



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Psicologia Generale**

**Corso di Laurea Triennale in Scienze Psicologiche  
Cognitive e Psicobiologiche**

**Elaborato finale**

**Risonanza stocastica: l'effetto del rumore  
nella percezione visiva**

Stochastic resonance: the effect of noise on visual perception

*Relatore*

**Prof. Luca Battaglini**

*Laureanda: Gaia Gauna  
Matricola: 2014016*

Anno Accademico 2022 - 2023



## INDICE

<b>CAPITOLO 1</b> .....	5
<b>1.1 Introduzione</b> .....	5
<b>1.1.1 Il meccanismo della RS</b> .....	5
<b>1.1.2 Aspetti essenziali della RS</b> .....	6
<b>1.1.2.1 Sistemi non lineari</b> .....	6
<b>1.1.2.2 Stimolo sottosoglia</b> .....	7
<b>1.1.2.3 Rumore</b> .....	8
<b>1.2 RS e Sistema nervoso</b> .....	9
<b>1.3 RS nei sistemi sensoriali</b> .....	10
<b>1.4 RS nel sistema visivo</b> .....	11
<b>1.4.1 Reticoli di luminanza</b> .....	12
<b>1.5 Applicazioni cliniche del rumore</b> .....	14
<b>CAPITOLO 2</b> .....	16
<b>2.1 Obiettivi e ipotesi sperimentali</b> .....	16
<b>CAPITOLO 3</b> .....	17
<b>3.1 Partecipanti</b> .....	17
<b>3.2 Stimoli</b> .....	17
<b>3.3 Paradigma sperimentale e procedura</b> .....	19
<b>3.4 Risultati</b> .....	23
<b>CAPITOLO 4</b> .....	26
<b>4.1 Discussione</b> .....	26
<b>4.2 Conclusioni</b> .....	32
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	33



## CAPITOLO 1

### 1.1 Introduzione

La Risonanza Stocastica (RS) è un fenomeno, apparentemente controintuitivo, che si verifica quando la presenza di una quantità ottimale di rumore, inteso come interferenza casuale, contribuisce a migliorare la rilevazione di stimoli deboli e sottosoglia nei sistemi dinamici<sup>1</sup> non lineari<sup>2</sup>.

In origine il meccanismo della Risonanza Stocastica è stato elaborato nell'ambito della climatologia con il fine di spiegare la periodicità delle ere glaciali terrestri. Nel 1981 un gruppo di ricercatori italiani ha intuito che il rumore dovuto alle fluttuazioni termiche della Terra, unito a variazioni di eccentricità dell'orbita terrestre, fosse in grado di amplificare il segnale di queste ultime (di per sé troppo debole) e determinare il passaggio da uno stato glaciale a uno interglaciale (Wiesenfeld & Moss, 1995; Benzi, Parisi, Sutera & Vulpiani, 1983).

In seguito, l'esistenza di questo fenomeno è stata dimostrata in un'ampia gamma di sistemi fisici e biologici non lineari (Benzi, 2010).

#### 1.1.1 Il meccanismo della RS

Nel presente elaborato si affronta il fenomeno di Risonanza Stocastica nell'ambito dei sistemi biologici e per spiegarne il funzionamento si può fare riferimento ai seguenti elementi: una soglia, un segnale sottosoglia e del rumore aggiuntivo (Simonotto et al., 1997).

Prendendo in considerazione la Figura 1.1 si può osservare che il segnale sottosoglia (rappresentato dalla curva sinusoidale rossa), preso singolarmente, è troppo debole e non riesce mai a superare la soglia (riga tratteggiata orizzontale), risultando quindi inefficace nel provocare una risposta nel sistema.

---

<sup>1</sup> Un sistema dinamico è un modello matematico utilizzato per descrivere l'evoluzione nel tempo di un fenomeno fisico. Per descrivere un sistema dinamico si individuano le variabili di ingresso, le variabili di uscita e le leggi che regolano l'evoluzione del sistema (Treccani. Sistema dinamico. *Enciclopedia della matematica*, 2013).

<sup>2</sup> Un sistema non lineare è un sistema dinamico in cui gli output del sistema non sono proporzionali agli input. I sistemi non lineari possono essere utilizzati per descrivere diversi fenomeni nell'ambito della fisica, della biologia, dell'ingegneria e delle scienze sociali (Drazin, *Nonlinear Systems*, 1992).

Tuttavia, quando si aggiunge del rumore (linea irregolare), i picchi del segnale si avvicinano alla linea tratteggiata e si aumenta la probabilità che il segnale unito al rumore superi la soglia. In questo modo si può aumentare il contenuto informativo del segnale in questione o migliorarne la rilevazione.

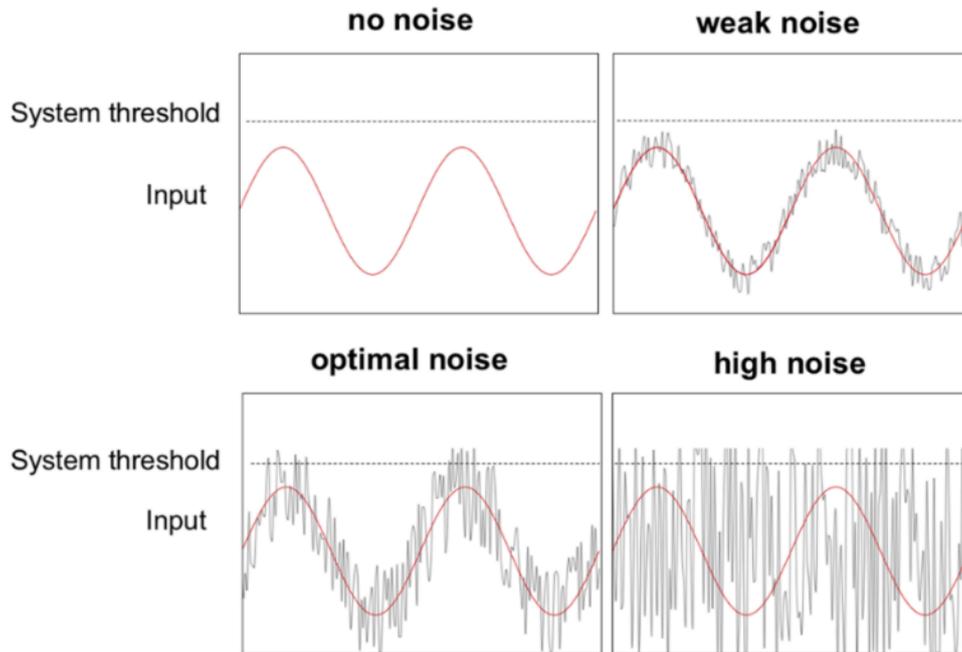


Figura 1.1: Nella figura sono illustrati una soglia (linea orizzontale tratteggiata) e un segnale (curva sinusoidale) in quattro diverse condizioni di rumore (linea irregolare) (van der Groen et al., 2018).

### 1.1.2 Aspetti essenziali della RS

Riprendendo la definizione iniziale, gli aspetti chiave che definiscono il fenomeno della Risonanza Stocastica e fanno sì che si manifesti sono essenzialmente tre: un sistema non lineare, uno stimolo sottosoglia e una ottimale quantità di rumore.

#### 1.1.2.1 Sistemi non lineari

Affinché un sistema possa beneficiare degli effetti del rumore ed esibire il fenomeno di RS è necessario che sia un sistema non lineare.

Occorre quindi fare una distinzione tra sistemi lineari e non lineari.

In un sistema lineare l'output è dato da una porzione dell'input più una costante. L'output del sistema può essere previsto abbastanza facilmente e nel processamento di segnali in sistemi lineari la massimizzazione della performance è raggiunta in assenza di rumore.

I sistemi non lineari, invece, sono più complessi perché un cambiamento degli input non produce un cambiamento proporzionale degli output. Si tratta di sistemi più imprevedibili in cui, tuttavia, l'aggiunta di rumore può determinare effetti controintuitivi come l'amplificazione del segnale di output (McDonnell & Abbott, 2009; Fallon, 2017; "Explained: Linear and nonlinear systems". MIT News, 2018).

### **1.1.2.2 Stimolo sottosoglia**

Proseguendo, è importante definire il concetto di soglia. In psicofisica la soglia assoluta corrisponde al valore di intensità di uno stimolo per cui quest'ultimo viene rilevato con una probabilità pari al 50% (Gescheider, *Psychophysics: the fundamentals*. Psychology Press, 2013).

Uno stimolo o segnale sottosoglia, invece, si caratterizza per essere troppo debole per produrre una risposta in un sistema ed essere rilevato. Ad esempio, nell'ambito del sistema nervoso un segnale sottosoglia è un segnale che non è in grado di produrre un impulso neuronale (Masoliver & Masoller, 2018).

Se in un sistema non lineare si aggiunge del rumore ad un segnale sottosoglia, il segnale può essere spinto oltre la soglia e diventare maggiormente rilevabile per effetto della Risonanza Stocastica.

L'effetto di RS non occorre invece nel caso di stimoli sopra soglia, perché l'incremento di rumore contribuisce solo a degradare ulteriormente il segnale di output (Fallon, 2017). Questo è evidenziato, ad esempio, nello studio di van der Groen e Wenderoth in ambito di percezione visiva: l'aggiunta di rumore a stimoli sopra soglia risulta in una performance di detezione uguale o in alcuni casi peggiore rispetto a una condizione senza rumore (van der Groen & Wenderoth, 2016).

Un requisito fondamentale affinché si manifesti il fenomeno di RS è quindi che il segnale sia sottosoglia, in caso contrario l'aggiunta di rumore non comporta benefici nella rilevabilità.

### 1.1.2.3 Rumore

“Rumore” è un termine che di solito viene utilizzato per descrivere un’interferenza indesiderata o fluttuazioni casuali che possono interferire con il processamento dei segnali.

L’effetto del rumore, tuttavia, può essere diverso a seconda che si tratti di un sistema lineare o un sistema non lineare. Nel caso di un sistema lineare il rumore crea interferenza e disordine. Al contrario, in un sistema non lineare il rumore può interagire con la non linearità e comportare dei benefici a livello di processamento dei segnali. In questo contesto il rumore può essere sfruttato per amplificare segnali deboli per effetto della Risonanza Stocastica (McDonnell & Abbott, 2009).

L’aggiunta di rumore, tuttavia, deve seguire alcuni criteri affinché si manifesti il fenomeno di Risonanza Stocastica. Un aspetto fondamentale, ad esempio, è che il rumore sia aggiunto in una quantità ottimale.

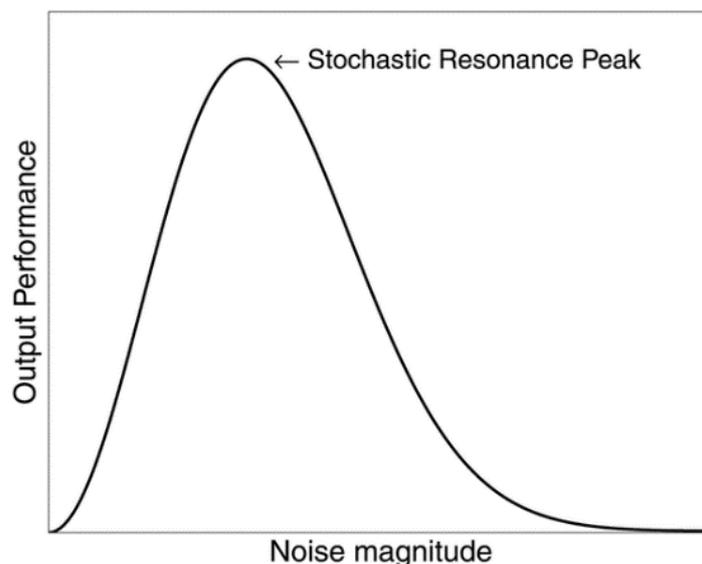
Come è illustrato nella Figura 1.1 mostrata in precedenza, se il livello di rumore aggiunto risulta troppo basso, il segnale continua a non superare la soglia e non si può trarre alcun beneficio; al contrario, se il livello di rumore è eccessivamente alto può degradare il contenuto del segnale e portare a una situazione in cui non si riesce a distinguere il segnale dal rumore.

Una quantità ottimale di rumore, invece, è in grado di massimizzare la rilevazione del segnale (Moss, Ward, & Sannita, 2004).

La RS di solito si riscontra osservando la variazione del rapporto tra segnale e rumore (SNR, *signal-to-noise ratio*). Il SNR è ottenuto come rapporto tra intensità del segnale di uscita e intensità del rumore ed esibisce un massimo per certe intensità di rumore (Cappellini, *Appunti di Econofisica. Con esempi ed esercizi svolti*, 2008).

Il SNR fornisce una misura della performance e tipicamente si riscontra che il miglioramento del segnale varia seguendo una curva a U invertita, che rappresenta il tratto distintivo del fenomeno di RS.

La curva, illustrata in Figura 1.2, mostra come la miglior performance nella rilevazione di un segnale si raggiunga aggiungendo livelli intermedi di rumore, che rappresentano quindi i livelli ottimali (van der Groen & Wenderoth, 2016).



*Figura 1.2: Curva di variazione della performance in funzione del livello di rumore (McDonnell & Abbott, 2009).*

## **1.2 RS e Sistema nervoso**

Gli effetti del rumore sono stati studiati in diversi sistemi fisici e biologici non lineari.

In particolare, nell'ambito dei sistemi biologici, il sistema nervoso è risultato predisposto a manifestare il fenomeno della Risonanza Stocastica.

I neuroni e le reti neurali, infatti, presentano comportamenti non lineari e il rumore è una caratteristica intrinseca del sistema nervoso.

Il rumore interno può avere origine da diverse fonti, ad esempio dalle fluttuazioni nel rilascio dei neurotrasmettitori, dai canali di membrana che si aprono e si chiudono, dai potenziali di membrana che fluttuano, dal numero di recettori postsinaptici che si attivano, dalle concentrazioni di ioni.

Secondo un'ipotesi, i sistemi nervosi si sarebbero evoluti includendo il rumore al proprio interno come vantaggio per l'elaborazione, secondo un'altra, i sistemi nervosi si sarebbero adattati a trarre i maggiori vantaggi dalle proprie componenti già in origine intrinsecamente rumorose (Itzcovich, Riani & Sannita, 2017; Gluckman et al., 1996).

Siccome in ogni livello del sistema nervoso è presente una certa quantità di rumore interno, è stato ipotizzato che anch'esso possa contribuire al fenomeno di RS migliorando la trasmissione dell'informazione. Questo suggerisce che nello studio della Risonanza Stocastica sia importante considerare sia il rumore esterno che il rumore interno.

Mentre sono molteplici gli studi che dimostrano gli effetti del rumore esterno, risulta invece più difficile fornire evidenza della RS interna. Tuttavia, in alcuni studi in cui l'effetto di RS risulta nel complesso significativo, si è visto che a livello individuale non tutti i soggetti mostrano un livello significativo di Risonanza Stocastica per effetto di rumore esterno.

Il fatto che la RS esterna si manifesti potrebbe dipendere dall'interazione tra rumore esterno e interno. Un'ipotesi è che la RS esterna non si verifichi quando il livello individuale di rumore interno è alto, forse perché quest'ultimo è già uguale al livello ottimale di rumore e quindi l'aggiunta di rumore esterno porta solamente a un peggioramento della performance (Kitajo et al., 2003; Aihara et al., 2010).

### **1.3 RS nei sistemi sensoriali**

I ricercatori hanno intuito che la RS potesse svolgere un ruolo funzionale nei sistemi sensoriali dal momento che i neuroni sensoriali sono simili a sistemi a soglia non lineari e operano in presenza di rumore per rilevare segnali.

Gli studi nell'ambito della biologia sensoriale si sono evoluti a partire dai singoli recettori per poi arrivare alle reti neurali del sistema nervoso centrale. I risultati hanno mostrato che l'aggiunta di rumore può migliorare l'attività neurale a ogni livello dei sistemi sensoriali e può quindi svolgere una funzione importante nella percezione sensoriale (Aihara et al., 2010).

Una delle prime evidenze della RS nei sistemi sensoriali è stato lo studio sui meccanorecettori della pinna caudale del gambero *Protocambarus clarkii* (Douglass, Wilkens, Pantazelou & Moss, 1993). Le cellule ciliate della pinna del gambero sono specializzate per rilevare deboli movimenti periodici dell'acqua che possono essere prodotti ad esempio da un predatore. Nell'esperimento in questione le cellule sensoriali sono state stimulate dalla combinazione di uno stimolo meccanico troppo debole per produrre una risposta unito a una fonte di rumore esterno. I risultati hanno mostrato chiaramente che un segnale debole può essere amplificato per effetto del rumore a livello di singoli neuroni sensoriali. L'amplificazione dell'informazione disponibile nel sistema nervoso periferico, grazie all'aggiunta di rumore esterno, può diventare utile per evitare un predatore (Moss, Ward, & Sannita, 2004).

In linea con quanto dimostrato a livello di singole cellule sensoriali, gli effetti della RS sono stati riscontrati anche a livello di sistemi più complessi come quelli per il processamento delle informazioni sensoriali nell'uomo.

Diversi studi psicofisici hanno studiato come il sistema percettivo umano faccia uso dell'effetto del rumore.

Ad esempio, nell'ambito del sistema somatosensoriale si è osservato che l'abilità di un individuo di rilevare uno stimolo tattile sottosoglia può essere migliorata significativamente dall'aggiunta di una determinata quantità di rumore (Collins et al., 1996; Richardson et al., 1998). Anche la sensibilità del sistema uditivo può essere incrementata grazie al fenomeno di RS (Zeng et al., 2000; Jaramillo & Wiesenfeld, 1998). Molte ricerche, inoltre, si sono focalizzate sull'effetto del rumore nella percezione visiva (Simonotto et al., 1997).

#### **1.4 RS nel sistema visivo**

Il sistema visivo presenta caratteristiche coerenti con la teoria della Risonanza Stocastica. L'informazione nel sistema visivo è elaborata in parallelo e i neuroni coinvolti operano come dei sistemi a soglia utilizzando meccanismi lineari e non lineari (Moss, Ward, & Sannita, 2004).

I neuroni possono esibire non linearità sia a livello di sinapsi che a livello di dendriti e questo consente loro di eseguire un'elaborazione locale prima che gli input vengano sommati e raggiungano l'assone. Questo meccanismo è essenziale per una corretta elaborazione delle informazioni (Koch & Segev, 2000).

La percezione visiva, inoltre, ha un funzionamento complesso che comprende livelli di processamento più alti in cui è coinvolta la cognizione, ma include anche livelli computazionali più bassi in cui vengono elaborate caratteristiche visive più semplici, tra le quali il contrasto.

Il substrato neurale per l'elaborazione del contrasto è stato trovato nei neuroni della corteccia visiva primaria (Kundu & Sarkar, 2010).

Diversi ricercatori hanno indagato la relazione tra percezione visiva e RS attraverso paradigmi di detezione del contrasto.

Uno dei primi studi in questo ambito è quello di Simonotto et al. (1997), in cui si è studiata la capacità del sistema visivo umano di interpretare dettagli visivi in immagini a basso contrasto contaminate da diverse intensità di rumore.

È stato realizzato un esperimento psicofisico in cui gli stimoli erano rappresentati da una sequenza di immagini digitalizzate su una scala di grigi.

Ciascuna sequenza presentata era costituita da immagini che diminuivano progressivamente di contrasto alle quali veniva aggiunto un determinato livello di rumore scelto casualmente tra diversi livelli. Ogni presentazione era caratterizzata da un diverso livello di rumore.

I partecipanti dovevano riconoscere una determinata caratteristica dell'immagine e si misurava la soglia di contrasto oltre alla quale non potevano più distinguerla.

I risultati hanno mostrato che i partecipanti ottengono soglie più elevate per intensità basse e alte di rumore, mentre raggiungono soglie più basse e quindi migliori per intensità intermedie di rumore. Questo ha suggerito un possibile effetto della RS nel migliorare la percezione visiva di immagini sottosoglia (Simonotto et al., 1997).

In uno studio successivo Simonotto e colleghi hanno anche dimostrato, utilizzando la risonanza magnetica funzionale, che nella stimolazione visiva una quantità ottimale di rumore produce una maggiore attività corticale (Simonotto et al., 1999).

#### **1.4.1 Reticoli di luminanza**

Un'area della ricerca ha indagato il ruolo del rumore nella sensibilità al contrasto utilizzando stimoli *Gabor patch*, reticoli di luminanza sinusoidale presentati attraverso una finestra gaussiana o più in generale reticoli di luminanza distribuita secondo un profilo sinusoidale. Si tratta di stimoli più semplici, ideali per stimolare i neuroni della corteccia visiva primaria sensibili all'orientazione e alle variazioni di contrasto.

In alcuni paradigmi sperimentali il rumore è stato applicato direttamente allo stimolo visivo, in altri il rumore è stato applicato alla corteccia visiva attraverso stimolazione elettrica o magnetica.

Nello studio di Kundu e Sarkar (2014), ad esempio, i ricercatori hanno utilizzato un protocollo a scelta forzata (2IFC) in un compito di detezione visiva impiegando come stimoli reticoli sinusoidali circolari.

La sensitività al contrasto è stata studiata in funzione di diversi livelli di intensità di rumore visivo aggiunto allo stimolo e diverse frequenze spaziali dei reticoli.

Ai partecipanti venivano presentati sequenzialmente due intervalli e dovevano indicare quale intervallo contenesse lo stimolo oltre che al rumore. Gli stimoli erano presentati sottosoglia in modo che senza l'aggiunta del rumore fossero invisibili.

I risultati hanno mostrato che la soglia di contrasto dipende dall'intensità del rumore e varia seguendo la curva a U tipica del fenomeno di RS. Le soglie diminuiscono raggiungendo un minimo per intensità intermedie di rumore per poi aumentare nuovamente per livelli più elevati di rumore.

Si è anche osservato che la sensitività al contrasto è migliore per frequenze spaziali intermedie dei reticoli.

Nel complesso lo studio ha dimostrato un miglioramento della performance di detezione dovuto alla presenza del rumore attraverso l'effetto della RS.

Risultati comparabili a quelli appena riportati sono stati ottenuti da altri studi che hanno impiegato stimoli simili per valutare la sensibilità al contrasto (Goris et al., 2008; Kundu & Sarkar, 2010).

Altri studi hanno fornito evidenze circa la possibilità di migliorare la performance di detezione del contrasto applicando del rumore alla corteccia visiva attraverso stimolazione transcranica elettrica (van der Groen & Wenderoth, 2016) o magnetica (Yamazaki & Lioumis, 2022).

Wenderoth e colleghi (2016) nel loro lavoro, oltre ad aver replicato i risultati di studi precedenti aggiungendo rumore visivo direttamente agli stimoli, hanno testato un paradigma in cui il rumore veniva applicato centralmente alla corteccia visiva per mezzo di *transcranial random noise stimulation* (tRNS).

Sono stati utilizzati stimoli *Gabor patch* e i partecipanti dovevano svolgere un compito di detezione con una scelta forzata tra due intervalli. La Gabor poteva comparire in una di otto posizioni, disposte circolarmente intorno a una croce di fissazione centrale, nel primo o nel secondo intervallo e i partecipanti dovevano indicare quale intervallo contenesse lo stimolo target.

I risultati hanno confermato che l'aggiunta di una quantità ottimale di rumore alla corteccia visiva, attraverso la stimolazione con tRNS, è in grado di migliorare l'accuratezza nella detezione degli stimoli Gabor. Coerentemente con ciò che caratterizza

la RS, il miglioramento della performance si è verificato solo nel caso di stimoli sottosoglia, mentre negli stimoli sopra soglia l'aggiunta di rumore non ha comportato maggiori benefici.

I ricercatori hanno anche trovato che l'intensità ottimale di rumore varia tra gli individui.

### **1.5 Applicazioni cliniche del rumore**

Come si è visto in numerosi studi, il rumore è una componente fondamentale dei sistemi biologici e se sfruttato nel modo giusto può avere un impatto positivo nel migliorare la trasmissione dell'informazione in tali sistemi. Questo suggerisce che l'effetto di RS dovuto all'aggiunta di rumore possa essere sfruttato anche in ambito clinico per la prevenzione e il trattamento di alcuni disturbi.

L'effetto del rumore potrebbe essere utile nella riabilitazione e si ipotizza che possa determinare miglioramenti a lungo termine nella performance.

Tecniche basate sul rumore, ad esempio, sono state utilizzate nell'ambito di pazienti con deficit sensoriali per migliorare la detezione di determinati segnali (Sejdić & Lipsitz, 2013).

L'area della ricerca che indaga il fenomeno di RS in popolazioni cliniche e che esplora strategie per ottenere benefici clinici utilizzando il rumore richiede maggiori sviluppi, tuttavia, alcuni studi hanno ottenuto risultati incoraggianti.

Alcuni ricercatori, ad esempio, hanno proposto una strategia per migliorare la codifica degli impianti cocleari aggiungendo deliberatamente rumore ai segnali che arrivano all'impianto (Morse & Evans, 1996).

Un altro studio ha scoperto che l'aggiunta di rumore può migliorare la stabilità posturale di individui anziani, suggerendo la possibilità di realizzare dispositivi, come ad esempio scarpe con inserti che vibrano, in grado di migliorare il controllo motorio di persone con difficoltà (Priplata et al., 2002).

Per quanto riguarda la visione, Itzcovich e colleghi hanno verificato che l'aggiunta di rumore visivo può migliorare la performance di detezione di lettere sottosoglia in individui con severi disturbi della visione.

Nello studio in questione sono stati utilizzati stimoli visivi costituiti da riquadri contenenti caratteri alfabetici ai quali sono stati aggiunti sei livelli di rumore visivo. Per ciascun soggetto è stato identificato il primo valore di contrasto al di sotto della soglia.

Ai soggetti sono quindi stati presentati set di lettere sottosoglia, aventi diversi livelli di rumore, con il compito di riconoscere le lettere presentate.

I risultati hanno dimostrato che l'aggiunta di una quantità ottimale di rumore gaussiano incrementa la quantità di lettere sottosoglia riconosciute da soggetti con gravi deficit visivi (Itzcovich, Riani & Sannita, 2017).

Questi dati suggeriscono che la RS possa essere utilizzata come strategia per migliorare il processamento visivo di individui con deficit della visione.

## CAPITOLO 2

### 2.1 Obiettivi e ipotesi sperimentali

Considerando quanto emerge dallo studio della letteratura esistente si può affermare che il fenomeno della RS svolga un ruolo nel migliorare la detezione di stimoli deboli e sottosoglia quando viene aggiunta una quantità ottimale di rumore.

L'obiettivo dello studio presentato in questo elaborato è quello di approfondire l'effetto del rumore nel sistema visivo umano.

In particolare, ci si propone di replicare i risultati dei diversi studi affrontati nel capitolo introduttivo e si ipotizza che l'aggiunta di una quantità ottimale di rumore visivo possa migliorare la detezione di stimoli *Gabor patch*, quando il loro contrasto, diminuendo, scende al di sotto della soglia. Ci si aspetta di osservare, quindi, una variazione della performance che segue la curva a U tipica del fenomeno di RS, a indicare che a intensità intermedie di rumore la detezione migliora per poi peggiorare nuovamente a livelli più alti di rumore.

Il secondo aspetto che si intende prendere in considerazione è l'interazione tra il rumore e la posizione in cui viene presentato lo stimolo, ipotizzando che la posizione possa determinare differenze nell'effetto del rumore.

Attraverso il paradigma sperimentale utilizzato in questo studio, si vuole inoltre esplorare se l'effetto del rumore possa avere dei risvolti utili da un punto di vista clinico. La scelta del compito che viene impiegato all'interno del protocollo sperimentale NRT (*Neuro Restoration Therapy*), infatti, nasce dalla volontà di verificare se l'effetto della Risonanza Stocastica possa essere sfruttato per rendere il training più allenante e determinare effetti positivi nella riabilitazione di pazienti con deficit visivi.

In questa ricerca sperimentale, tuttavia, si è preso in considerazione un campione di persone con visione normale o corretta, proponendosi di studiare preliminarmente l'eventuale facilitazione della detezione del contrasto mediata dalla Risonanza Stocastica con persone normovedenti.

## CAPITOLO 3

### 3.1 Partecipanti

Il campione sperimentale è costituito da 13 soggetti sani, di cui 6 maschi ( $\sigma = 0,894$ ) e 7 femmine ( $\sigma = 12,77$ ), di età compresa tra i 23 e 58 anni.

Tutti i partecipanti presentano un'acuità visiva nella norma o corretta.

Lo studio è stato preliminarmente esaminato e approvato dal Comitato Etico dell'Università degli studi di Padova (protocollo n. 92-b) e si è svolto in conformità con quanto affermato nella Dichiarazione di Helsinki.

Inoltre, ogni partecipante ha visionato e firmato il modulo del consenso informato.

### 3.2 Stimoli

Il computer utilizzato per la raccolta dati è un HP notebook 250 G6 – Core i3 6006U – RAM DDR4 4GB – HDD500GB – LED 15,6” – Windows 10 PRO. Il gamma del monitor è stato corretto al valore 1.

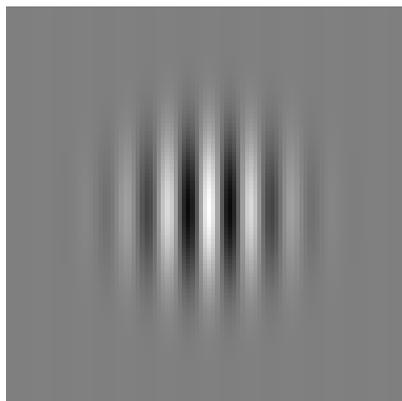
Gli stimoli che sono stati utilizzati in questo studio sperimentale sono rappresentati da stimoli *Gabor Patch* con orientazione di  $0^\circ$  (verticale) e presentati in modo statico.

Per *Gabor Patch* si intende un reticolo sinusoidale modulato da una funzione gaussiana, la figura 3.1 ne illustra un esempio.

Questi stimoli sono spesso utilizzati in ambito di percezione visiva poiché hanno caratteristiche simili ai campi recettivi dei neuroni nella corteccia visiva primaria e pertanto sono in grado di attivare in modo ottimale il sistema visivo.

La Gabor è caratterizzata da lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), fase ( $\varphi$ ) e deviazione standard ( $\sigma$ ) dell'involuppo gaussiano di luminanza nello spazio ( $x, y$ ) dell'immagine e può essere ricavata attraverso la seguente formula:

$$G(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}X + \varphi\right) e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right)}$$



*Figura 3.1: Stimolo Gabor patch con orientazione verticale*

Gli stimoli Gabor utilizzati in questo studio sperimentale sono presentati su uno sfondo grigio uniforme e hanno una frequenza spaziale di 1 ciclo per grado, la dimensione della finestra di 14 gradi e la durata di presentazione dello stimolo è di 200 ms.

Al fine di studiare l'eventuale effetto della Risonanza Stocastica dovuto alla presenza del rumore, sono state create cinque condizioni in cui diversi livelli di rumore visivo sono stati aggiunti direttamente agli stimoli Gabor.

È stata inoltre inclusa una condizione di controllo con stimoli senza rumore, per un totale di sei condizioni.

Per quanto riguarda l'aggiunta di rumore agli stimoli Gabor il processo è il seguente.

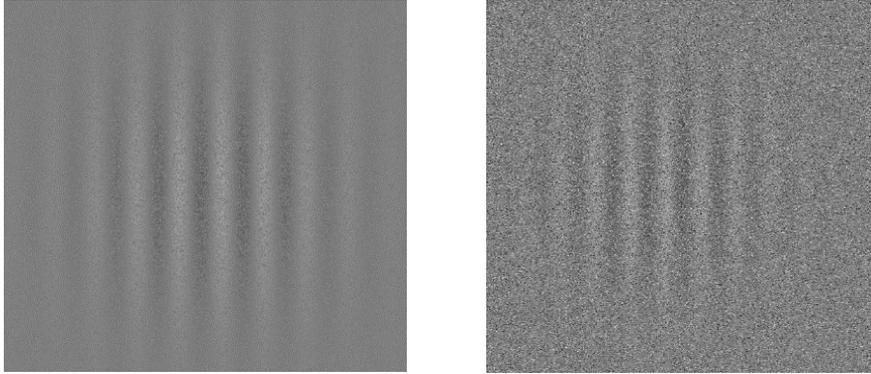
Ad ogni pixel dello stimolo Gabor si attribuisce il 50% di probabilità di essere un pixel con rumore. Quindi al termine del processo si ottiene un 50% di pixel senza rumore e un 50% di pixel con rumore e queste proporzioni rimangono uguali per tutte le condizioni.

Per modificare la quantità di rumore nelle diverse condizioni, a metà pixel che formano l'immagine Gabor viene assegnato un valore casuale di grigio preso all'interno di una distribuzione gaussiana con media 0 e deviazione standard che può assumere i valori di 0,05; 0,25; 0,45; 0,65; 0,85. La deviazione standard di 0,05 corrisponde alla condizione con minor rumore, mentre quella di 0,85 indica la condizione con maggior rumore.

Con una deviazione standard più bassa l'intensità del grigio viene presa tra valori simili a quello del pixel senza rumore.

Con una deviazione standard più alta i valori vengono presi da una distribuzione gaussiana tale per cui i valori di grigio si discostano di più dal valore di grigio del pixel senza rumore; quindi, i pixel possono assumere grigi più intensi.

Quando la deviazione standard è alta i grigi sono più intensi e il risultato è una maggior quantità di rumore applicata alla Gabor.



*Figura 3.2: La figura rappresenta due livelli esemplificativi di rumore. Nell'immagine a sinistra è riportata la Gabor in presenza del livello di rumore che corrisponde a una deviazione standard di 0,05, nell'immagine a destra il livello di rumore corrisponde a una deviazione standard di 0,45.*

### **3.3 Paradigma sperimentale e procedura**

Nell'ambito di questa ricerca si è deciso di adottare un compito comportamentale che riprende la struttura di base del compito utilizzato nel protocollo sperimentale NRT (*Neuro Restoration Therapy*), apportando alcune modifiche al fine di adattarlo a indagare l'effetto del rumore.

Questa scelta comporta un doppio vantaggio: da un lato, grazie alla struttura del compito, permette di indagare come cambia l'effetto del rumore a seconda che lo stimolo sia presentato in una posizione più o meno periferica del campo visivo, dall'altro permette di studiare se l'effetto del rumore possa avere un risvolto positivo eventualmente esplorabile in ambito clinico attraverso il training NRT.

L'NRT è un protocollo sperimentale che viene utilizzato per la riabilitazione visiva di pazienti con cecità corticale. Si tratta perlopiù di pazienti con emianopsia, deficit della visione dovuto a un danno post-chiasmatico che comporta la perdita di metà del campo visivo, o pazienti con otticopatie, deficit visivi dovuti a danni pre-chiasmatici.

L'NRT consiste in un training che mira a ridurre il campo visivo cieco e a potenziare il *blindsight* (visione cieca).

Il training consiste in un compito di detezione di stimoli Gabor a basso contrasto presentati in diverse posizioni del campo visivo. Solitamente le posizioni in cui possono comparire gli stimoli sono quattro e variano sulla base del campo visivo del paziente: una è situata nella parte vedente del campo visivo, una nel campo visivo cieco e due lungo la zona di transizione tra la parte vedente e quella non vedente. Le prime due posizioni sono solitamente più periferiche, mentre le altre due sono situate più centralmente.

L'obiettivo principale è quello di allenare le posizioni lungo la zona di transizione per recuperare alcuni gradi di campo visivo, e tali posizioni possono essere progressivamente spostate verso la zona cieca del campo visivo sulla base della riduzione delle soglie durante l'allenamento (Casco et al., 2018).

Il training NTR si basa sul fenomeno dell'apprendimento percettivo (*perceptual learning*), ovvero la capacità di migliorare la performance in compiti visivi grazie alla pratica ripetuta. L'apprendimento percettivo in un compito visivo specifico può generalizzarsi ad altri stimoli e può determinare benefici a lungo termine che coinvolgono la plasticità neurale delle aree sensoriali di pazienti con deficit visivi. (Campana & Maniglia, 2015).

Uno degli obiettivi dello studio presentato in questo elaborato è quello di esplorare delle strategie basate sull'effetto della RS per scoprire se il training NRT possa essere migliorato e reso più efficace nella riabilitazione visiva dei pazienti.

Nonostante qui si prenda in analisi un campione di persone normovedenti, si è adottata una struttura del compito che riprende quella del training NRT e sono quindi state create due diverse condizioni relative alle posizioni degli stimoli. Una parte dei partecipanti ha eseguito il compito con posizioni degli stimoli che sono state replicate per imitare quelle in cui verrebbero presentati gli stimoli di un allenamento NRT per un paziente con emianopsia destra. L'altra parte dei partecipanti, invece, ha eseguito il compito utilizzando posizioni che simulano un allenamento NRT di un paziente con emianopsia sinistra.

Il test, che ha le stesse caratteristiche in entrambe le condizioni, è costituito da sei sessioni, ognuna delle quali differisce dalle altre per la quantità di rumore che viene applicato agli stimoli.

L'esperimento si articola nelle modalità di seguito illustrate.

Innanzitutto, il partecipante legge e compila il modulo del consenso informato e si verifica che soddisfatti i criteri di inclusione prestabiliti, ovvero un'acuità visiva normale o corretta alla norma e un'età superiore a 18 anni.

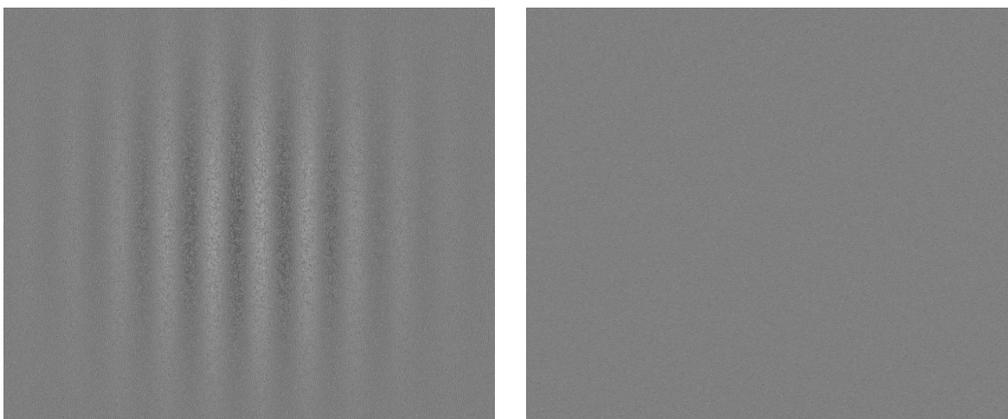
L'esperimento si svolge poi in un ambiente predisposto per essere tranquillo e privo di illuminazione, nel quale il partecipante viene invitato a prendere posto di fronte a uno schermo disposto a 57 centimetri dall'osservatore, distanza calcolata in modo che un centimetro sullo schermo corrisponda a un grado di angolo visivo.

Una volta spiegato il funzionamento del compito, la procedura viene ulteriormente illustrata con una breve dimostrazione e poi il test ha inizio.

Il partecipante deve mantenere lo sguardo fisso su una croce di fissazione posta al centro dello schermo e gli viene richiesto di eseguire un compito di detezione visiva dello stimolo Gabor attraverso una scelta forzata tra due intervalli temporali (*Two-interval forced choice*, 2IFC).

Vengono presentati due suoni e in corrispondenza di ciascuno di essi può comparire alternativamente un riquadro contenente solo rumore oppure un riquadro contenente rumore e lo stimolo Gabor.

Il partecipante deve premere il tasto *z* se il riquadro contenente la Gabor è presentato in corrispondenza del primo suono, oppure il tasto *m* se è presentato con il secondo suono.



*Figura 3.3: Nell'immagine a sinistra è rappresentato un esempio di riquadro contenente rumore e lo stimolo target. Nell'immagine di destra si ha un riquadro contenente solo rumore.*

*In queste immagini è stato riportato il primo livello di rumore che corrisponde a una deviazione standard di 0,05.*

In seguito, un feedback acustico segnala al partecipante se la risposta data è corretta o meno.

La Gabor viene presentata in modo statico e con orientazione di  $0^\circ$  (verticale).

Essa presenta un valore iniziale di contrasto di Michelson di 0,3 e questo valore varia a seconda della risposta del partecipante al fine di calcolare la soglia di contrasto dello stimolo. In questa procedura adattiva viene impiegato il metodo della scala (*staircase one-up three-down*). Sono richieste tre risposte corrette consecutive per far diminuire il contrasto dello stimolo, ma basta una risposta sbagliata per far aumentare di un passo il contrasto. Utilizzando questo algoritmo la soglia viene fissata al valore di contrasto dello stimolo Gabor che produce il 79,4% di rilevamenti corretti (Levitt, 1971).

Lo stimolo Gabor può comparire in quattro posizioni periferiche differenti, due posizioni più vicine alla zona centrale del campo visivo e due collocate più perifericamente.

Nella condizione che riproduce il caso di un'emianopsia destra le posizioni sono le seguenti: (6 4), (6 -4) e (12 0), (-12 0).

Lo zero corrisponde alla croce di fissazione. Il primo numero indica l'eccentricità in gradi (deg) lungo l'asse x, mentre il secondo numero indica l'eccentricità lungo l'asse y.

Per quanto riguarda l'asse x i numeri negativi si riferiscono a posizioni a sinistra del punto di fissazione, nel caso dell'asse y invece i numeri negativi fanno riferimento a posizioni collocate sopra al punto di fissazione (Casco et al., 2018).

Nell'altra condizione che simula una emianopsia sinistra le posizioni sono (-6 4) e (-6 -4), (12 0) e (-12 0).

Ogni blocco termina dopo 60 *trials*, per una durata di circa dieci minuti, e i dati vengono inviati online al laboratorio.

Questo processo si ripete per ciascuna delle sei condizioni, le quali vengono attivate dallo sperimentatore in modo randomizzato.

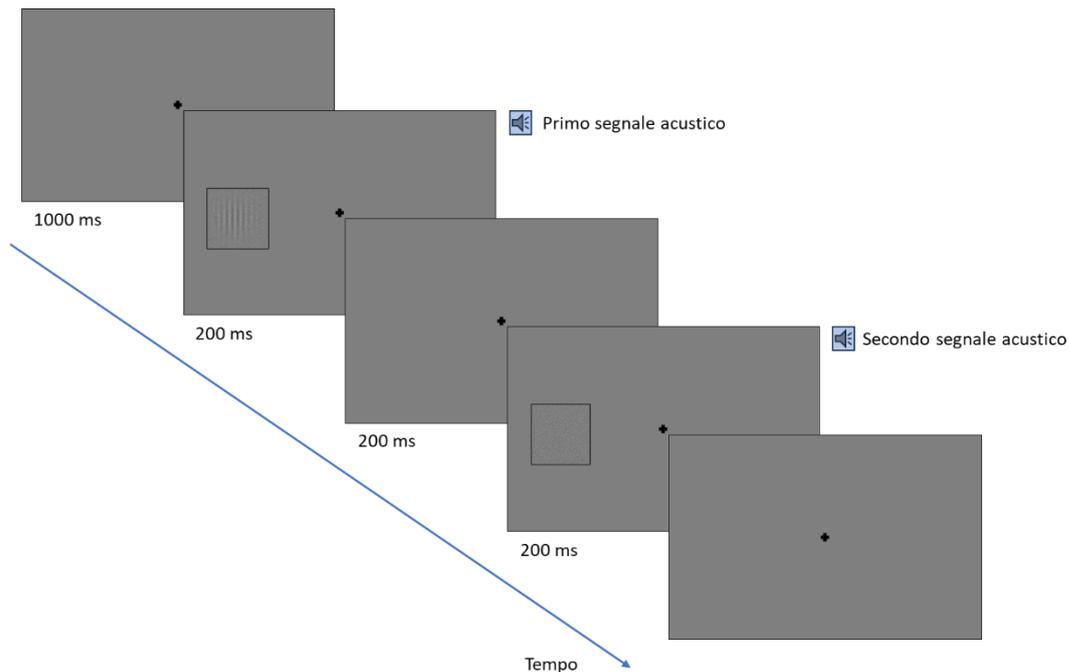


Figura 3.4: La figura riassume il funzionamento di un singolo trial esemplificativo. Sono illustrate le schermate che si susseguono e la durata di presentazione in millisecondi. Il riquadro contenente la Gabor e quello contenente solo rumore sono rappresentati incorniciati da un contorno nero che non era presente nel trial, ma che serve solo a scopo illustrativo per l'individuazione degli stimoli.

### 3.4 Risultati

Nell'esperimento descritto in questo elaborato è stata analizzata la soglia di contrasto come statistica per studiare l'effetto del rumore sulla performance di detezione.

Per contrasto si intende la differenza di luminanza tra zone chiare e scure.

Se si prende in considerazione un pattern periodico come quello di uno stimolo *Gabor patch* allora il contrasto può essere definito nel seguente modo:

$$\text{contrasto} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

$L_{max}$  è la luminanza massima del pattern, mentre  $L_{min}$  è la luminanza minima (Purghé et al., *La percezione visiva*. UTET università, 1999).

Per determinare se ci fossero differenze nelle soglie di detezione legate al livello di rumore visivo aggiunto allo stimolo e alla posizione dello stimolo è stata condotta un'ANOVA a misure ripetute con l'intensità del rumore come fattore entro i soggetti

(6 livelli di rumore: 0,05; 0,25; 0,45; 0,65; 0,85) e la posizione degli stimoli come fattore entro i soggetti (4 livelli).

È stato scelto questo tipo di test parametrico perché si dispone di un campione singolo in cui per ogni unità statistica sono state compiute più misurazioni.

Prendendo in considerazione il fattore rumore, il Test della sfericità di Mauchly è risultato significativo, a indicare che è stato violato l'assunto di sfericità, il quale richiede che la varianza delle differenze tra le misurazioni effettuate sullo stesso soggetto sia approssimativamente la stessa.

È stata quindi applicata la correzione dei gradi di libertà di  $\varepsilon$  utilizzando Greenhouse-Geisser, che è la più conservativa.

In questo modo si è trovato che il fattore rumore risulta significativo ( $F_{(8,113,953)} = 44.547, p_{corr} < 0.001, \eta^2 p = 0.712$ ).

Il p-value corretto ( $p_{corr}$ ), infatti, è minore di 0.001 e quindi inferiore alla soglia fissata di  $\alpha = 0.05$ .

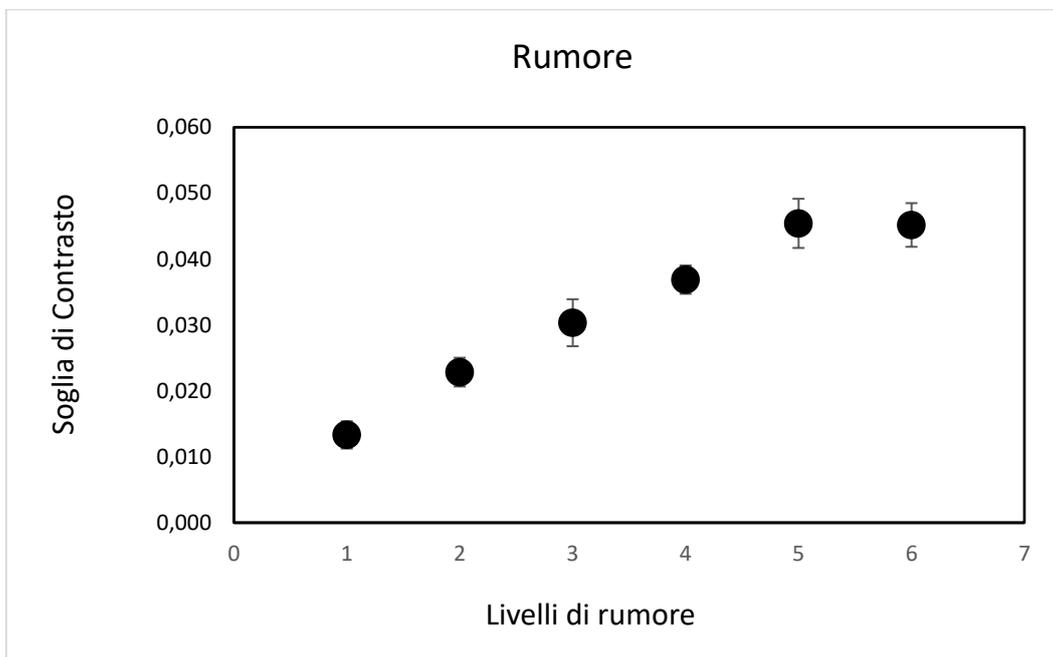


Figura 3.5: Il grafico rappresenta la variazione delle soglie di contrasto in funzione del livello di rumore. Sull'asse delle ascisse sono riportati i livelli di rumore, sull'asse delle ordinate sono riportate le soglie di contrasto.

Il grafico riportato nella figura 3.5 presenta i livelli di rumore sull'asse orizzontale e la soglia di contrasto sull'asse verticale.

Come si può evincere si è trovata una relazione direttamente proporzionale tra l'aumento di rumore e l'aumento delle soglie di contrasto.

Soglie basse corrispondono a migliori performance di detezione, mentre soglie più alte indicano una prestazione peggiore.

I partecipanti hanno ottenuto prestazioni migliori nella condizione 1, ovvero quella in cui la Gabor viene presentata in assenza di rumore. Invece si può osservare come, aumentando progressivamente la quantità di rumore visivo di condizione in condizione, la prestazione di detezione degli stimoli peggiori. Il peggioramento è indicato dal fatto che i partecipanti ottengono soglie di contrasto più elevate.

Per quanto riguarda invece l'effetto del fattore posizione ( $F_{(3,36)} = 0.385, p = 0.765, \eta^2 p = 0.031$ ) e l'effetto dell'interazione rumore  $\times$  posizione ( $F_{(15,180)} = 1.268, p = 0.23, \eta^2 p = 0.096$ ), essi non sono risultati significativi. Il p-value di entrambi, infatti, è maggiore di 0.05.

Si può quindi inferire che la posizione, più o meno periferica, in cui viene presentata la Gabor non interviene nel modulare l'effetto del rumore all'interno di una condizione.

Inoltre, non si hanno differenze legate all'effetto della posizione tra i vari livelli di rumore.

## CAPITOLO 4

### 4.1 Discussione

Il presente elaborato ha inteso studiare il fenomeno della Risonanza Stocastica per effetto del rumore nella percezione visiva.

Nello specifico, l'obiettivo che ha guidato lo studio è stato quello di verificare se l'impiego del rumore visivo potesse migliorare la detezione di stimoli Gabor sottosoglia e potesse quindi rappresentare una strategia eventualmente interessante da approfondire in ambito clinico.

Più precisamente lo studio è stato portato avanti con la più ampia prospettiva di utilizzare il rumore visivo per rendere maggiormente efficace il training NTR, un protocollo sperimentale di riabilitazione visiva che utilizza per l'appunto stimoli Gabor.

Un approfondito studio della letteratura in merito al fenomeno di RS nel sistema visivo ha portato alla formulazione di due ipotesi principali.

Innanzitutto, si è ipotizzato che l'aggiunta di una quantità ideale di rumore visivo a uno stimolo Gabor sottosoglia ne migliorasse la detezione. Si è quindi supposto che l'accuratezza nella detezione variasse seguendo la curva a U tipica del fenomeno di RS.

In secondo luogo, si è ipotizzato che la presentazione dello stimolo in posizioni diverse del campo visivo potesse determinare delle variazioni dell'effetto del rumore.

Per verificare queste ipotesi sperimentali è stato condotto un esperimento comportamentale basato su un compito di detezione del contrasto mediante una scelta forzata tra due intervalli temporali (2IFC). La soglia di contrasto si è misurata con la scala (staircase) *one-up three-down*.

Per analizzare i dati è stata poi condotta un'ANOVA a misure ripetute con il livello di rumore e la posizione dello stimolo come variabili indipendenti e la soglia di contrasto come variabile dipendente e i risultati ottenuti sono i seguenti.

L'effetto del rumore è risultato significativo, a indicare che sono presenti delle differenze nelle soglie di contrasto dovute ai diversi livelli di rumore.

Tuttavia, è emerso che vi è una relazione lineare crescente tra quantità di rumore aggiunto e soglie di contrasto. L'aumento del rumore determina l'innalzamento delle soglie e conseguentemente il peggioramento della performance di detezione.

Contrariamente ai risultati ottenuti, ci si aspettava che le soglie variassero esibendo una curva a U, segno distintivo della Risonanza Stocastica, ovvero fossero più alte per livelli bassi e alti di rumore e più basse per livelli intermedi.

Non è stata quindi osservata una facilitazione visiva dovuta all'aggiunta di rumore, anzi quest'ultimo, in questo caso specifico, produce l'effetto di peggiorare la detezione di stimoli Gabor sottosoglia.

Prendendo poi in considerazione la posizione di presentazione dello stimolo e l'interazione tra livello di rumore e posizione non è emerso alcun effetto significativo.

Ci si sarebbe potuto aspettare che l'effetto del rumore fosse più marcato nelle posizioni meno periferiche, tuttavia, sembra che la posizione non intervenga ad alterare l'effetto del rumore e che questo valga per tutti e sei i livelli di rumore.

Per riassumere, i risultati ottenuti dall'analisi dei dati hanno portato a smentire entrambe le ipotesi sperimentali inizialmente formulate.

Alla luce dei risultati ottenuti si può quindi condurre un'analisi per cercare di comprendere quali fattori possano rappresentare delle criticità nel momento in cui si studia l'effetto del rumore nella percezione visiva. Occorre infatti sottolineare che il fenomeno Risonanza Stocastica si manifesta solo in determinate condizioni e che, essendo molti i fattori che entrano in gioco, potrebbero esserci diverse ragioni che impediscono la manifestazione del fenomeno.

Oltre a questo, la percezione visiva segue di per sé meccanismi molto complessi e questo costituisce un ulteriore aspetto di difficoltà da tenere in conto quando si studia l'effetto del rumore in questo ambito.

Di seguito si passeranno quindi in rassegna alcuni dei motivi che potrebbero spiegare l'assenza di un miglioramento della performance visiva per effetto del rumore nel caso specifico di questo studio.

Il primo aspetto da prendere in considerazione sono i livelli di rumore.

Per definizione la RS è un fenomeno che si verifica quando una ottimale quantità di rumore contribuisce a migliorare la detezione di un segnale debole.

I livelli di rumore che vengono aggiunti allo stimolo devono quindi essere scelti in modo tale che il livello ottimale ricada tra di essi.

Se si applicano quantità di rumore troppo basse o troppo alte il fenomeno di RS potrebbe non verificarsi.

Quando i livelli di rumore sono troppo bassi l'effetto del rumore può essere nullo, mentre livelli eccessivamente alti possono degradare lo stimolo e peggiorare il suo rilevamento. Il caso dello studio presentato in questo elaborato potrebbe essere proprio quest'ultimo. È plausibile che i livelli di rumore scelti siano troppo elevati e questo spiegherebbe il peggioramento della performance di detezione direttamente proporzionale all'aumento della quantità di rumore.

I livelli scelti potrebbero quindi essere inadeguati e una possibilità potrebbe essere che il livello ottimale di rumore sia un livello intermedio racchiuso nell'intervallo tra l'assenza di rumore e il primo livello di rumore ( $\sigma = 0,05$ ).

Questa eventualità potrebbe essere approfondita con un ulteriore studio in cui i livelli di rumore vengono scelti all'interno di tale intervallo.

Altri due fattori che vanno tenuti in considerazione sono il tipo di stimolo e la posizione di presentazione dello stimolo.

È possibile che alcuni stimoli visivi non siano appropriati per generare l'effetto di RS, allo stesso modo, anche la posizione di presentazione in alcuni casi potrebbe influenzare negativamente l'effetto del rumore.

Nel presente studio la scelta dello stimolo e delle posizioni in cui presentarlo si è basata sull'analisi della letteratura, la quale ha fornito evidenze circa l'effetto di Risonanza Stocastica in percezione visiva mediante l'utilizzo di stimoli Gabor o reticoli di luminanza e presentando gli stimoli in posizioni periferiche.

Lo studio preso come principale punto di riferimento per quanto riguarda stimoli e posizione è quello di Wenderoth e colleghi (2016).

In tale studio si è utilizzato lo stesso tipo di stimoli impiegati nel presente lavoro, ovvero stimoli *Gabor patch* presentati attraverso una finestra circolare e con orientazione verticale.

In quello studio, inoltre, le Gabor sono state presentate in otto diverse posizioni disposte circolarmente intorno alla croce di fissazione, e similmente, nell'esperimento descritto in questa tesi gli stimoli sono stati presentati in quattro posizioni periferiche.

Utilizzando quel tipo di impostazione in Wenderoth et al. (2016) si è ottenuto un miglioramento della detezione dovuto alla Risonanza Stocastica.

Considerando quanto appena detto, quindi, sembra che il tipo di stimolo e la posizione non rappresentino la principale criticità dello studio descritto in questo elaborato.

Un ulteriore aspetto che potrebbe influire sull'effetto di Risonanza Stocastica riguarda il modo in cui il rumore viene aggiunto agli stimoli.

In letteratura non viene sempre spiegato approfonditamente il processo attraverso cui i ricercatori applicano il rumore visivo agli stimoli.

Ad esempio, nel lavoro di Wenderoth e colleghi (2016) non è molto chiaro questo procedimento. Nel presente studio il rumore è stato aggiunto attraverso il processo spiegato nel dettaglio nel capitolo relativo agli stimoli; tuttavia, questo processo potrebbe differire da quello utilizzato in Wenderoth et al. (2016).

Inoltre, analizzando le immagini esemplificative degli stimoli riportate in Wenderoth et al. (2016) una differenza potrebbe essere che il rumore è stato applicato solo alla finestra circolare che contiene il reticolo sinusoidale, mentre nel presente studio il rumore è stato applicato a un intero riquadro contenente la Gabor.

È quindi possibile che differenze nel modo in cui viene creato e aggiunto il rumore comportino che il fenomeno di Risonanza Stocastica si manifesti o meno e questo aspetto potrebbe riguardare da vicino il presente studio.

Un altro fattore di criticità nello studio della Risonanza Stocastica sono le differenze individuali, le quali possono influire in modo sostanziale nell'esecuzione dell'esperimento. Le differenze più rilevanti in questo studio potrebbero essere quelle legate alla sensibilità al contrasto e al livello di rumore interno.

Gli individui presentano differenze nella sensibilità al contrasto.

Uno studio, ad esempio, ha osservato che soggetti con una maggiore estensione della corteccia visiva primaria (V1) tendono ad avere una migliore sensibilità al contrasto, mentre coloro che hanno un'estensione minore di V1 hanno anche una minore sensibilità al contrasto (Himmelberg et al., 2022).

Le fonti di differenze nella sensitività al contrasto possono essere diverse. Un altro studio, ad esempio, ha individuato il guadagno di contrasto del sistema visivo come principale motivo di differenze individuali nella sensitività al contrasto (Baker, 2013).

Il guadagno di contrasto è il meccanismo che sottostà alla capacità del sistema visivo di adattarsi al variare del contrasto di luminanza nell'ambiente (Yuguo Yu & Tai Sing Lee, 2004).

Differenze nella sensitività al contrasto si riflettono nella performance di detezione comportando anche possibili conseguenze sull'effetto del rumore.

Alcuni studi (Wenderoth et al., 2016; Battaglini et al., 2023), prima di procedere con il compito, conducono una valutazione della soglia individuale di contrasto al fine di stabilire la *baseline* della prestazione di ogni individuo; il fatto che nel presente studio questo procedimento non sia stato messo in atto potrebbe rappresentare un elemento da tenere in considerazione.

Anche per quanto riguarda il rumore interno possono essere osservate delle differenze individuali. Come si è già detto precedentemente, si ipotizza che anche il rumore interno contribuisca a migliorare la trasmissione dell'informazione. Quindi l'effetto della Risonanza Stocastica dipenderebbe dall'interazione tra rumore interno e rumore esterno. Alcuni studi (Kitajo et al., 2003) hanno trovato che, a parità di condizioni sperimentali, non tutti i soggetti ottengono un effetto significativo di Risonanza Stocastica e il motivo sembra essere legato al rumore interno. Alcuni individui hanno un livello di rumore interno più alto, che probabilmente è già uguale al livello ottimale, e di conseguenza l'aggiunta di ulteriore rumore esterno porta solo a una degradazione della performance. Nel presente studio si è analizzato un campione ridotto, quindi non è escluso che l'effetto di peggioramento della performance dovuto al rumore sia in realtà determinato dal fatto che molti dei partecipanti scelti hanno alti livelli di rumore interno e per questo motivo non traggono benefici dall'aggiunta di rumore esterno (Aihara et al., 2010).

In aggiunta alle criticità legate allo studio del rumore e alle differenze individuali ulteriori limiti possono essere individuati nella ridotta ampiezza del campione e nella natura comportamentale dello studio.

Un campione di maggiori dimensioni fornirebbe una maggiore variabilità e consentirebbe di fare stime più affidabili circa l'effetto indagato. L'effetto del rumore, tuttavia, è risultato ampiamente significativo anche con un campione ridotto.

Inoltre, come in ogni studio comportamentale, la misura della performance non permette di inferire in modo diretto i processi fisiologici che sono coinvolti in un compito, a questo scopo sarebbe utile l'utilizzo di tecniche di neuroimmagine.

Considerando quanto si è appena detto è evidente che i fattori che possono influenzare l'effetto del rumore siano molti e non siano sempre facili da controllare.

Lo studio presentato in questo elaborato non è riuscito a replicare le osservazioni di altre ricerche che dimostrano la Risonanza Stocastica, nonostante ciò, i risultati ottenuti sono comunque importanti per individuare quali possano essere gli aspetti più critici a cui prestare attenzione quando si studia l'effetto del rumore visivo utilizzando stimoli Gabor. In ogni caso, portare avanti la ricerca nell'ambito degli effetti del rumore nei sistemi biologici è di rilevante importanza per almeno due motivi principali: da un lato è possibile comprendere più a fondo i processi fisiologici del sistema nervoso e come funzioni la trasmissione dei segnali, dall'altro lo studio del rumore è importante per le sue implicazioni nell'ambito clinico.

Molti studi hanno dimostrato che il rumore può comportare benefici in termini di miglioramento della performance nei sistemi sensoriali e questo implica che tecniche basate sull'utilizzo del rumore possano essere molto utili nell'ambito della riabilitazione e trattamento di pazienti con disturbi sensoriali (Sejdić et al., 2013).

Nel campo della percezione visiva l'effetto di RS potrebbe essere sfruttato per migliorare la visione di pazienti con deficit visivi.

A questo riguardo, il presente studio ha analizzato l'effetto del rumore in percezione visiva nell'ottica di poter sfruttare in futuro i suoi eventuali benefici nel training riabilitativo NRT.

Altri studi (Itzcovich, Riani & Sannita, 2017) hanno già indagato l'effetto di Risonanza Stocastica con campioni clinici ottenendo risultati promettenti; tuttavia, la ricerca richiede ancora ulteriori sviluppi per quanto riguarda l'implementazione di tecniche concrete basate sull'utilizzo del rumore.

## **4.2 Conclusioni**

Lo studio presentato in questo elaborato si è proposto di indagare come l'effetto del rumore influenzi la percezione visiva e a questo scopo si sono utilizzati stimoli Gabor perché importanti per possibili sviluppi della ricerca nel campo clinico.

I risultati ottenuti non hanno confermato le ipotesi iniziali: l'effetto di Risonanza Stocastica, infatti, non si è manifestato. Contrariamente a quanto ci si aspettasse, l'effetto del rumore è risultato significativo nel produrre un progressivo peggioramento della capacità di rilevare il contrasto.

Considerando la complessità del fenomeno di Risonanza Stocastica, non si può escludere che una diversa manipolazione delle variabili sperimentali possa portare a risultati coerenti a quelli ottenuti da altri studi che hanno dimostrato il fenomeno di RS.

In ogni caso, il rumore presenta grandi potenzialità sia per comprendere la fisiologia della trasmissione dell'informazione sia come potenziale strumento dalle applicazioni cliniche, per questo motivo è fondamentale che studi futuri portino avanti la ricerca in questo campo.

## BIBLIOGRAFIA

Aihara, T., Kitajo, K., Nozaki, D. & Yamamoto, Y. (2010). How does stochastic resonance work within the human brain? – Psychophysics of internal and external noise. *Chemical Physics*, Volume 375, Issues 2–3, 616-624.

Baker D. H. (2013). What is the primary cause of individual differences in contrast sensitivity? *PloS one*, 8(7), e69536.

Battaglini, L., Casco, C., Fertoni, A., Miniussi, C., Di Ponzio, M., & Vicovaro, M. (2023). Noise in the brain: Transcranial random noise stimulation and perceptual noise act on a stochastic resonance-like mechanism. *The European journal of neuroscience*, 57(12), 2097–2111.

Benzi, R. (2010). Stochastic resonance: from climate to biology. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(5), 431-441.

Benzi, R., Parisi, G., Sutera, A., & Vulpiani, A. (1983). A Theory of Stochastic Resonance in Climatic Change. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 43(3), 565–578.

Campana, G., & Maniglia, M. (2015). Editorial: Improving visual deficits with perceptual learning. *Frontiers in psychology*, 6, 491.

Casco, C., Barollo, M., Contemori, G., & Battaglini, L. (2018). Neural Restoration Training improves visual functions and expands visual field of patients with homonymous visual field defects. *Restorative neurology and neuroscience*, 36(2), 275–291.

Collins, J. J., Imhoff, T. T., & Grigg, P. (1996). Noise-enhanced tactile sensation. *Nature*, 383(6603), 770.

Douglass, J. K., Wilkens, L., Pantazelou, E., & Moss, F. (1993). Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance. *Nature*, 365(6444), 337–340.

Drazin, P. (1992). Introduction. In *Nonlinear Systems* (Cambridge Texts in Applied Mathematics, pp. 1-47). Cambridge: Cambridge University Press.

Fallon, James Bernard (2017). Stochastic resonance in biological systems. Monash University. Thesis.

Gescheider, G. A. (2013). *Psychophysics: the fundamentals*. Psychology Press.

Giancarlo Cappellini, *Appunti di Econofisica. Con esempi ed esercizi svolti*. Aracne editrice, 2008.

Gluckman, B. J., Netoff, T. I., Neel, E. J., Ditto, W. L., Spano, M. L., & Schiff, S. J. (1996). Stochastic Resonance in a Neuronal Network from Mammalian Brain. *Physical review letters*, 77(19), 4098–4101.

Goris, R. L., Zaenen, P., & Wagemans, J. (2008). Some observations on contrast detection in noise. *Journal of vision*, 8(9), 1–15.

Himmelberg, M. M., Winawer, J., & Carrasco, M. (2022). Linking individual differences in human primary visual cortex to contrast sensitivity around the visual field. *Nature communications*, 13(1), 3309.

Itzcovich, E., Riani, M. & Sannita, W.G. (2017). Stochastic resonance improves vision in the severely impaired. *Sci Rep* 7, 12840.

Jaramillo, F., & Wiesenfeld, K. (1998). Mechanoelectrical transduction assisted by Brownian motion: a role for noise in the auditory system. *Nature neuroscience*, 1(5), 384–388.

Kitajo, K., Nozaki, D., Ward, L. M., Yamamoto, Y. (2003), *Phys. Rev. Lett.* 90, 218103.

Koch, C., & Segev, I. (2000). The role of single neurons in information processing. *Nature neuroscience*, 3 Suppl, 1171–1177.

Kundu, A., & Sarkar, S. (2010). A possible model of noise enhanced visual perception in human vision. *arXiv preprint arXiv:1008.0230*.

Kundu, A., & Sarkar, S. (2014). Role of noise in human visual perception: A psychophysical study. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences (IOSR-JPBS)*, Volume 9, Issue 3 Ver. II, 93-100.

Levitt, H. (1971). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 467.

- Masoliver, M., Masoller, C. (2018). Sub-threshold signal encoding in coupled FitzHugh-Nagumo neurons. *Sci Rep* 8, 8276.
- McDonnell, M. D., & Abbott, D. (2009). What is stochastic resonance? Definitions, misconceptions, debates, and its relevance to biology. *PLoS computational biology*, 5(5), e1000348.
- Morse, R. P., & Evans, E. F. (1996). Enhancement of vowel coding for cochlear implants by addition of noise. *Nature medicine*, 2(8), 928–932.
- Moss, F., Ward, L. M., & Sannita, W. G. (2004). Stochastic resonance and sensory information processing: a tutorial and review of application. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 115(2), 267–281.
- Priplata, A., Niemi, J., Salen, M., Harry, J., Lipsitz, L. A., & Collins, J. J. (2002). Noise-enhanced human balance control. *Physical review letters*, 89(23), 238101.
- Purghé, F., Stucchi, N., & Olivero, A. (1999). *La percezione visiva*. UTET università.
- Richardson, K. A., Imhoff, T. T., Grigg, P., & Collins, J. J. (1998). Using electrical noise to enhance the ability of humans to detect subthreshold mechanical cutaneous stimuli. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 8(3), 599–603.
- Sejdić, E., & Lipsitz, L. A. (2013). Necessity of noise in physiology and medicine. *Computer methods and programs in biomedicine*, 111(2), 459–470.
- Simonotto, E., Riani, M., Seife, C., Roberts, M., Twitty, J., & Moss, F. (1997). Visual perception of stochastic resonance. *Physical Review Letters*, 78, 1186.
- Simonotto, E., Spano, F., Riani, M., Ferrari, A., Levvero, F., Pilot, A., ... & Moss, F. (1999). fMRI studies of visual cortical activity during noise stimulation. *Neurocomputing*, 26, 511-516.
- van der Groen, O., & Wenderoth, N. (2016). Transcranial Random Noise Stimulation of Visual Cortex: Stochastic Resonance Enhances Central Mechanisms of Perception. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 36(19), 5289–5298.

van der Groen, O., Tang, M. F., Wenderoth, N., & Mattingley, J. B. (2018). Stochastic resonance enhances the rate of evidence accumulation during combined brain stimulation and perceptual decision-making. *PLoS computational biology*, 14(7), e1006301.

Wiesenfeld, K., & Moss, F. (1995). Stochastic resonance and the benefits of noise: from ice ages to crayfish and SQUIDS. *Nature*, 373(6509), 33–36.

Yamazaki, H. & Lioumis, P. (2022). Stochastic resonance at early visual cortex during figure orientation discrimination using transcranial magnetic stimulation. *Neuropsychologia*, Volume 168, 108174.

Yu, Y., & Lee, T. S. (2005). Adaptive contrast gain control and information maximization. *Neurocomputing*, 65, 111-116.

Zeng, F. G., Fu, Q. J., & Morse, R. (2000). Human hearing enhanced by noise. *Brain research*, 869(1-2), 251–255.

Larry Hardesty, “Explained: Linear and nonlinear systems.” MIT News Office, February 26, 2010. Retrieved from <https://news.mit.edu/2010/explained-linear-0226> on August 22<sup>nd</sup>, 2023.

Treccani. Sistema dinamico. *Enciclopedia della matematica* (2013). Retrieved from [https://www.treccani.it/enciclopedia/sistema-dinamico\\_%28Enciclopedia-della-Matematica%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/sistema-dinamico_%28Enciclopedia-della-Matematica%29/) on August 22<sup>nd</sup> 2023.