaranta simulazioni con valori random dei parametri variabili. Come nel caso precedente anche qui sono stati analizzati i grafici dell'attivazione neurale per verificare l'occorrenza dell'illusione. Una volta ottenuti i dieci valori indicanti la percentuale media dell'occorrenza del secondo flash per ognuna delle dieci prove, se ne è calcolato il valore medio e il SEM.

Di seguito vengono mostrati quindi i risultati delle prove, effettuate in diverse configurazioni del modello considerato, corrispondenti a diversi set di valori dei parametri.

a) **Modello in condizioni di base con parametri fissi** ( $\tau_a=15$ ;  $\tau_v=25$ ;  $DelAV=DelVA=16$ ). Le prime prove sono state fatte per verificare cosa otteniamo con i dati iniziali di base del modello da cui siamo partiti.

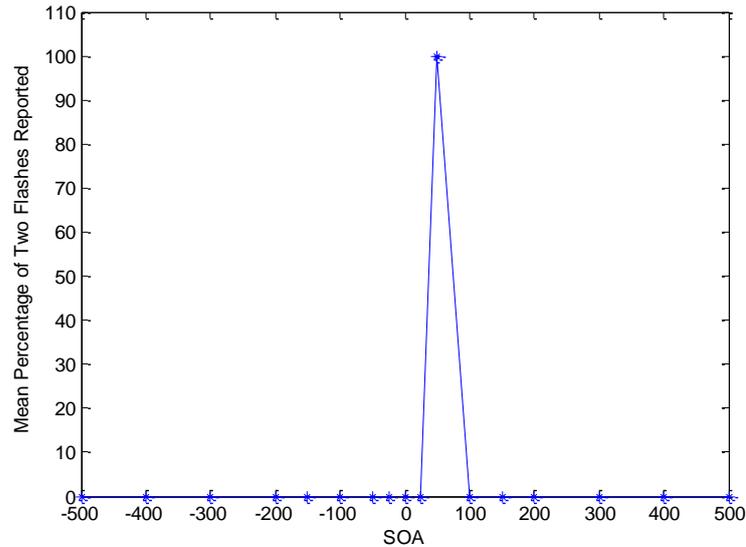


Fig. 4.1. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali coi parametri basali

Nel grafico 4.1 è riportata l'occorrenza o meno del flash illusorio per ogni SOA. La parte positiva delle ascisse indica gli stimoli SOA nella condizione 1, coppia beep-flash seguita da un altro beep, la parte negativa indica gli stimoli SOA nella condizione 2, beep singolo seguito da coppia beep-flash. Lo zero invece indica la condizione di controllo, un beep e un flash forniti insieme.

In questa serie di prove essendo i parametri fissi e non variabili, è stata fatta una simulazione per ogni SOA. Come ci aspettavamo, il modello riesce a simulare l'effetto Shams solo per lo stimolo SOA di 50 ms nella condizione 1, in tutti gli altri casi l'occorrenza dell'illusione visiva è nulla.

Da questo punto in poi nelle simulazioni abbiamo sempre messo variabili i seguenti parametri di base:  $W=0,4-0,6$ ;  $E_{0a}=3-3,5$ ;  $E_{0v}=1-2$ ; inoltre è stata abbassata la costante  $\tau_a$  da 15 a 7.

b) **Modello con  $\tau_v$  variabile** ( $\tau_v=8-28$ ;  $DelAV=DelVA=16$ ).

Vediamo ora che succede usando un range variabile per la costante di tempo visiva, mantenendo ai valori base gli altri parametri. In questo caso quindi sono state fatte più prove secondo il criterio spiegato prima.

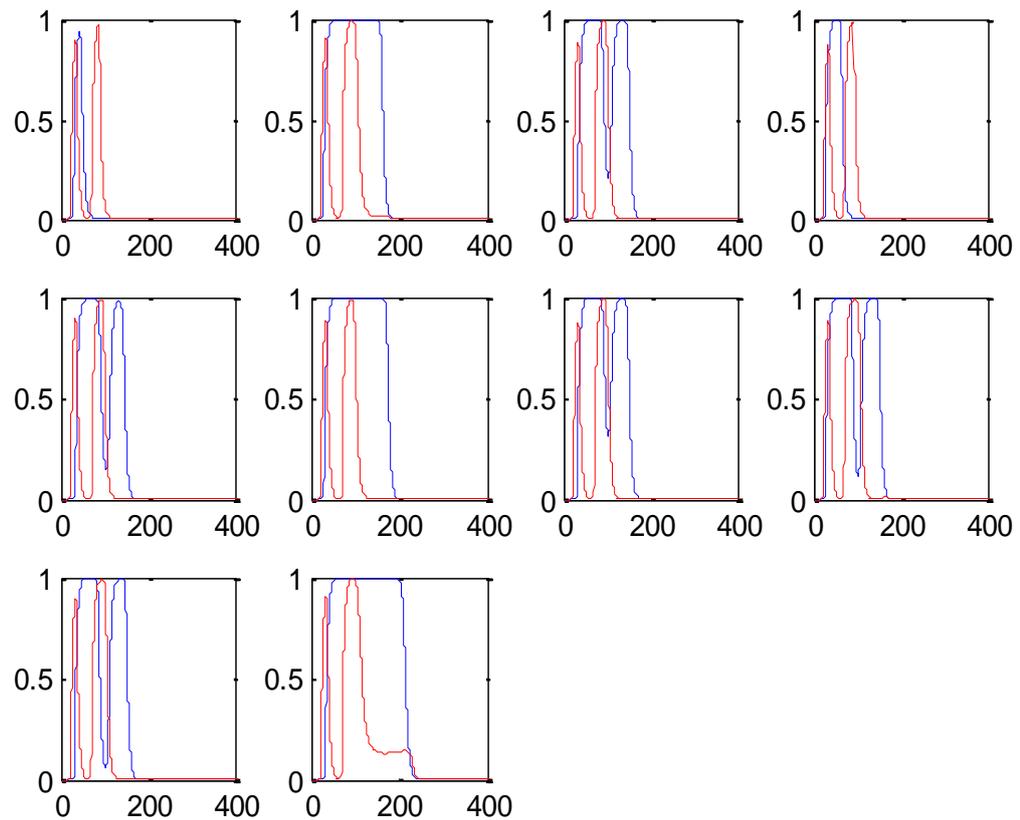


Fig. 4.2. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 1 di dieci soggetti

Nella figura precedente è riportato un esempio dei grafici che mostrano le attività dei neuroni acustici e visivi ad uno stimolo SOA di 50 ms nella condizione 1 di dieci soggetti. Come vediamo in cinque casi (3, 5, 7, 8, 9) l'illusione visiva avviene, c'è un secondo picco visivo, le altre volte abbiamo un picco visivo solo.

Quindi in questo caso nel 50% dei casi abbiamo l'occorrenza dell'effetto Shams. E' una differenza rispetto al primo caso, visto che coi parametri del modello fisso, per un SOA di 50 ms l'illusione occorre sempre.

Vediamo un esempio nel caso di un SOA di 100 ms.

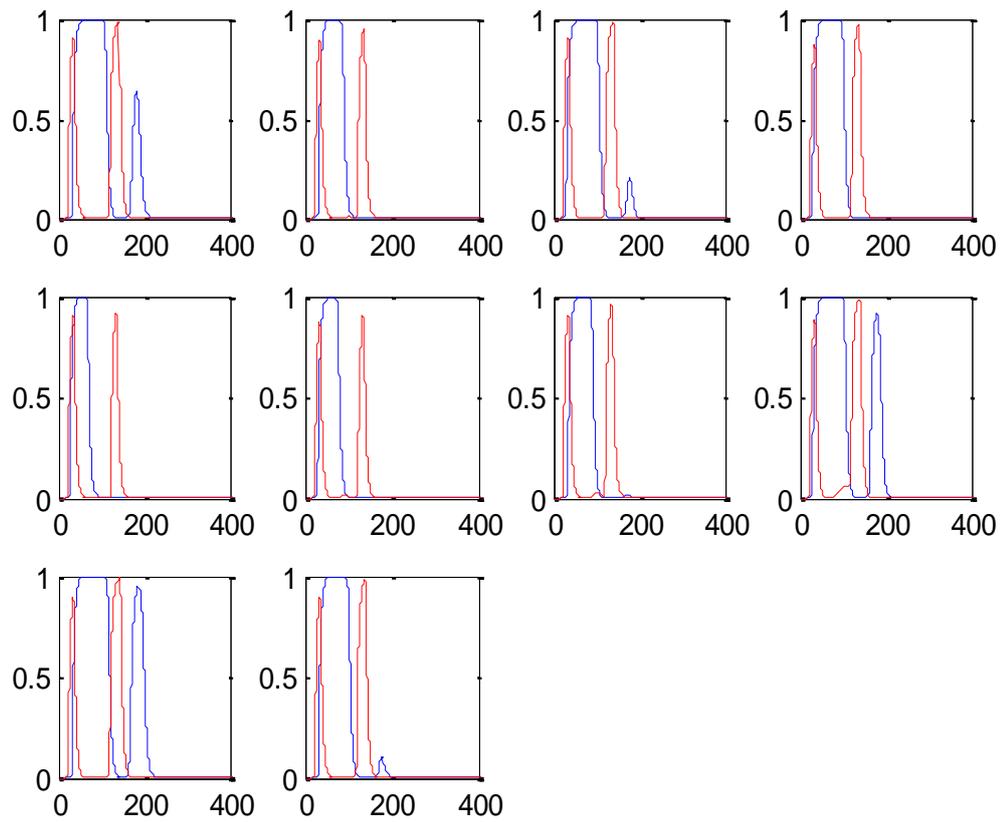


Fig. 4.3. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms nella condizione 1 di dieci soggetti

In questo caso l'effetto illusorio avviene tre volte (1, 8, 9), quindi con una percentuale media del 30%. Quindi con la costante di tempo visiva variabile abbiamo il risultato di ottenere potenzialmente l'illusione in più casi, rispetto all'uso dei parametri di base. Vediamo due esempi nella condizione 2.

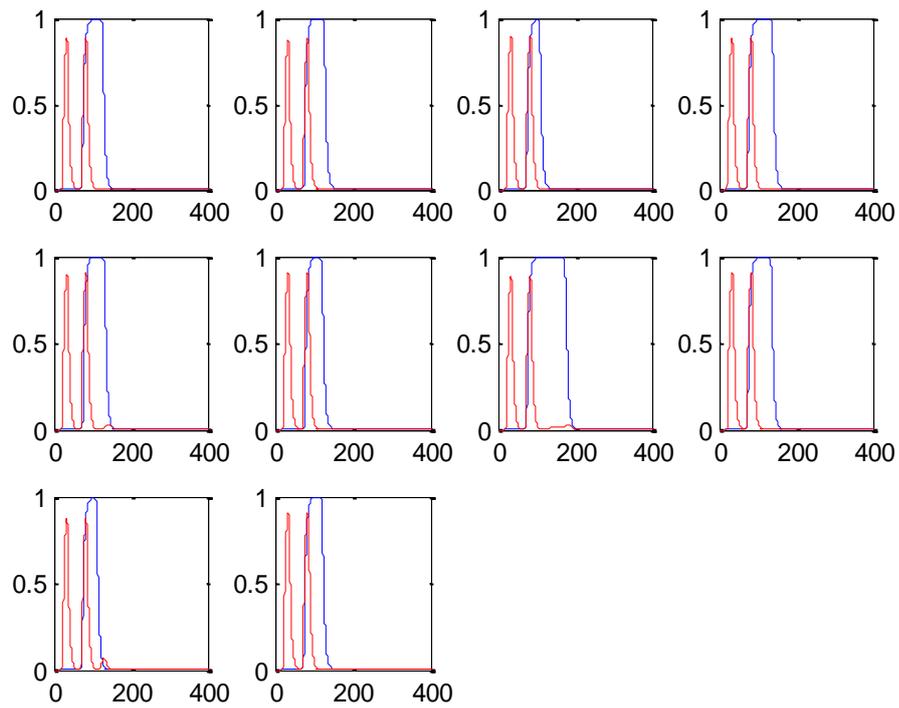


Fig. 4.4. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 2 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile

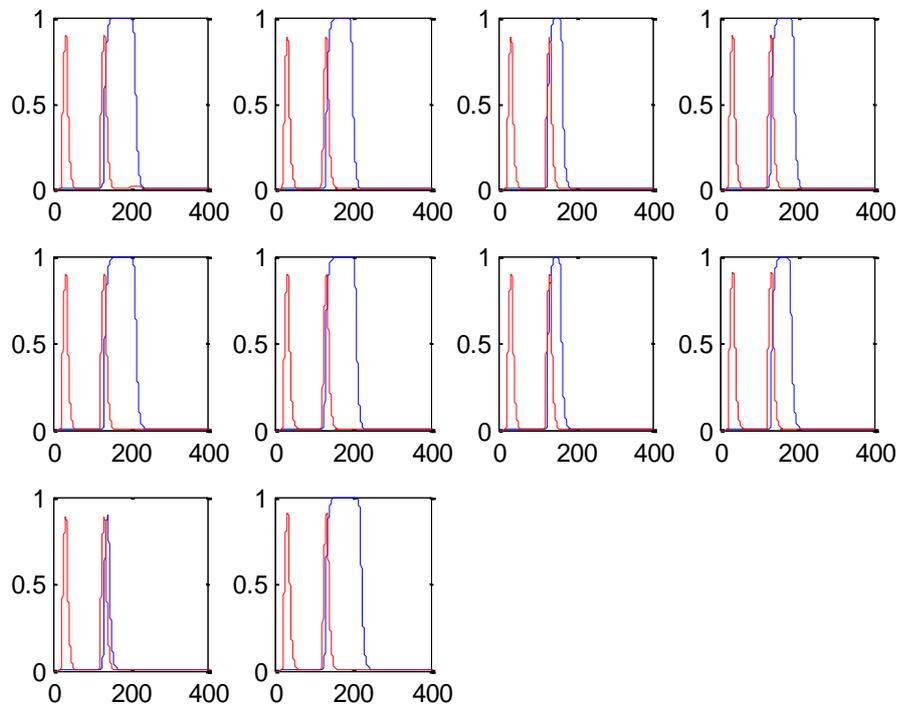


Fig. 4.5. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms nella condizione 2 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile

Nelle figure precedenti sono mostrate le attività dei neuroni per stimoli SOA di 50 e 100 ms nella condizione 2. In nessun caso occorre l'illusione, abbiamo solo un picco visivo dovuto all'input esterno fornito. Quindi come con i parametri basali del modello, anche usando un range variabile per la costante di tempo visiva  $\tau_v$  non otteniamo l'illusione in nessun caso nella condizione 2.

Vediamo ora il grafico finale trovato.

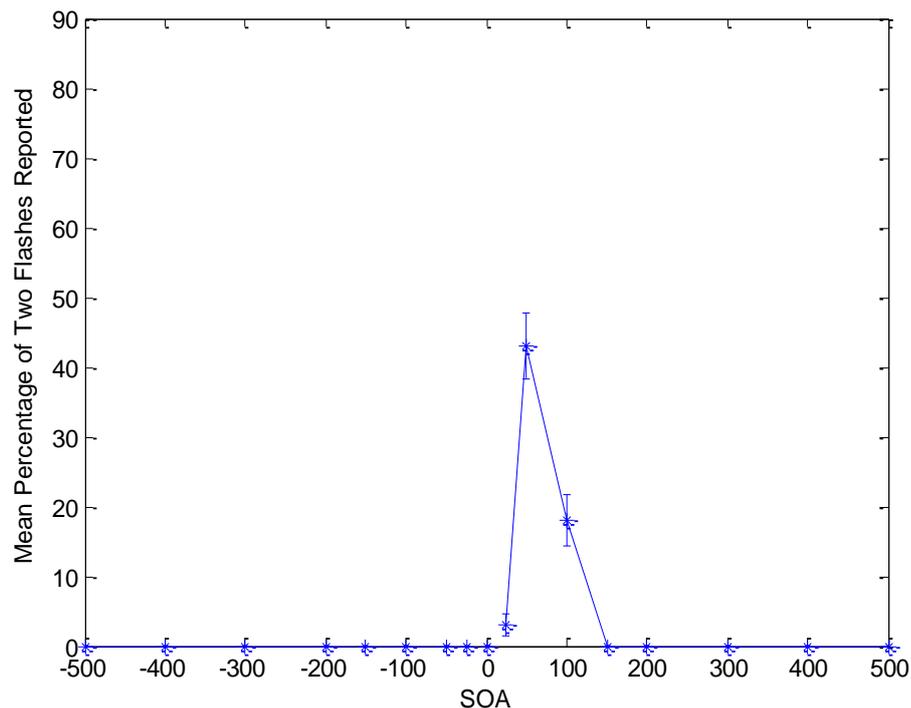


Fig. 4.6. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali con  $\tau_v$  variabile

Rispetto al risultato precedente (fig. 4.1) abbiamo ottenuto l'illusione visiva non solo per un SOA=50 ms, ma anche per un SOA di 25 ms (seppure con una percentuale bassa), e per un SOA di 100 ms. In tutti gli altri casi però non si ottiene mai. Neanche nella condizione di controllo, un flash e un beep, abbiamo mai l'effetto.

c) **Modello con  $\tau_v$  e Delay variabile** ( $\tau_v=8-28$ ;  $DelAV=8-20$ ;  $DelVA=8-20$ ).

A questo punto introduciamo anche la variabilità per i ritardi tra le aree, prima immaginando il range variabile uguale per i due ritardi,  $DelAV$  e  $DelVA$ . Vediamo cosa otteniamo.

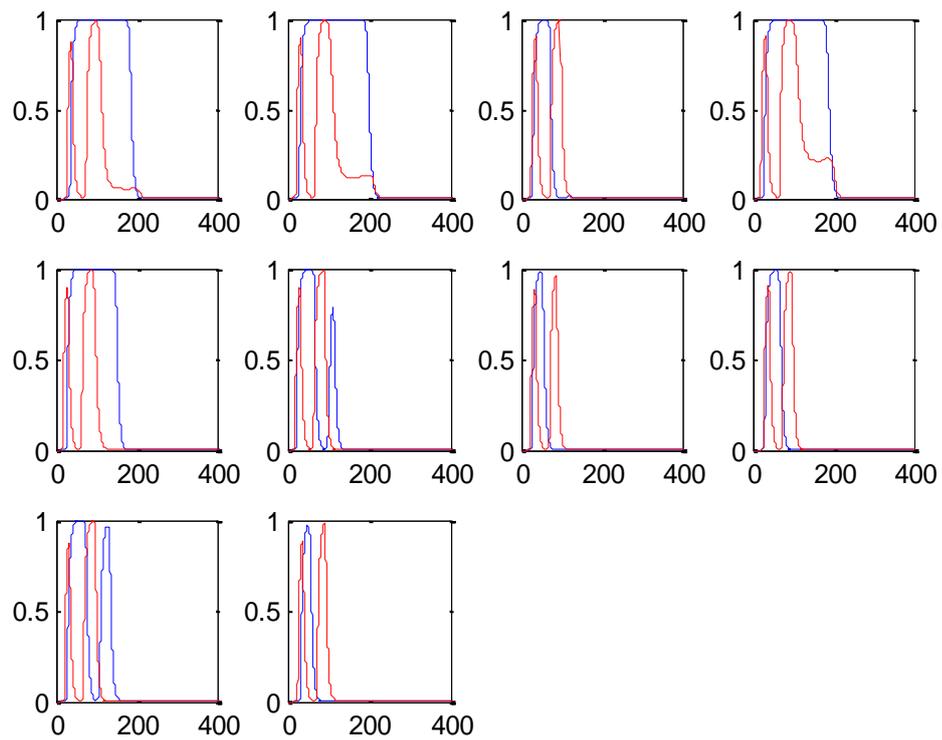


Fig. 4.7. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile e ritardi tra le aree variabili nello stesso range

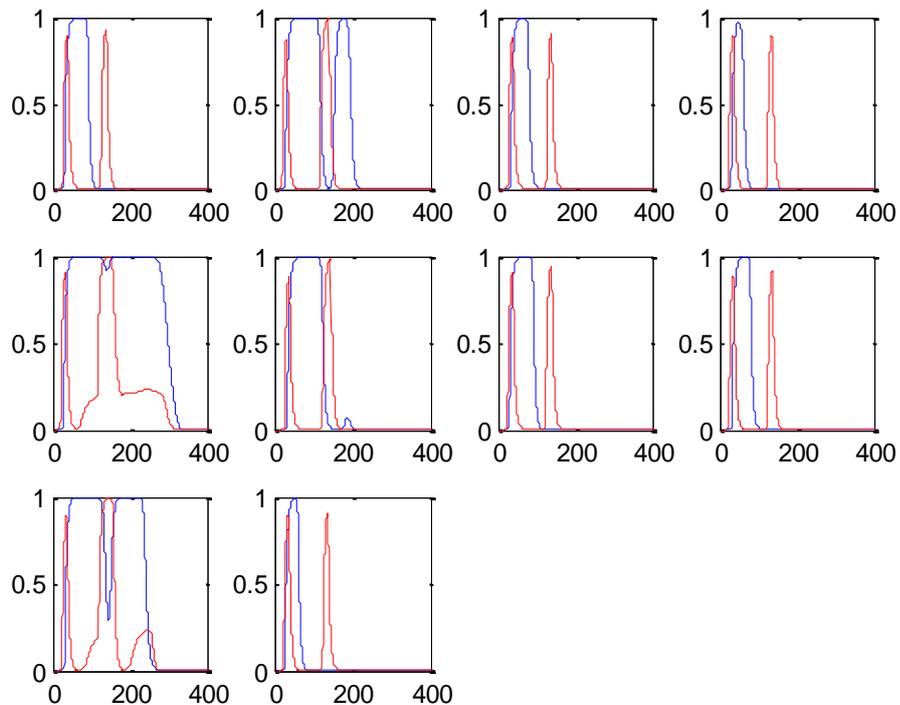


Fig. 4.8. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile e ritardi tra le aree variabili nello stesso range

Nelle figure precedenti sono mostrate le attività dei neuroni per stimoli SOA di 50 ms (fig. 4.7) e 100 ms (fig. 4.8) nella condizione 1, in questo caso sono stati impostati variabili anche i ritardi tra le aree acustica e visiva. Rispetto ai risultati precedenti (fig. 4.4 e fig. 4.5) notiamo che l'illusione si verifica seppure in una percentuale minore di casi.

Per SOA maggiori, non si riesce a replicare l'illusione. Come mostrato nell'esempio nella figura successiva.

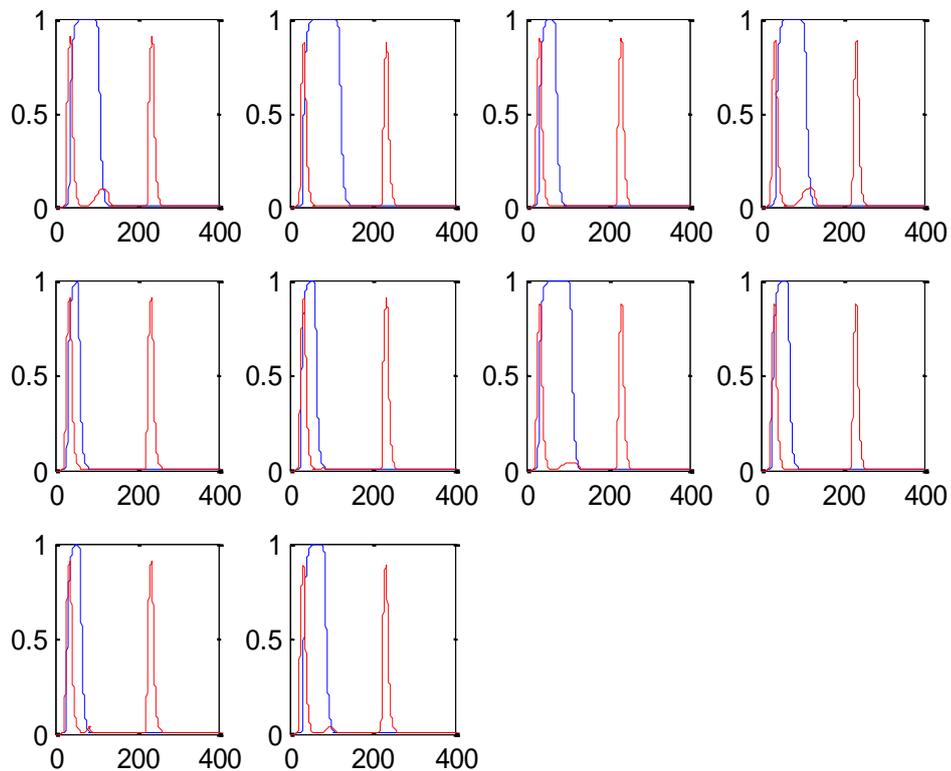


Fig. 4.9. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 200 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile e ritardi tra le aree variabili nello stesso range

Nella condizione 2, anche con i parametri impostati in questo modo, il modello non riesce mai a simulare l'illusione (fig. 4.10).

Vediamo poi il grafico finale risultante.

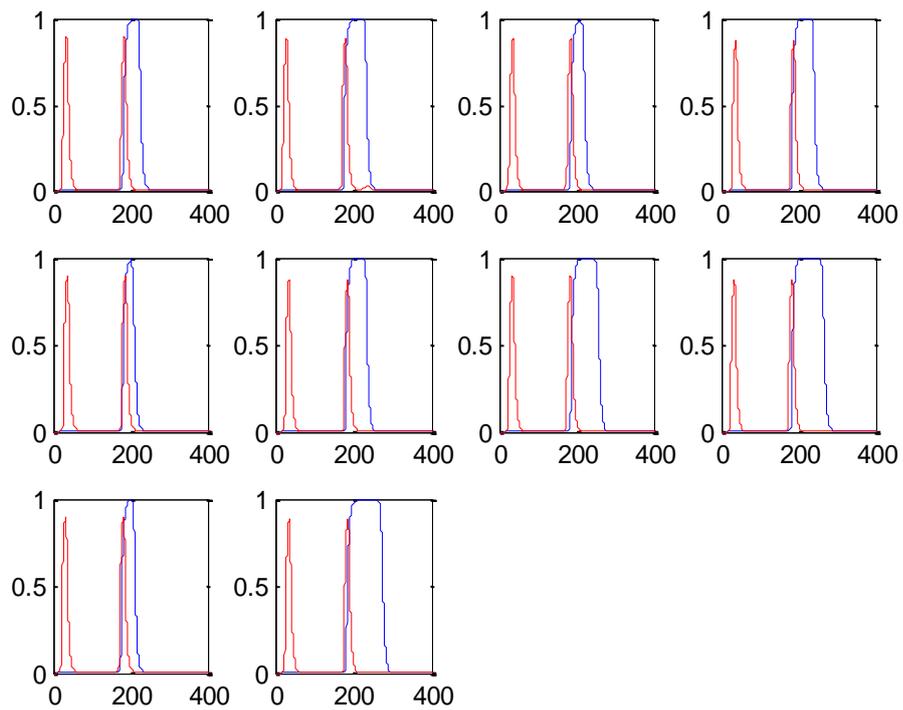


Fig. 4.10. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 150 ms nella condizione 2 di dieci “soggetti” con  $\tau_v$  variabile e ritardi tra le aree variabili nello stesso range

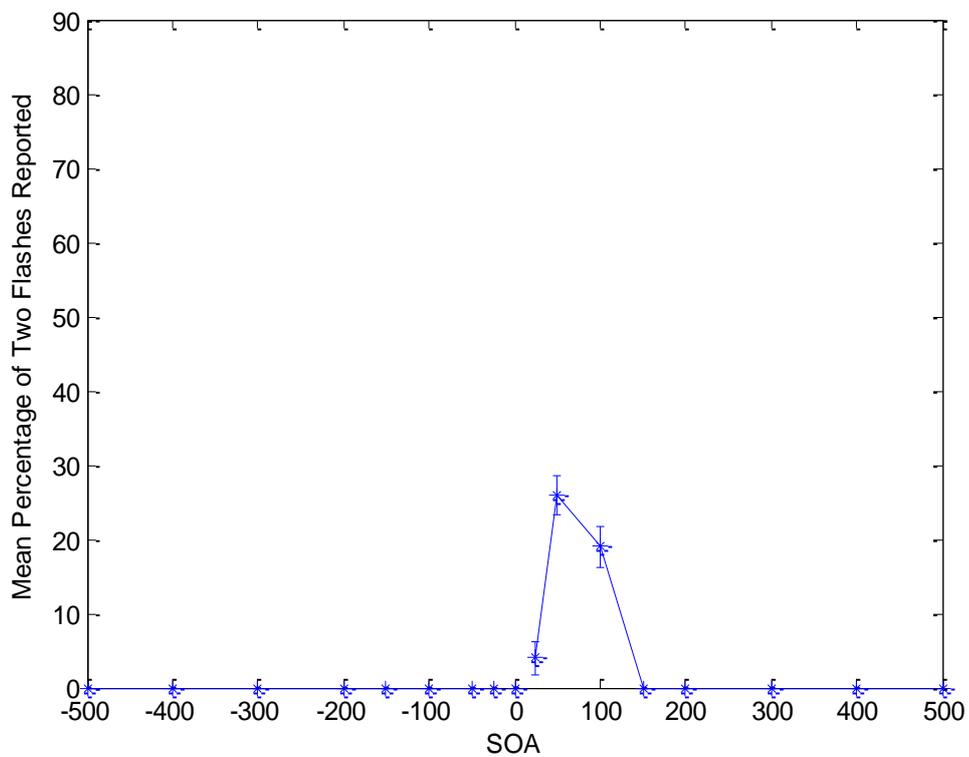


Fig. 4.11. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali con  $\tau_v$  variabile e ritardi tra le aree variabili nello stesso range

Otteniamo un andamento simile al precedente (fig. 4.4), in cui veniva fatta variare solo la costante di tempo visiva, ma fissi i ritardi tra le aree. L'illusione occorre negli stessi casi (per SOA di 25, 50, 100 ms), anche se in questi ultimi due casi la percentuale media di occorrenza dell'effetto Shams è minore. Siamo quindi ancora lontani dall'ottenere l'illusione potenzialmente per tutti gli SOA, e in entrambe le condizioni di interesse.

d) **Modello con  $\tau_v$ , DelAV e DelVA variabili** ( $\tau_v=8-28$ ;  $DelAV=5-15$ ;  $DelVA=45-120$ ). Il passo successivo, in base anche all'analisi di sensitività illustrata nel capitolo precedente, è stato quello di impostare un range variabile diverso per i due ritardi tra le aree, in particolare con il range di  $DelVA$  maggiore del range di  $DelAV$ .

Vediamo cosa otteniamo.

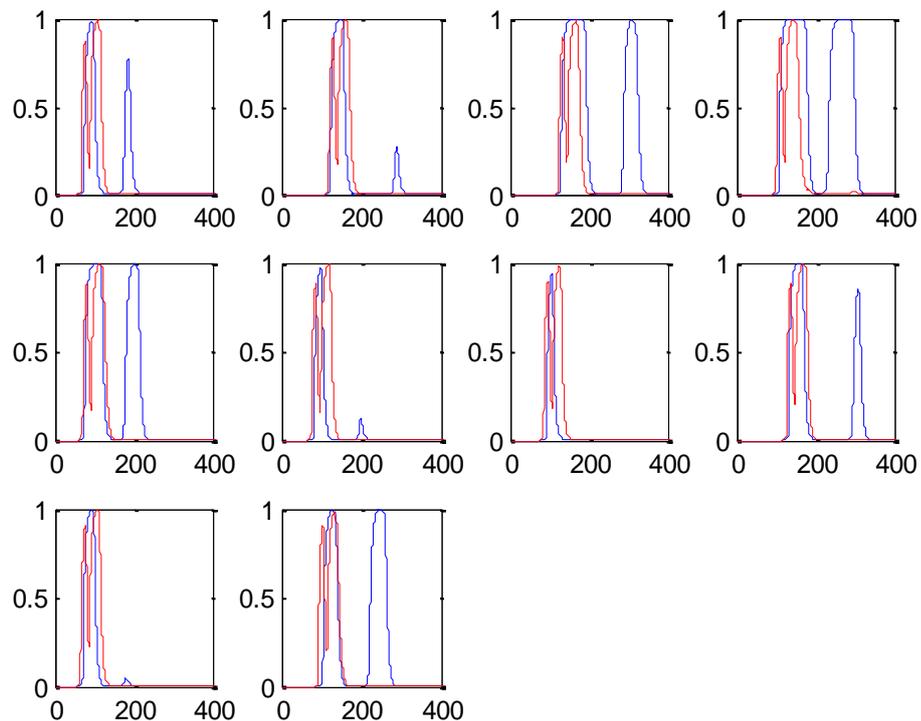


Fig. 4.12. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile e ritardi diversi variabili tra le aree

Nel caso di stimolo SOA di 25 ms notiamo subito un miglioramento nei risultati, infatti in questo esempio l'occorrenza dell'illusione è del 60%, laddove prima era invece molto bassa.

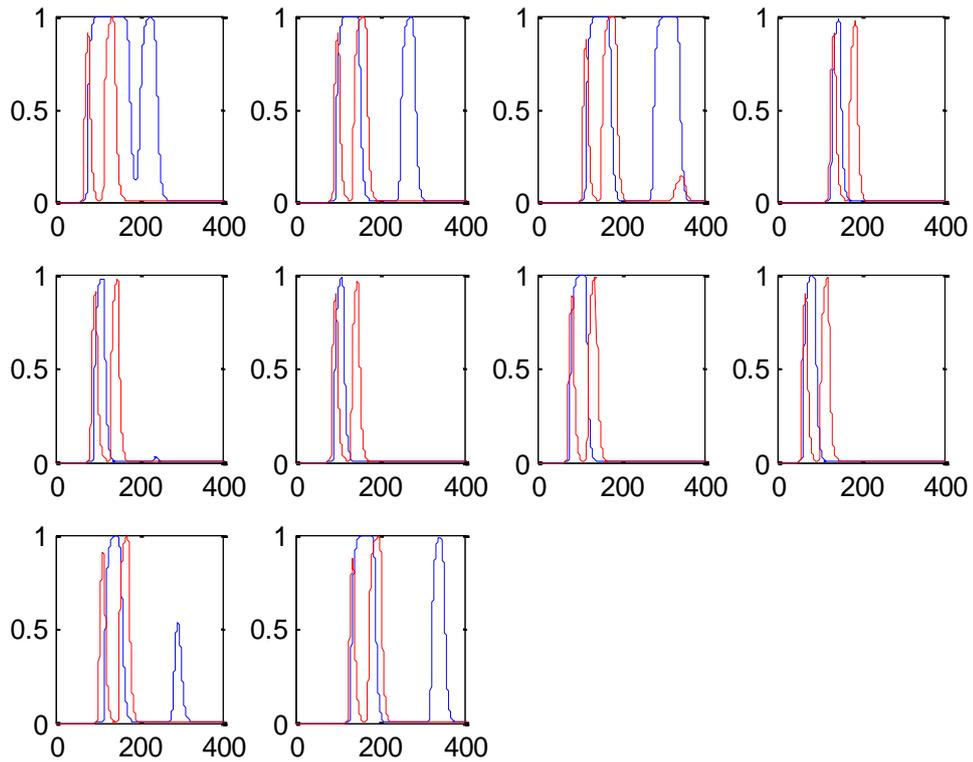


Fig. 4.13. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile e ritardi diversi variabili tra le aree

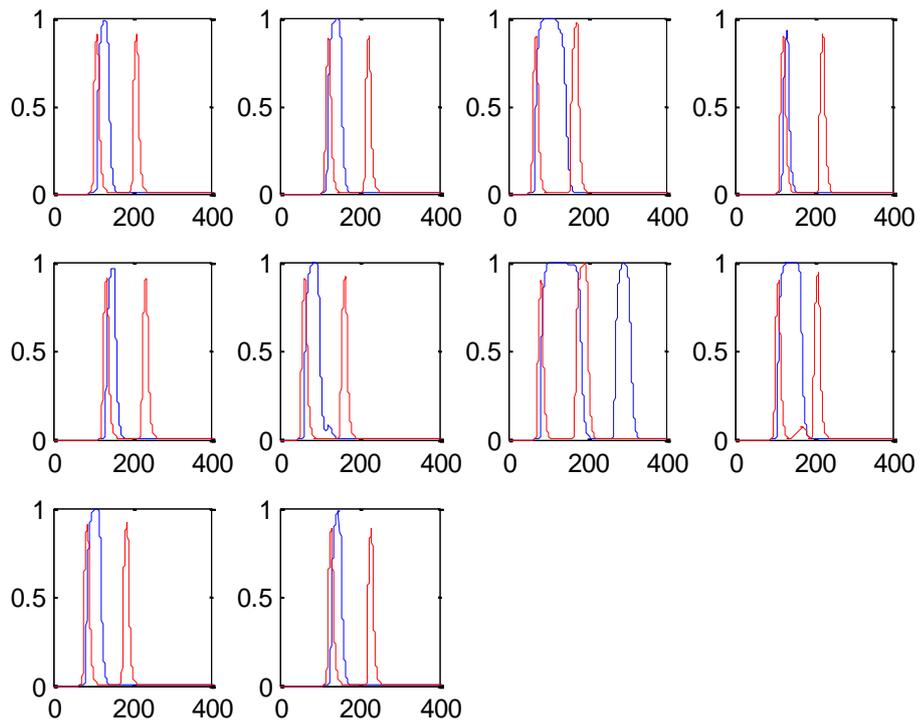


Fig. 4.14. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile e ritardi diversi variabili tra le aree

Come notiamo in queste due ultime figure, anche per stimoli SOA di 50 ms e 100 ms, il modello con questa impostazione dei parametri riesce a simulare talvolta il fenomeno illusorio.

Vediamo nella condizione 2 cosa succede.

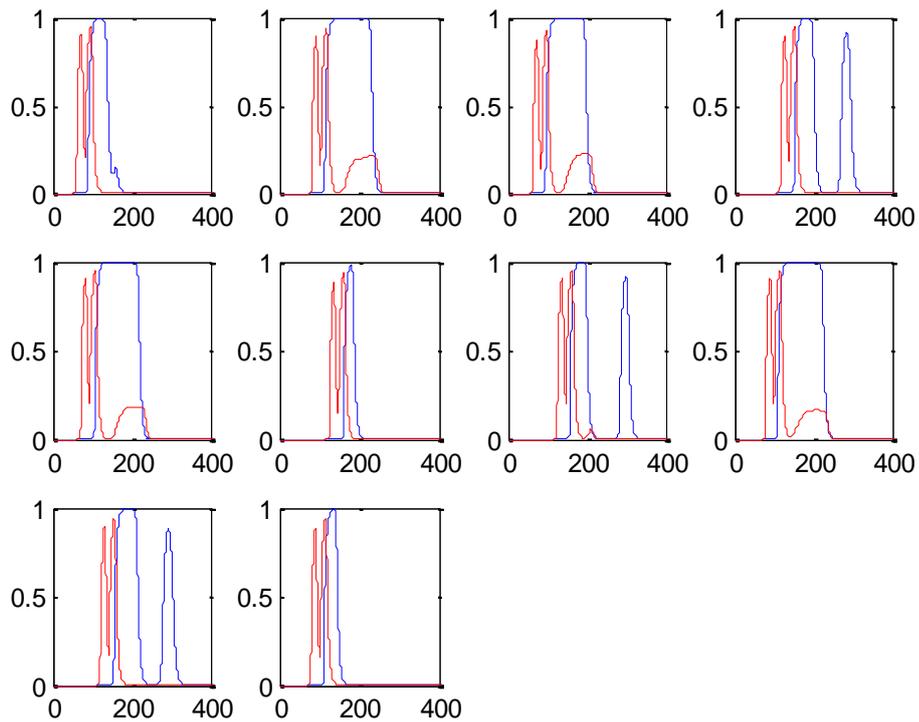


Fig. 4.15. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms nella condizione 2 di dieci “soggetti” con  $\tau_v$  variabile e ritardi diversi variabili tra le aree

Per la prima volta notiamo che l’effetto illusorio del secondo flash riusciamo a simularlo anche nella condizione 2, al fine di ciò è stato quindi determinante impostare diverso il ritardo variabile tra le aree. In particolare in questo caso l’occorrenza è del 30%. Abbiamo ottenuto quindi il risultato di avere potenzialmente l’illusione anche nella condizione 2.

Per quanto riguarda gli altri stimoli SOA nella condizione 2, l’illusione è occorsa anche per SOA di 50 ms e di 100 ms, anche se con basse percentuali. Inoltre in qualche caso si è verificata anche per SOA molto maggiori, come 300 ms e 400 ms. Questo è molto importante al fine di ciò che vogliamo ottenere, il modello ora quindi riesce a riprodurre l’effetto Shams in una finestra temporale maggiore rispetto ai casi precedenti. Vediamo il grafico risultante dopo tutte le prove.

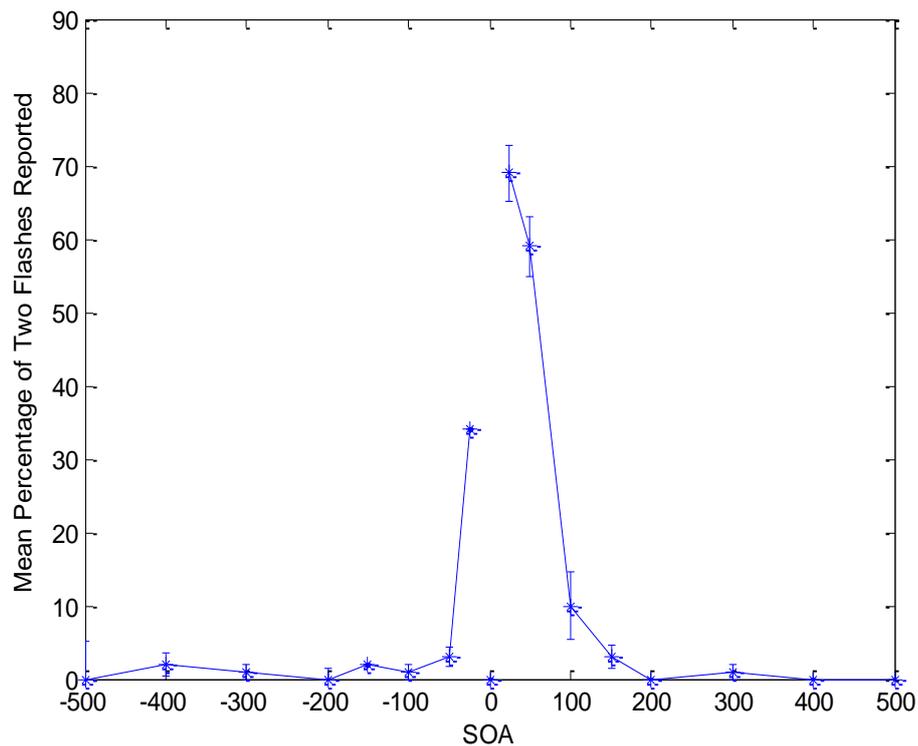


Fig. 4.16. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali con  $\tau_v$  variabile e ritardi diversi variabili tra le aree

L'andamento a destra nel grafico qui mostrato fa vedere come sia evidente il miglioramento dei risultati, in particolare notiamo che l'illusione avviene anche per SOA pari a 25, 50, 100, 150 e 300 ms. E otteniamo anche un andamento decrescente del fenomeno illusorio all'aumentare della distanza tra i beep. A sinistra, condizione sperimentale 2, abbiamo lo stesso andamento anche se ancora poco evidente, ma riusciamo a simulare l'effetto per diversi SOA (sebbene con una percentuale bassa) mentre nelle varianti precedenti del modello nella condizione 2 non riuscivamo mai a ottenere l'effetto illusorio del secondo flash. Nella condizione di controllo invece l'illusione non si verifica mai. Nello studio di Foss-Feig et al. tuttavia è stato riportato come talvolta l'illusione visiva avvenisse anche in questa condizione [11].

e) **Modello con  $\tau_v$ , DelAV, DelVA, DelA1 e DelA2 variabili** ( $\tau_v=8-28$ ;  $DelAV=5-15$ ;  $DelVA=45-120$ ;  $DelA1=5-20$ ;  $DelA2=5-20$ ). A questo punto, come descritto nel capitolo precedente, abbiamo aggiunto dei ritardi puri variabili nell'area acustica,  $DelA1$  e  $DelA2$ .

Vediamo cosa otteniamo con qualche esempio.

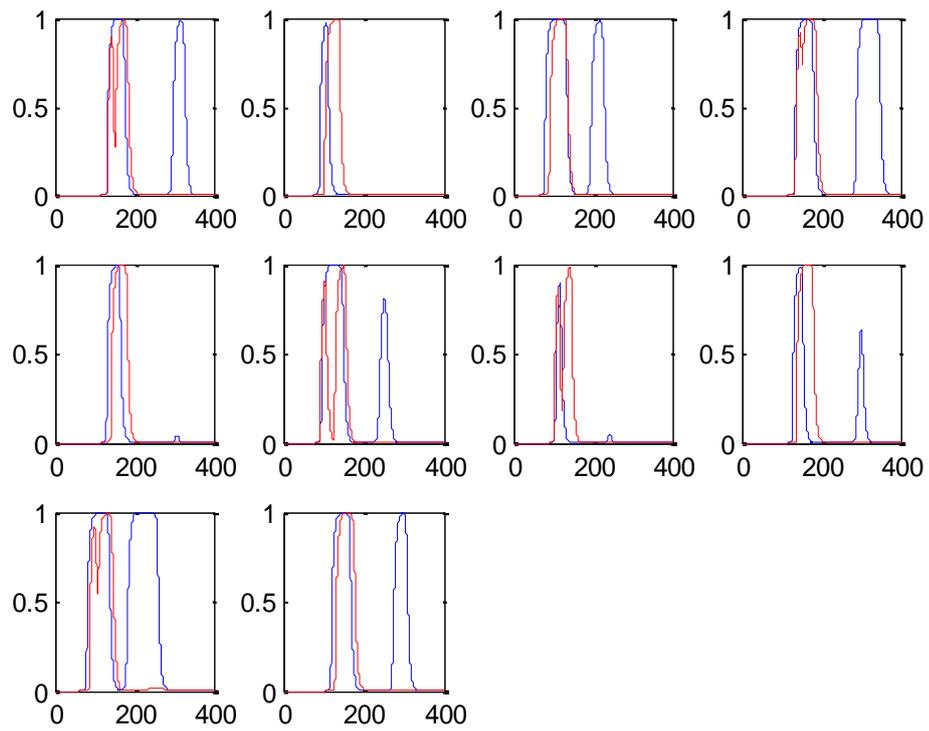


Fig. 4.17. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

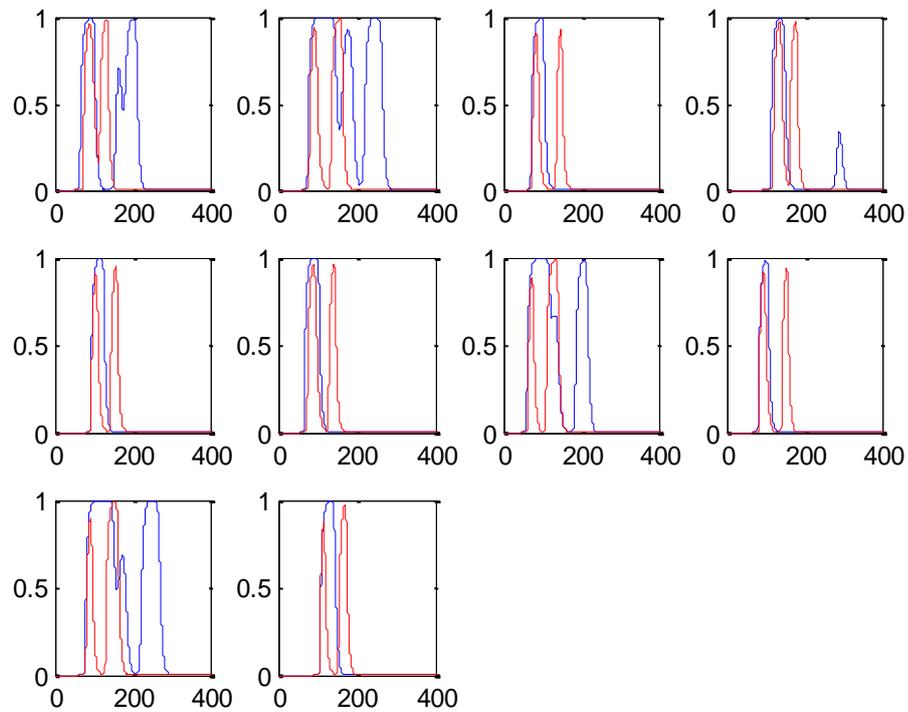


Fig. 4.18. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

L'aggiunta dei ritardi puri sull'area acustica mantiene la possibilità che il modello riesca a replicare l'effetto Shams per gli SOA più piccoli, 25 ms e 50 ms. La differenza rispetto ai casi precedenti però, è che ci dà la possibilità di replicare il fenomeno illusorio per tutti i valori SOA, anche i più grandi.

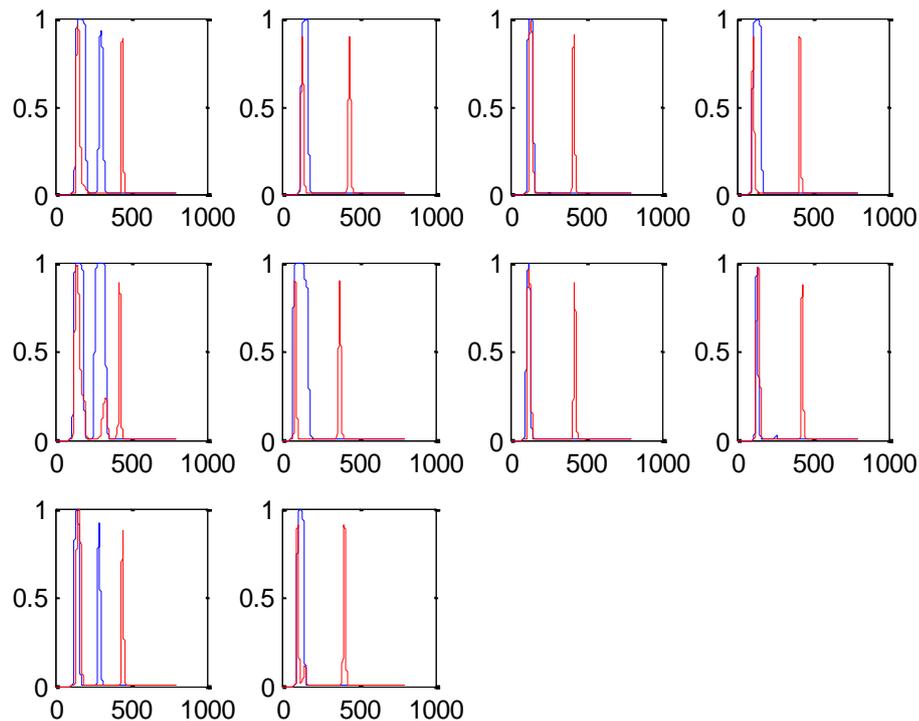


Fig. 4.19. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 300 ms nella condizione 1 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

Qui è mostrata una prova per un SOA di 300 ms. Notiamo che la percentuale dell'occorrenza del fenomeno in questo caso è del 30%. In realtà l'effetto in questo caso, a differenza dei precedenti di 50 ms e 100 ms, non è dovuto al secondo beep, ma al primo dato insieme al flash. In realtà ciò è concorde con lo studio di Foss-Feig, che ci dice infatti che la percentuale media dell'occorrenza del secondo flash per SOA grandi è simile alla percentuale media nel caso della condizione di controllo, che talvolta può dare percezione illusoria di un altro flash. L'introduzione dei ritardi puri variabili dà i suoi effetti maggiori per ciò che riguarda la condizione 2, riportiamo qualche esempio.

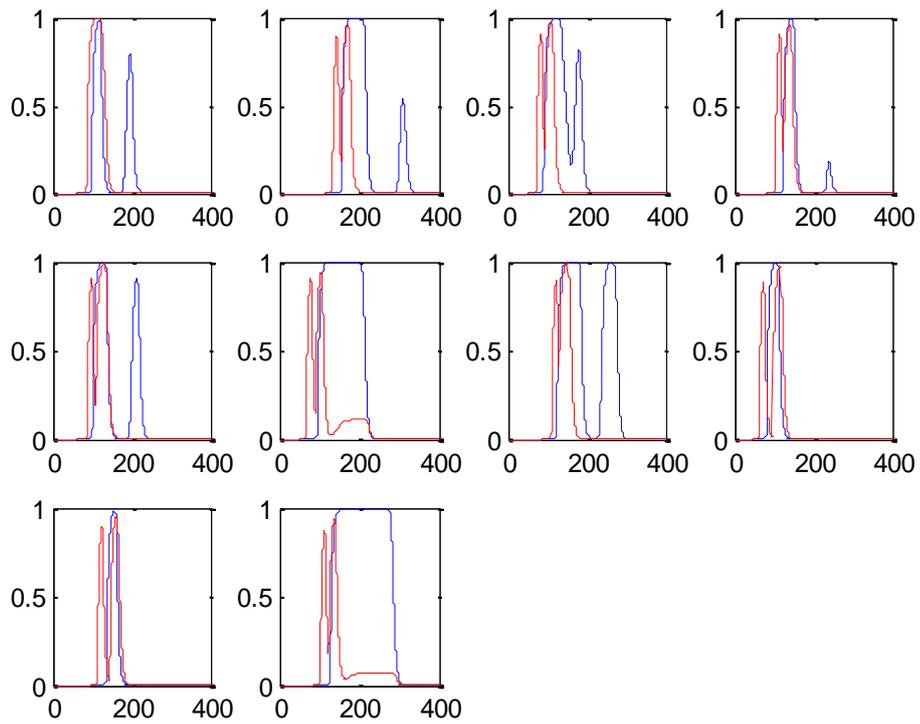


Fig. 4.20. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms nella condizione 2 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

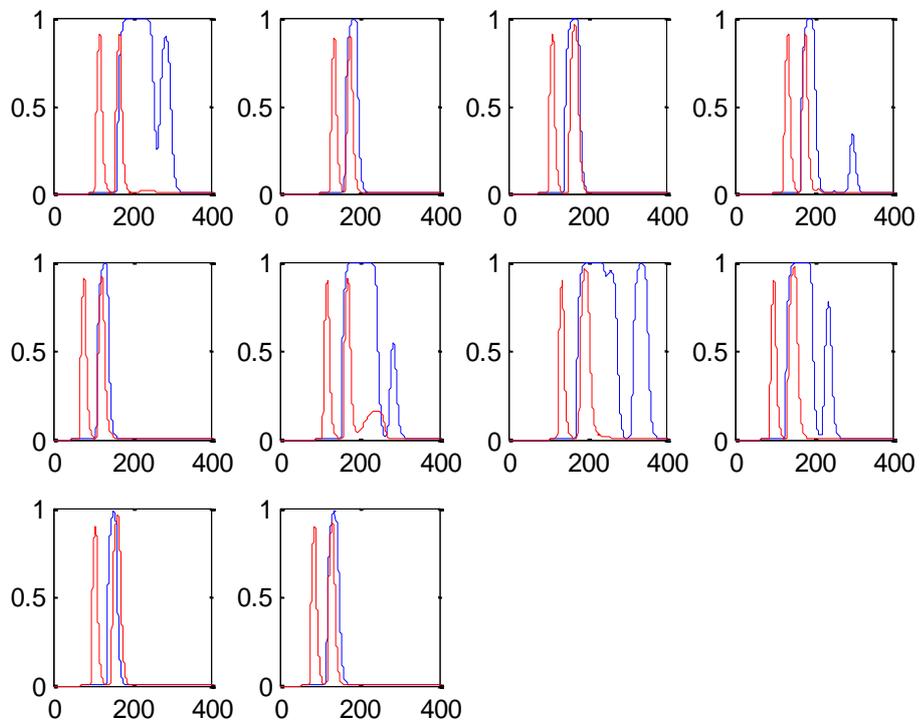


Fig. 4.21. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 2 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

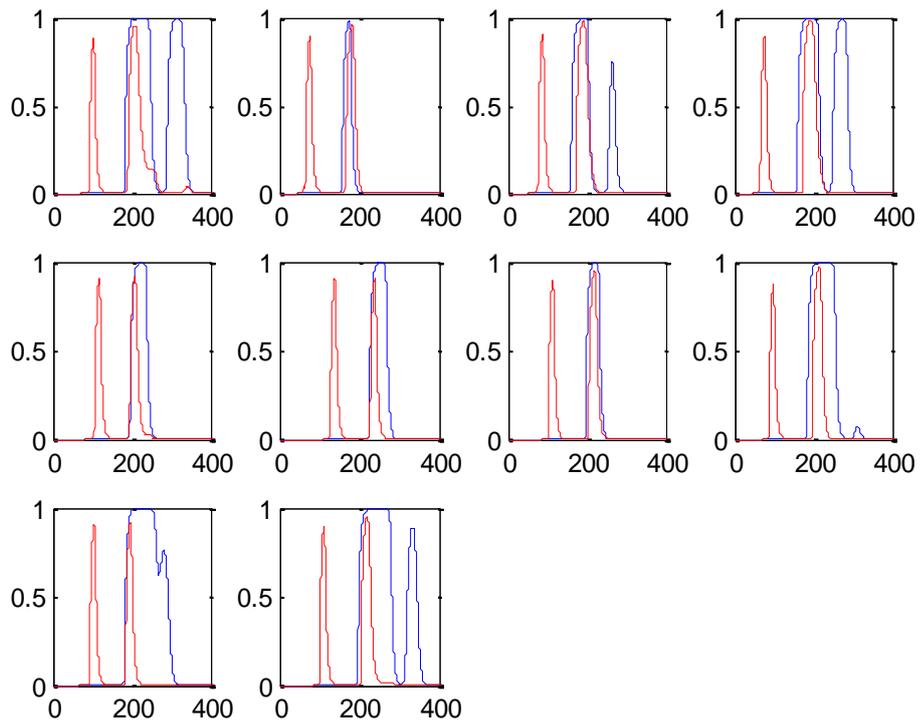


Fig. 4.22. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 100 ms nella condizione 2 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

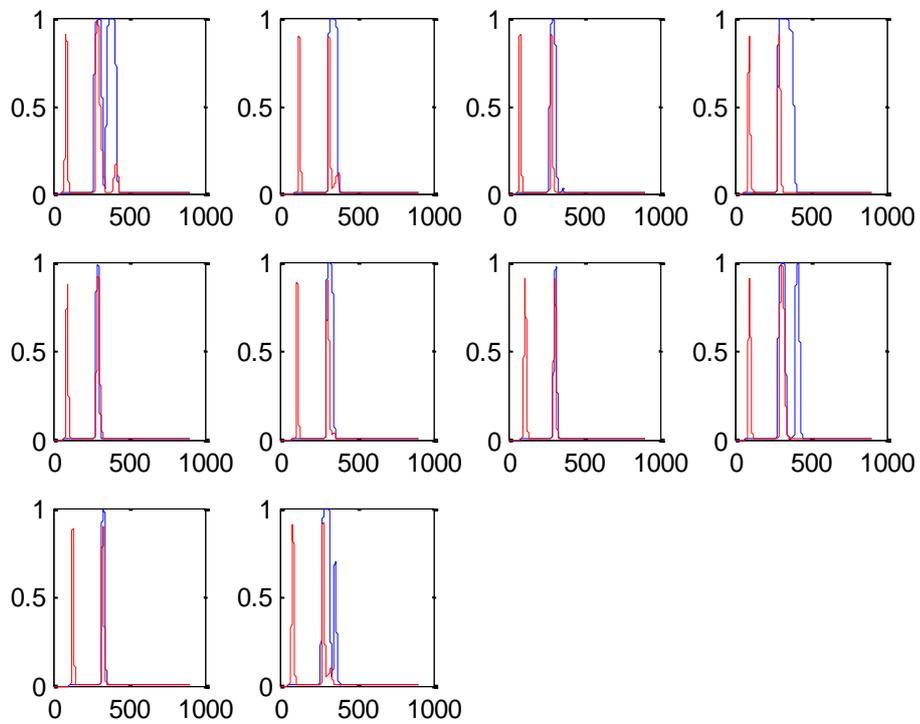


Fig. 4.23. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 200 ms nella condizione 2 di dieci soggetti con  $\tau_v$  variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

In tutti questi casi di esempio, il modello riesce talvolta a simulare l'effetto Shams, soprattutto per gli SOA più piccoli, 25 ms, 50 ms, 100 ms, con una buona occorrenza (rispettivamente 50%, 30%, 40%). Rispetto alle simulazioni effettuate in precedenza senza l'aggiunta dei ritardi puri nell'area acustica, questa volta abbiamo per tutti gli SOA, anche i più grandi, potenzialmente l'illusione visiva (fig. 4.23 con SOA di 200 ms). Alla fine di tutte le prove otteniamo il seguente grafico finale.

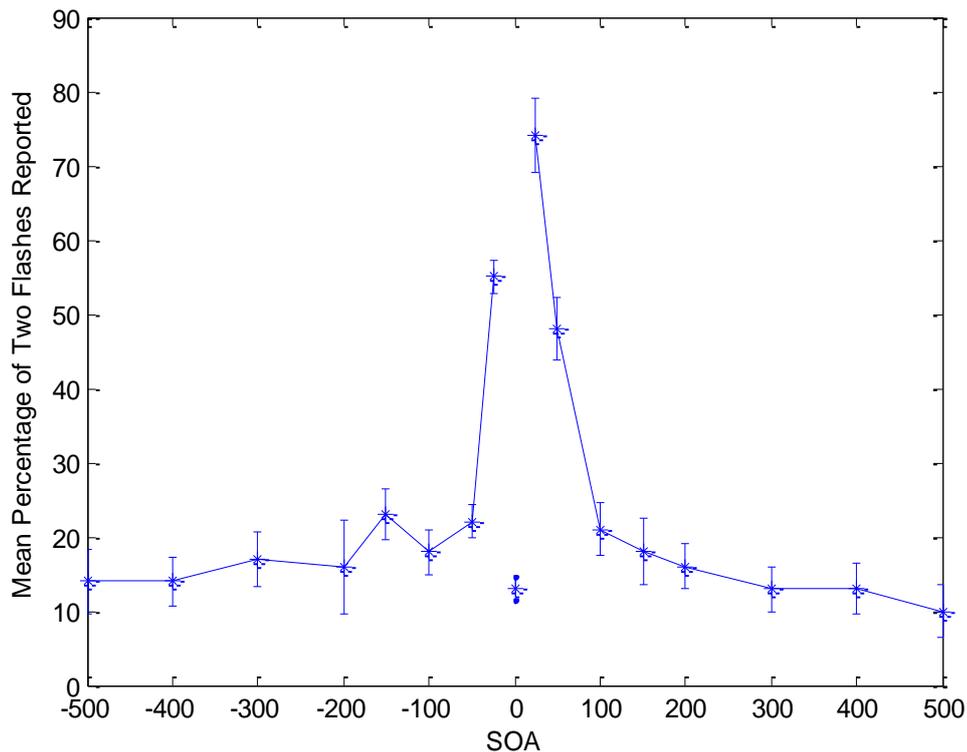


Fig. 4.24. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali con  $\tau$ , variabile, ritardi diversi variabili tra le aree, ritardi puri variabili nell'area acustica

Rispetto ai risultati finali precedenti notiamo un miglioramento evidente dopo l'aggiunta dei ritardi puri, infatti la percentuale media di occorrenza dei flash è diversa da zero per tutti gli SOA in entrambe le condizioni d'interesse. Inoltre notiamo l'andamento decrescente al crescere del valore di SOA, così come riportato in letteratura. Altro risultato importante è che la percentuale media è diversa da zero anche nella condizione di controllo, ed è in linea con la percentuale ottenuta ad SOA maggiori. Ciò è quello che avevano riportato Foss-Feig et al. nel loro studio.

## 4.2 SIMULAZIONI SOGGETTI AUTISTICI

Il risultato precedente è idealmente ottenuto come simulazione di una popolazione di soggetti sani. Le stesse simulazioni per tutti i valori di SOA e in entrambe le condizioni ora vogliamo effettuarle idealmente per una popolazione di soggetti autistici. Essendo questi soggetti affetti da una patologia, l'elaborazione delle informazioni e l'integrazione multimodale possono risentire della malattia. In particolare, in base ai risultati riportati da Foss-Feig, i soggetti autistici mostrano un effetto illusorio maggiore rispetto ai sani per tutti i valori di SOA, risultante in una finestra di integrazione temporale più larga rispetto ai sani. Per cercare di riprodurre tali risultati abbiamo agito modificando alcuni parametri nelle aree di neuroni. In particolare i parametri su cui siamo intervenuti sono state le costanti di tempo acustica  $\tau_a$  e visiva  $\tau_v$ , immaginando che gli autistici possano avere una dinamica più lenta di elaborazione dell'informazione. Inoltre, poiché i risultati della letteratura sembrano indicare una maggiore compromissione dell'elaborazione degli stimoli acustici rispetto agli stimoli visivi, sono stati aumentati anche i ritardi di scambio di informazioni tra le due aree e i ritardi puri nell'area acustica. Più precisamente i range dei parametri adottati per simulare i soggetti autistici sono i seguenti:  $\tau_v=8-30$ ;  $DelAV=80-100$ ;  $DelVA=200-250$ ;  $DelA1=5-75$ ;  $DelA2=5-75$ . E' stata inoltre alzata la costante di tempo acustica  $\tau_a$  da 7 a 9.

Successivamente abbiamo effettuato la stessa serie di prove, con lo stesso criterio, fatte per i soggetti sani. Riportiamo in seguito qualche esempio per alcuni SOA nelle condizioni 1 e 2.

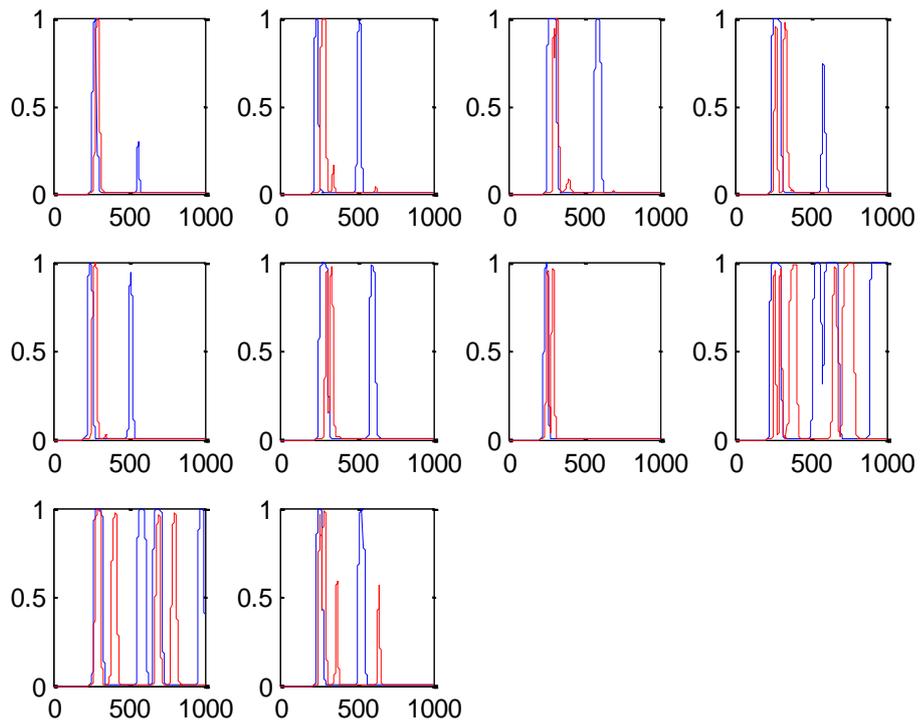


Fig. 4.25. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 25 ms nella condizione 1 di dieci soggetti autistici

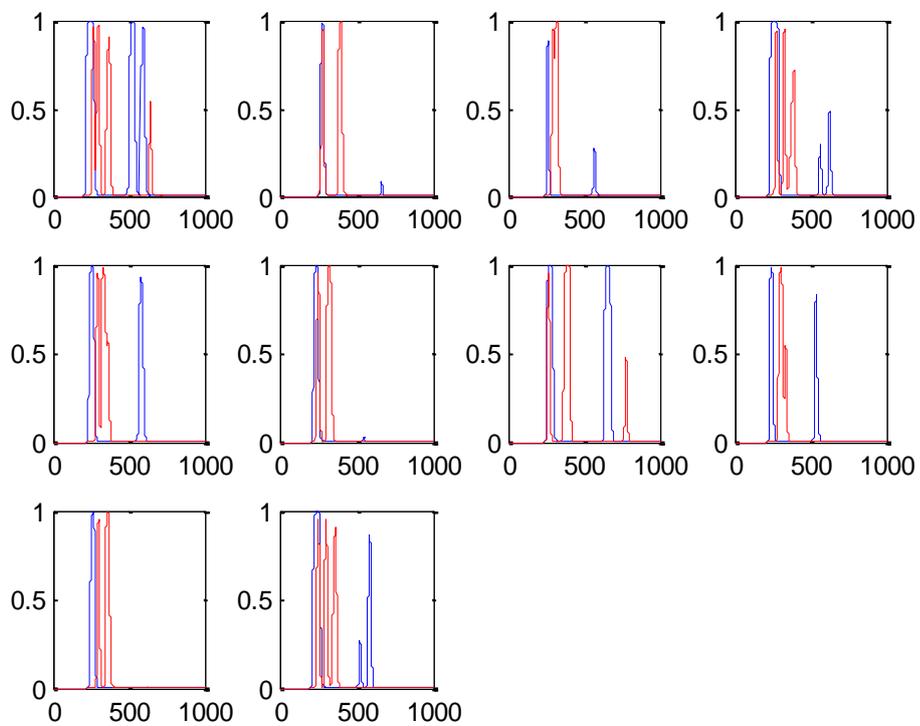


Fig. 4.26. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 1 di dieci soggetti autistici

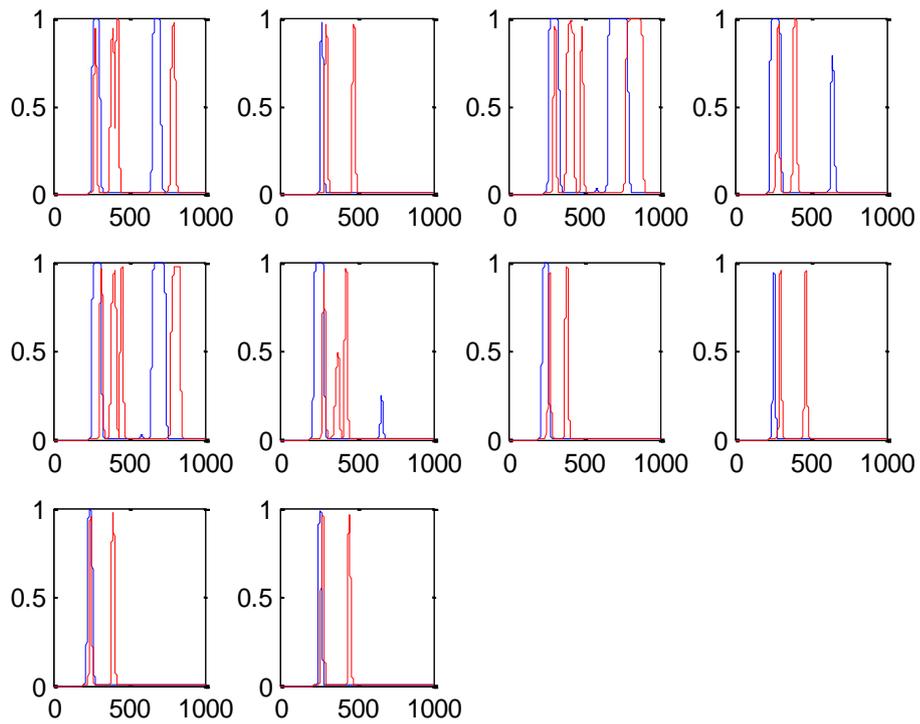


Fig. 4.27. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 150 ms nella condizione 1 di dieci soggetti autistici

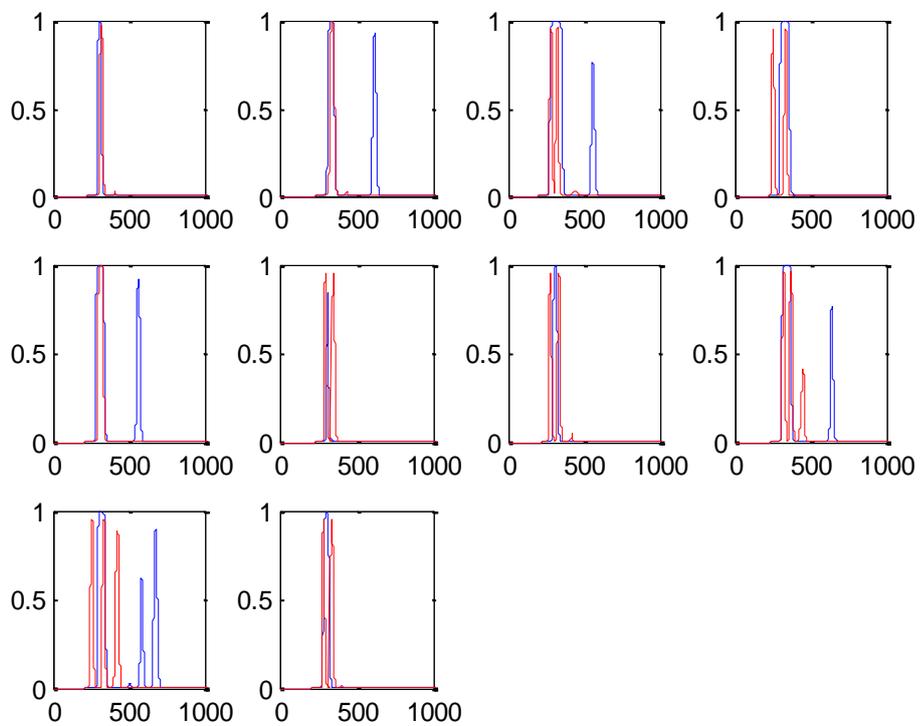


Fig. 4.28. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 50 ms nella condizione 2 di dieci soggetti autistici

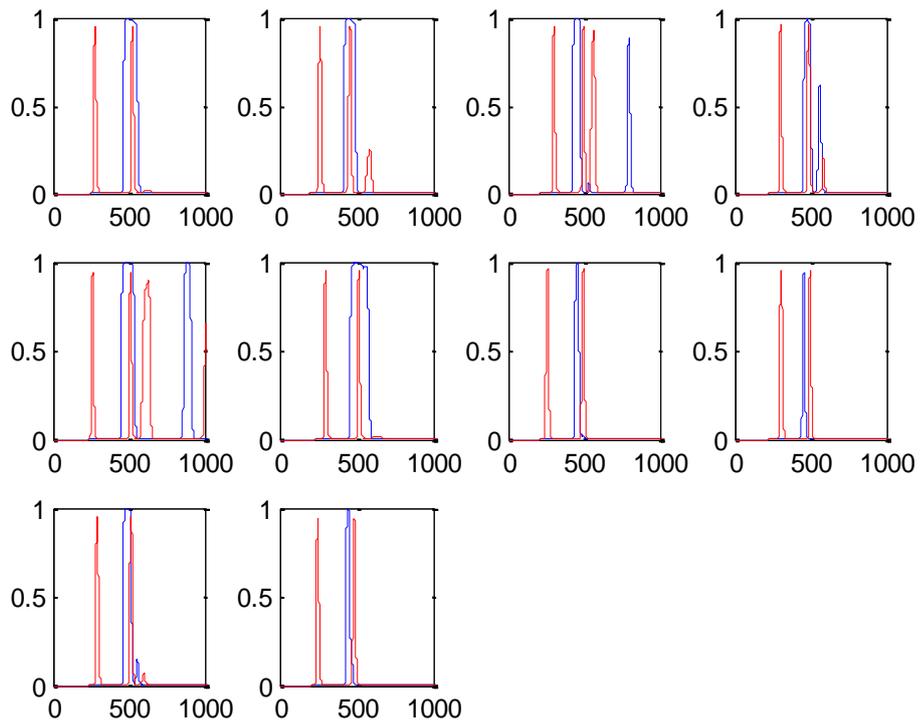


Fig. 4.29. Attività neuroni acustici e visivi ad un SOA di 200 ms nella condizione 2 di dieci soggetti autistici

Nelle ultime figure si nota come in tutti i casi talvolta avvenga il secondo picco visivo che denota il fenomeno illusorio. In generale aumentando quindi il range all'interno nel quale variano i ritardi tra le aree e i ritardi puri nell'area acustica manteniamo la possibilità di ottenere l'effetto Shams per tutti gli SOA e in entrambe le condizioni, ma talvolta con una percentuale, in valore medio, maggiore. Vediamo quindi il grafico risultante dalle prove di simulazione per i soggetti autistici.

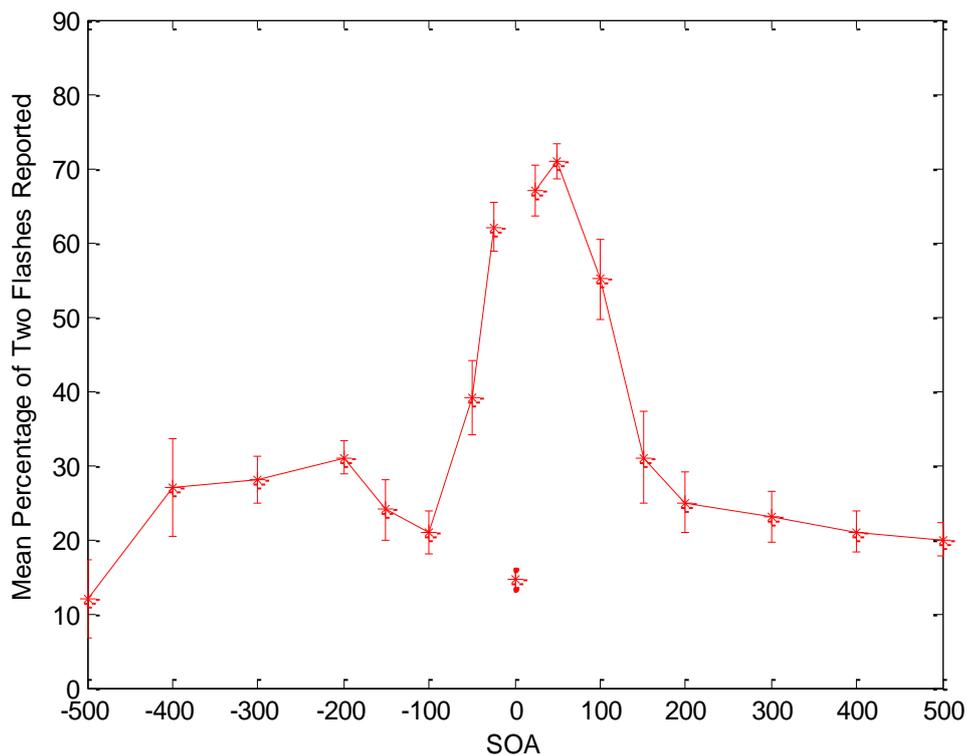


Fig. 4.30. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali per soggetti autistici

Dal grafico finale risultante dopo aver effettuato tutte le prove per i soggetti autistici notiamo che la percentuale dei due flash riportati è diversa da zero in tutti gli SOA e in entrambe le condizioni sperimentali. Abbiamo un andamento decrescente a destra per la condizione 1 al crescere degli stimoli SOA. A sinistra invece notiamo un andamento diverso, la percentuale media decresce fino a SOA=-100 ms per poi risalire leggermente per SOA maggiori e quindi decrescere nuovamente da -200 a -500 ms. La percentuale media è diversa da zero anche nella condizione di controllo.

Consideriamo ora il grafico risultante complessivo riportante il valore medio della percentuale di occorrenza del flash illusorio ad ogni SOA sia per i soggetti sani che per i soggetti autistici.

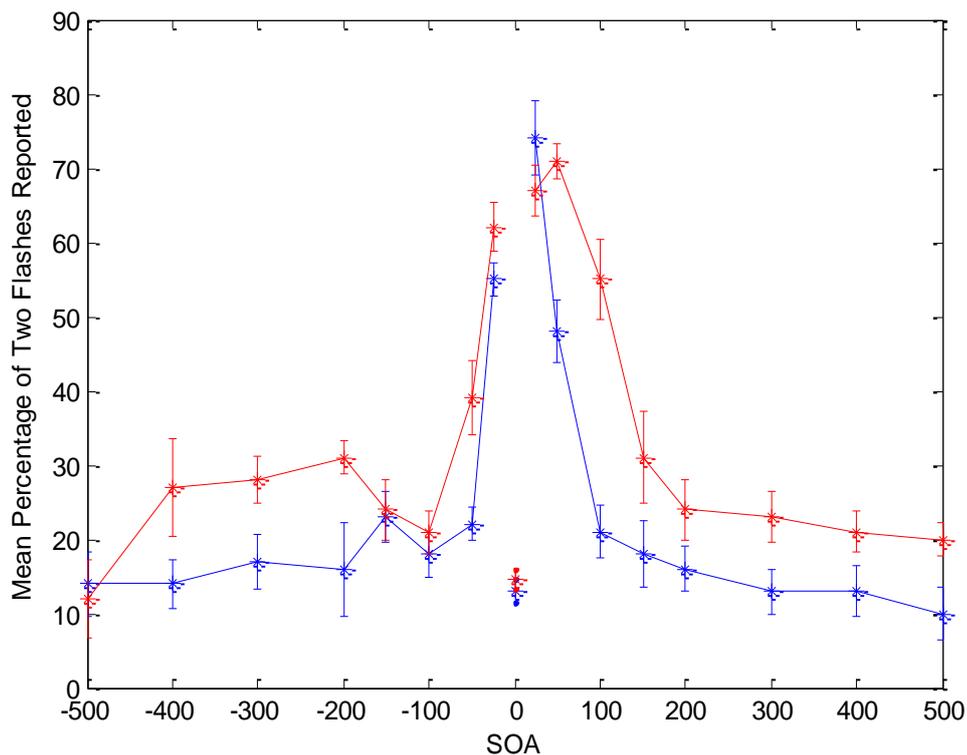


Fig. 4.31. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali per soggetti sani e per soggetti autistici

Da questo grafico, visivamente notiamo subito che i soggetti autistici (rosso) riportano, ad eccezione di alcuni casi, medie percentuali di occorrenza di due flash tendenzialmente maggiori rispetto ai soggetti sani (blu). A destra (condizione 1) vediamo che a parte il caso di un SOA pari a 25 ms, i oggetti autistici hanno sempre una media percentuale maggiore di occorrenza dell'effetto Shams rispetto ai sani. A sinistra (condizione 2) riportano una percentuale leggermente maggiore per gli SOA fino a 150 ms, ma molto più ampia per gli SOA pari a 200 ms, 300 ms, 400 ms.

### 4.3 ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI

Per quantificare la differenza dell'effetto illusorio a diversi SOA entro i singoli gruppi (sani e autistici) e tra gruppi, è stata fatta un'analisi statistica. I risultati riguardano due popolazioni differenti, soggetti sani e soggetti autistici. Per prima cosa è stata fatta un'analisi della varianza (ANOVA) al fine di confrontare la variabilità dei risultati. E' stata condotta un'analisi a due vie (o fattori): un fattore è rappresentato dal gruppo (sani, autistici), l'altro fattore è rappresentato dall'SOA. I risultati dell'ANOVA hanno

mostrato che l'effetto dell'SOA è significativo [  $F(15,288) = 39,87, p < 0.001$  ] confermando il legame tra l'intervallo temporale e la probabilità dell'integrazione audiovisiva che causa l'illusione. Significativo è stato anche il fattore gruppo [  $F(1,288) = 54,44, p < 0.001$  ]: i due gruppi differiscono quindi nella probabilità di riportare il flash illusorio. Infine significativa è anche l'interazione tra i due fattori [  $F(15,288) = 3,02, p = 0.0002$  ], indicando che la relazione tra disparità temporale (cioè SOA) e probabilità di integrazione è differente nei due gruppi.

Una volta verificato l'effetto dei due fattori, per eseguire confronti a coppie e verificare se la differenza tra due medie è significativa abbiamo usato il test di Student, *t-test*. Questi test statistici assumono inizialmente la cosiddetta ipotesi nulla. Qualora questa ipotesi sia valida, i campioni vengono dalla stessa popolazione e le differenze tra i campioni sono quindi non significative.

Abbiamo effettuato quindi dei t-test tra le medie percentuali di occorrenza dell'illusione dei soggetti sani e le medie percentuali dei soggetti autistici.

Differenze significative sono state trovate per i seguenti SOA (tab. 4.1): 50 ms, 100 ms, 300 ms, 500 ms per la condizione 1; 50 ms, 200 ms, 300 ms, 400 ms per la condizione 2 (gli asterischi in figura 4.33 rappresentano tali differenze significative). Quindi possiamo dire che soggetti autistici hanno una propensione maggiore di riportare l'illusione visiva per questi SOA rispetto ai soggetti sani.

Altri t-test sono stati fatti per evidenziare l'esistenza di una finestra d'integrazione in cui soggetti sani ed autistici possono riportare l'illusione. In questo caso i t-test sono stati fatti confrontando le varie medie percentuali trovate per ogni SOA con la media percentuale della condizione di controllo.

Per i soggetti sani risultati significativi sono stati trovati per 25 ms, 50 ms, 100 ms per la condizione 1; 25 ms e 50 ms per la condizione 2.

Per i soggetti autistici risultati significativi invece sono stati trovati per 25 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms, 300 ms, 400 ms, 500 ms per la condizione 1; 25 ms, 50 ms, 150 ms, 200 ms, 300 ms, 400 ms per la condizione 2.

In conclusione quindi possiamo dire che effettivamente, come riportato dalla letteratura e dallo studio in vivo di Foss-Feig et al. (fig. 4.32), la finestra di integrazione all'interno della quale può verificarsi il fenomeno illusorio dei soggetti autistici è più ampia di quella dei soggetti sani (fig. 4.33).

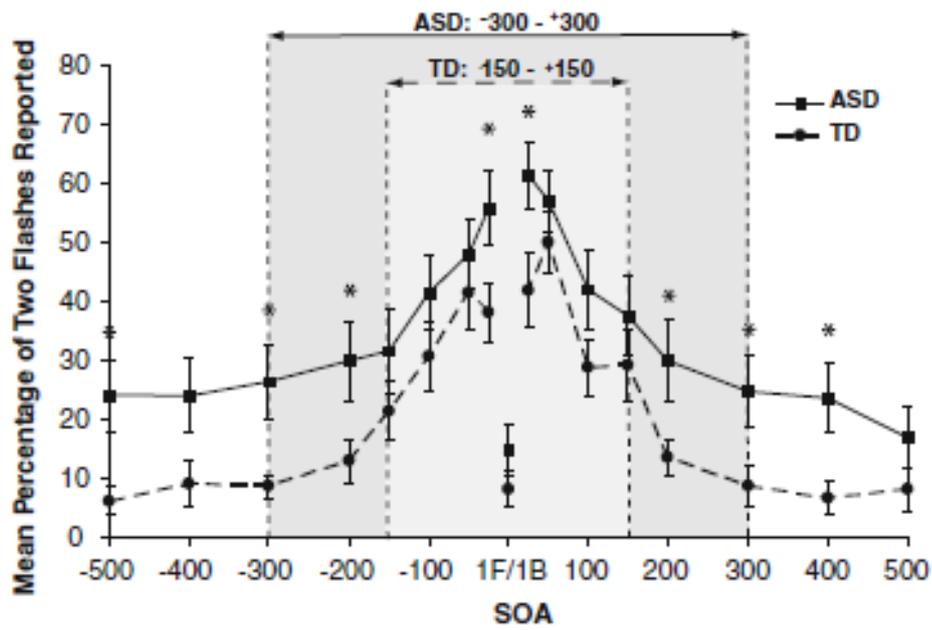


Fig. 4.32. Risultati dell'esperimento di Foss-Feig per soggetti sani e autistici

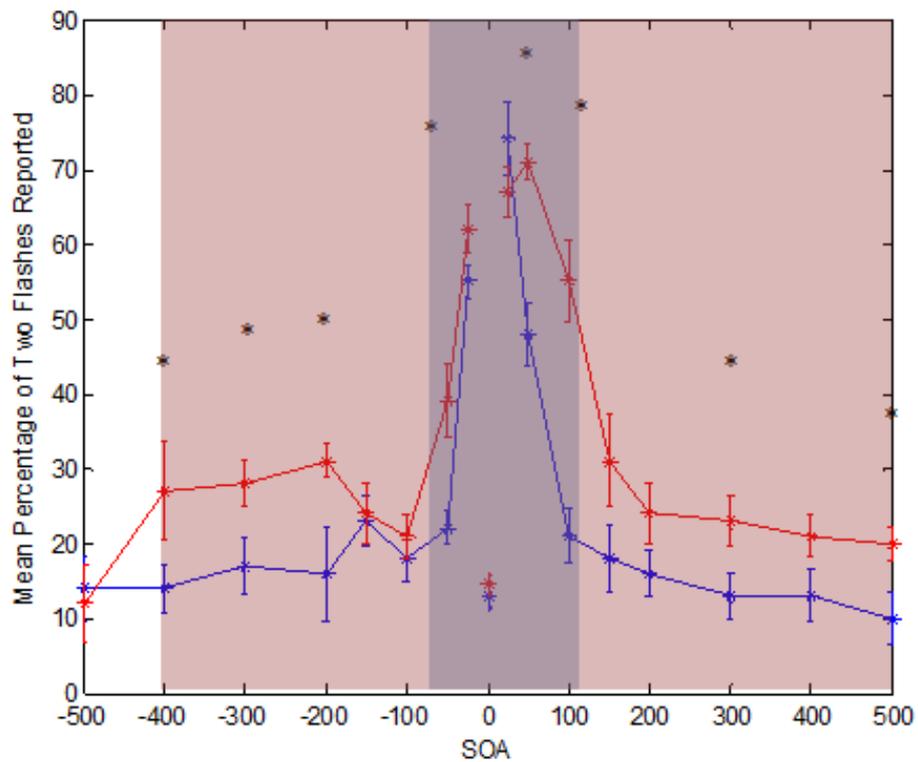


Fig. 4.33. Risultati delle prove effettuate per tutti gli SOA nelle due condizioni sperimentali per soggetti sani e per soggetti autistici con evidenziata la finestra di integrazione

SOA	p
50	p<0,001
100	p<0,001
300	p=0,0392
500	p=0,0291
-50	p=0,0326
-200	p=0,0111
-300	p=0,0169
-400	p=0,0277

Tab. 4.1. Risultati t-test tra le medie percentuali di occorrenza dell'illusione dei soggetti sani e le medie percentuali dei soggetti autistici

# CONCLUSIONI

Oggetto principale di questa tesi è stato un importante esempio di interazione audiovisiva, un fenomeno illusorio visivo indotto dal suono che prende il nome “*sound-induced flash illusion*”: quando un singolo flash è presentato con due o più beep sonori, i soggetti spesso riportano la percezione di aver visto due o più flash. In questi studi, in genere, il flash è simultaneo ad un beep e un beep singolo precede o segue la coppia simultanea flash e beep. La distanza che separa il beep singolo dalla coppia flash+beep è definito *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA). Il fenomeno del flash illusorio tende a svanire al crescere dell’SOA. Per questo viene definita una “finestra temporale” d’integrazione, cioè quell’intervallo di valori di SOA all’interno del quale gli stimoli acustici e visivi interagiscono determinando la possibilità di avere l’occorrenza dell’illusione visiva.

Alcuni studi hanno mostrato che il fenomeno del *sound-induced flash illusion* è presente anche nei soggetti autistici, suggerendo che i soggetti autistici hanno come i soggetti sani la capacità di integrare stimoli audiovisivi. Tuttavia, alcuni studi hanno mostrato che i soggetti autistici, rispetto ai soggetti sani, presentano una maggiore propensione nel riportare l’illusione e una finestra d’integrazione circa doppia rispetto ai sani.

Obiettivo di questo lavoro è stato approfondire questi aspetti di interazione audiovisiva mediante l’utilizzo di un modello di rete neurale. Il modello proposto si basa su un precedente modello sviluppato dal gruppo di Bioingegneria dell’Università di Bologna. Tale modello è in grado di simulare il fenomeno del *sound-induced flash illusion*, tuttavia è ottimizzato per simularlo solo per un ristretto intervallo di SOA, cioè quando i due beep sono separati di circa 50 ms, mentre non prendeva in considerazione l’ampio valori di SOA in cui si osserva il fenomeno in letteratura. Il nostro scopo è stato quello di approfondire lo studio del fenomeno illusorio e simularlo per valori di SOA differenti e in due condizioni di stimolazioni differenti: 1) la prima condizione consisteva in un beep e un flash dati insieme seguiti dopo un certo SOA da un altro beep; 2) la seconda consisteva in un beep seguito dopo un certo SOA da una coppia beep+flash. Inoltre abbiamo voluto valutare per quali configurazione di parametri il modello fosse in grado di riprodurre i risultati osservati nei soggetti autistici, ovvero una più larga finestra di interazione multisensoriale e una maggiore occorrenza del fenomeno illusorio.

Il set di parametri basali del modello si è dimostrato insoddisfacente nel riprodurre il fenomeno illusorio per diversi valori di SOA, in entrambe le condizioni esaminate (1 e 2). Per modificare in modo opportuno i parametri è stata quindi effettuata un'analisi di sensitività del modello, studiando la variazione della risposta del modello al variare di uno o più parametri. Sulla base di tale studio, si è pervenuti alla scelta di un opportuno set di parametri variabili in un certo intervallo, al fine di rendere il modello capace di simulare l'effetto illusorio in un ampio intervallo di SOA, così come riportato in letteratura. L'uso di un set di parametri variabili all'interno di un certo range (anziché parametri fissati ad uno specifico valore) si è reso necessario per poter riprodurre il fenomeno in una pluralità di differenti configurazioni di stimolazione. Tale variabilità è comunque interpretabile sia come variabilità inter-individuo che intra-individuo.

Avendo usato un set di parametri che variano all'interno di un range di valori, sono state fatte più prove di simulazione per verificare l'occorrenza dell'illusione visiva ai diversi SOA, al fine poi di ricavare un valore medio e una deviazione standard relativi alla occorrenza percentuale del fenomeno ad ogni SOA. Così facendo, il modello si è rivelato in grado di riprodurre il fenomeno illusorio per diversi valori di SOA, in accordo con i dati riportati in letteratura per i soggetti sani. In particolare, i parametri che sono risultati parametri chiave per riprodurre i dati di letteratura riguardano la dinamica temporale degli input visivi, i ritardi con cui vengono scambiate le informazioni tra le aree visive e acustiche, e le latenze di elaborazione degli input acustici. Inoltre, modificando opportunamente il range di variabilità di tali parametri (in particolare riducendo leggermente la dinamica degli input visivi, aumentando i ritardi dello scambio di informazione cross-modale ed aumentando la latenza di elaborazione degli input acustici), il modello simula la maggiore propensione alla fenomeno illusorio e la molto più ampia finestra di interazione osservati nei soggetti autistici.

Pertanto, le analisi svolte in questo lavoro possono contribuire a chiarire i seguenti aspetti:

- i meccanismi alla base del fenomeno illusorio oggetto di studio e della finestra temporale relativamente ampia in cui tale fenomeno ha luogo;
- quali sono le possibili alterazioni nei parametri delle vie sensoriali e nei parametri di interazione tra aree cerebrali che possono interpretare le differenze osservate nei soggetti autistici rispetto ai sani.

Questo ha implicazioni sia, in generale, nell'ambito della comprensione dei fenomeni di interazione multisensoriale, sia, più nello specifico, per fare luce sulle anomalie

nell'elaborazione multisensoriale di basso livello nei soggetti autistici che possono ripercuotersi in processi di più alto livello (come ad esempio la percezione del linguaggio).

Il lavoro svolto presenta alcuni limiti:

1) il modello utilizzato è basato su un principio di parsimonia ed utilizza solo due strati di neuroni reciprocamente interconnessi. Utilizzando un modello così semplice, per riprodurre il fenomeno illusorio in un'ampia configurazione di stimolazioni, è stato necessario adottare range ampi di variabilità dei parametri chiave. Un modello più sofisticato potrebbe comprendere una terza area multisensoriale collegata con le due aree unisensoriali attraverso sinapsi feedback e feedforward. La presenza di una terza area multisensoriale potrebbe aiutare a riprodurre il fenomeno utilizzando range di variabilità dei parametri più contenuti;

2) i dati relativi ai soggetti autistici sono stati ottenuti modificando il range di variabilità di alcuni parametri, in particolare la dinamica e la latenza degli input sensoriali (specialmente acustici). Tuttavia, non è stata al momento fatta un'analisi della letteratura per verificare se le variazioni dei parametri qui ipotizzate possano trovare un riscontro effettivo nei soggetti autistici.

Possibili miglioramenti futuri potrebbero quindi riguardare la struttura del modello, per esempio aggiungendo un'altra area multisensoriale, e una più approfondita analisi della letteratura scientifica circa le disabilità dei soggetti autistici sia a livello di elaborazione di singoli stimoli sensoriali sia a livello di altri fenomeni di interazione multisensoriale.

# Bibliografia

1. Stevenson R, Wallace A. *Multisensory temporal integration: task and stimulus dependencies*. Exp Brain Res 2013; 227: 249-261.
2. Driver J, Spence C. *Multisensory perception: beyond modularity and convergence*. Current Biology 2000, Vol. 10 N. 20, R731-R735.
3. Stein BE, Stanford TR. *Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron*. Nature Reviews Neuroscience 2008; Vol. 9.
4. Shams L, Kamitani Y, Shimojo S. *Visual illusion induced by sound*. Cognitive Brain Research 14, 2002, 147-152.
5. Marco EJ, Hinkley L, Hill SS, Nagarajan SS. *Sensory processing in autism: a review of neurophysiologic findings*. Pediatric Research, Vol. 69, No. 5, Pt. 2, 2011.
6. Kwakye LD, Foss-Feig JH, Cascio CJ, Stone W, Wallace MT. *Altered auditory and multisensory temporal processing in autism spectrum disorders*. Integrative Neuroscience, January 2011, Vol. 4, Article 129.
7. Mongillo EA, Irwin JR, Whalen DH, Klaiman C, Carter AS, Schultz RT. *Audiovisual processing in children with and without autism spectrum disorders*. J Autism Dev Disord, 2008, 38: 1349-1358.
8. Szelag E, Kowalska J, Galkowski T, Poppel E. *Temporal processing deficits in high-functioning children with autism*. British Journal of Psychology, 2004, 95: 269-282.

9. Van der Smagt MJ, Van Engeland H, Kemmer C. *Brief report: can you see what is not there? Low-level auditory-visual integration in autism spectrum disorders.* J Autism Dev Disord, 2007, 37: 2014-2019.
10. Stevenson RA, Siemann JK, Schneider BC, Eberly HE, Woynaroski TG, Camarata SM, Wallace MT. *Multisensory temporal integration in autism spectrum disorders.* The Journal of Neuroscience, January 15, 2014, 34(3): 691-697.
11. Foss-Feig JH, Kwakye LD, Cascio CJ, Burnette CP, Kadivar H, Stone WL, Wallace MT. *An extended multisensory temporal binding window in autism spectrum disorders.* Exp Brain Res, 2010, 203: 381-389.
12. Cuppini C, Magosso E, Bolognini N, Vallar G, Ursino M. *A neurocomputational analysis of the sound-induced flash illusion.* NeuroImage 92, 2014, 248-266