

# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE**



**Corso di Dottorato in**  
**Metodi, modelli e tecnologie per l'ingegneria**  
Curriculum Ambienti e tecnologie per l'attività motoria e la salute  
**Ciclo XXXV**

**Training di Neurofeedback per il miglioramento della  
memoria di lavoro e per la riduzione dell'ansia in un  
campione di studenti universitari**

**SSD M-PSI/01**

Coordinatore del Corso  
Chiar.mo Prof. Fabrizio Marignetti

Dottorando  
Giuseppe Valente

Supervisore  
Chiar.mo Prof. Pierluigi Diotaiuti

# Indice

## Introduzione

### 1 Il Neurofeedback

1.1. La rilevazione dell'attività elettrica del cervello

1.2 Anatomia e funzionalità dell'encefalo

1.3 Elettrodi per EEG e sistema di posizionamento standard 10/20

1.4 I tracciati del segnale EEG

1.5 L'analisi del tracciato EEG

1.6 Il Biofeedback ed il Neurofeedback

1.7 Il Neurofeedback in psicoterapia

### 2 Neurofeedback e memoria di lavoro

2.1 La memoria di lavoro

2.2 La valutazione della memoria di lavoro

2.3 Neurofeedback e memoria di lavoro

### 3 Neurofeedback e ansia

3.1 L'ansia in Neuropsicologia

3.2 Gli strumenti di valutazione dell'ansia

3.3 L'ansia dello studente

3.4 L'ansia nello sport

3.5 Neurofeedback e ansia

## 4 Neurofeedback e sport

4.1 Una revisione sistematica sul tema (2016-2023)

4.2 Gli interventi di Neurofeedback negli sport di tiro a segno

5 Studio sperimentale: Training di Neurofeedback per il miglioramento della memoria di lavoro e per la riduzione dell'ansia in un campione di studenti universitari

Conclusioni generali

Bibliografia

Appendice

## Introduzione

Il neurofeedback è una tecnica di intervento non invasiva che permette l'autoregolazione delle proprie onde cerebrali attraverso una maggiore consapevolezza della propria fisiologia. La persona visualizza in tempo reale le proprie onde cerebrali nello schermo di un computer direttamente collegato allo strumento che registra i segnali elettrofisiologici e fornisce un "feedback" di cosa sta accadendo in quel preciso istante. L'esercizio consiste nel favorire la produzione delle onde ottimali attraverso continui rinforzi, e quando la modificazione avviene nella direzione voluta, il soggetto viene premiato (con uno stimolo visivo, acustico o tattile). In questo modo, grazie ad un esercizio continuativo, la persona diventa in grado di praticare stabilmente questa forma di autocontrollo.

I dispositivi di rilevazione Neurofeedback sono in continua evoluzione offrendo, ad oggi, una maggiore portabilità, grazie alla tecnologia wireless, che li rende strumenti adatti alla ricerca ed intervento in più settori della Psicologia.

Oltre al settore clinico, di cui si conoscono i benefici ormai da molti anni (Berman & Nichols, 2019; Enriquez-Geppert et al, 2019; Hammond, 2005; Holtmann et al, 2014; Sterman & Egner, 2006), recentemente si stanno sviluppando training specifici per il miglioramento delle funzioni cognitive (Enriquez-Geppert et al, 2013; Taylor & Martz, 2023), sul benessere soggettivo (Pandey et al., 2022) e anche interventi nel campo della psicologia dello sport (Wang et al. 2019; 2020; 2022; Rydzik et al., 2023; Crivelli et al., 2019). In quest'ultimo campo, i training di Neurofeedback sviluppati sono stati spesso affiancati da altre tecniche innovative come la realtà virtuale e l'eye tracking (Schack, et al., 2020; Domingos et al., 2021).

In precedenza, i dispositivi di rilevazione con Neurofeedback (EEG) erano limitati da cavi e sensori delicati difficilmente utilizzabili in contesti di ricerca sul campo e nell'attività sportiva, principalmente per problemi di rilevazione che portavano ad una eccessiva presenza di artefatti. Il progresso tecnologico ha permesso di sviluppare, non soltanto dispositivi con tecnologia wi-fi, ma anche con rilevazione "dry" (senza soluzione salina o gel), migliorando la rilevabilità delle onde cerebrali anche durante l'attività sportiva.

Dallo studio della letteratura più recente è possibile dedurre che i dispositivi di rilevazione adatti al training di neurofeedback sono in continua evoluzione (Williams et al., 2020; Saulnier et al., 2022). Le aziende che producono le attrezzature per la rilevazione di Neurofeedback (e.g.

Medicom, Neuroelectrics, Thoughttech, Emotiv ecc.) stanno migliorando la sensibilità e la capacità di lettura dei dispositivi, anche in modalità wireless, in modo da poter ottenere una validità scientifica con certificazione, non solo per la ricerca, ma anche per l'utilizzo come dispositivi medici. La standardizzazione di tali strumenti andrebbe ad influire anche sulle attuali metodologie di rilevazione delle Neuroimmagini (e.g. fMRI, PET, SPECT, TMS ecc.) poiché il Neurofeedback EEG, in modalità wireless, risulta migliore in termini di portabilità, costi contenuti e innovazione continua.

Nel mio lavoro di tesi, ho suddiviso il contenuto in due parti principali: la prima si concentra sull'analisi dei processi mediante i quali il neurofeedback viene impiegato in vari contesti applicativi e di ricerca; la seconda parte, invece, comprende una revisione sistematica e uno studio sperimentale.

Nel primo capitolo, a seguito di una descrizione anatomica e funzionale dell'encefalo umano, viene trattato il segnale elettroencefalografico puntualizzando aspetti neurofisiologici, le sue componenti e proprietà. Inoltre viene spiegato il funzionamento del Biofeedback e del Neurofeedback come metodo di intervento sia in campo clinico che di ricerca. Particolare attenzione viene data alla spiegazione della gestione e del controllo delle sessioni di training, ad alcuni tra i protocolli più utilizzati ed agli effetti dei training riportati da alcuni dei più recenti studi in letteratura.

Nel secondo capitolo viene descritta la memoria di lavoro (working memory) definendo le sue funzioni ed i modelli esplicativi del suo funzionamento riportati in letteratura. Nel secondo paragrafo si discutono alcuni degli strumenti psicometrici più utili alla misurazione della memoria di lavoro. Infine, vengono riportati diversi studi che hanno utilizzato il Neurofeedback per il miglioramento cognitivo includendo anche la memoria di lavoro.

Il terzo capitolo è stato incentrato sulle componenti emotive e cognitive dell'ansia, ponendo l'attenzione sui modelli esplicativi di carattere neurofisiologico e sulle implicazioni a livello clinico. Nella seconda parte del capitolo vengono presentati diversi strumenti psicometrici attualmente disponibili nel contesto italiano per la misurazione dell'ansia e successivamente due approfondimenti sull'ansia dello studente universitario e sull'ansia nello sport. Infine sono stati esposti alcuni degli studi più recenti che hanno utilizzato il neurofeedback per ridurre i livelli di ansia.

Il quarto capitolo presenta una revisione sistematica sul tema “Neurofeedback e sport” in cui sono riportati gli studi presenti in letteratura che hanno messo in evidenza l’efficacia di questa tipologia di intervento nel campo dello sport.

Il quinto ed ultimo capitolo comprende lo studio sperimentale che ha indagato l’efficacia del training di Neurofeedback sul ritmo alpha per il miglioramento dei livelli memoria di lavoro e la riduzione dell’ansia in un gruppo di studenti sani.

Nelle conclusioni vengono esposti i limiti del lavoro e le prospettive per possibili futuri sviluppi di ricerca.

Il lavoro qui presentato, come precedentemente esposto, si propone di esplorare l’efficacia del neurofeedback come metodo d’intervento per migliorare la memoria di lavoro e ridurre i livelli di ansia in un gruppo di studenti universitari. La scelta di questo tema deriva dall’interesse crescente nell’applicazione del neurofeedback, una tecnica che si sta dimostrando efficace nel regolare l’attività cerebrale attraverso il feedback in tempo reale ed anche nell’influenzare le funzioni cognitive e emotive (Hammond, 2005).

Il primo obiettivo di questo lavoro è stato quello di approfondire la comprensione dei processi neurofisiologici sottostanti alla memoria di lavoro e all’ansia, esaminando i modelli teorici esistenti e la letteratura scientifica disponibile. Questa analisi dello stato dell’arte in letteratura fornisce una base teorica solida per valutare l’impatto potenziale del neurofeedback su queste aree di intervento. Alla luce di ciò, attraverso uno studio sperimentale si è applicato il neurofeedback focalizzato sul ritmo alpha, noto per la sua relazione con la memoria di lavoro e i livelli di ansia, su un gruppo di studenti sani per verificarne l’efficacia. Sono stati utilizzati strumenti psicometrici per valutare sia le capacità di memoria di lavoro sia i livelli di ansia prima e dopo il trattamento, per evidenziare eventuali cambiamenti dovuti all’intervento.

L’importanza di questo studio risiede nel fornire informazioni utili sul potenziale impiego del neurofeedback come strumento per migliorare le funzioni cognitive e gestire l’ansia negli studenti universitari, affrontando così tematiche rilevanti nel contesto accademico e nello sviluppo personale. I risultati ottenuti potranno favorire lo sviluppo di ulteriori applicazioni ed interventi nel contesto sportivo e della salute.

## **Capitolo primo**

### **Il Neurofeedback**

#### **1.1. La rilevazione dell'attività elettrica del cervello**

Il cervello è l'organo del corpo umano che gestisce i processi vitali più importanti. Numerosi studi hanno dimostrato che l'attività elettrica è alla base del controllo cerebrale. I primi dati sperimentali sull'elettrofisiologia risalgono agli studi settecenteschi di Luigi Galvani e Alessandro Volta, che posero le basi necessarie per comprendere le proprietà elettriche di tessuti come nervi e muscoli. Nel 1875, il medico Richard Caton fu il primo ad osservare l'attività elettrica spontanea nel cervello di alcuni animali da esperimento. Pochi anni dopo, il medico tedesco Hans Berger riuscì a registrare l'attività elettrica del cervello umano inserendo aghi di acciaio zincato nel tessuto sottocutaneo del cuoio capelluto mentre operava su un paziente. Da questa operazione comprese però che i difetti del cranio non erano sempre vantaggiosi per ottenere una corretta misurazione a causa ad esempio dell'ispessimento della dura madre e ritenne che tale registrazione potesse essere anche migliore attraverso il cranio intatto ed anche all'esterno del cuoio capelluto. Nel 1929 apparve il suo primo lavoro clinico registrato dallo scalpo del figlio Klaus. Nasceva così, ancora prima delle moderne tecniche di neuro-imaging, l'elettroencefalografia: il primo metodo di analisi non invasivo del cervello in grado di rilevarne anche le lesioni.

Berger (1933) pubblicò la sua ricerca con il titolo "On the Human Electroencephalogram" evidenziando come l'elettroencefalografia rappresenti una curva continua con oscillazioni nelle quali si possono distinguere grandi onde di primo ordine con una durata media di 90 ms e onde di secondo ordine più piccole di una durata di 35 ms. Tuttavia, gli elettrodi primitivi usati in questi studi si sono rivelati inadeguati perché erano molto invasivi e creavano un'alta impedenza tra gli elettrodi e la pelle. Pertanto, grazie alle pubblicazioni e all'esperienza di Berger, la tecnica è stata gradualmente perfezionata per consentire la registrazione simultanea di segnali provenienti da diverse regioni del cervello. Verso il 1935 fecero la loro comparsa i primi dispositivi EEG in commercio. Questi costituirono solo i predecessori iniziali di un

metodo destinato a inaugurare un lungo processo di sviluppo e miglioramento sotto diversi aspetti: praticità, precisione delle misurazioni e test poco invasivi.

La rilevazione dell'attività elettrica del cervello è fondamentale per comprendere la complessità dell'encefalo e il suo funzionamento.

## **1.2 Anatomia e funzionalità dell'encefalo**

L'encefalo è l'area del sistema nervoso centrale contenuta nel cranio, contiene i centri dell'olfatto, della vista, del suono, della sensibilità statica, nonché i centri associativi, integrativi e superiori della corteccia cerebrale.

Il cervello umano pesa circa 1400 grammi e contiene un numero enorme di neuroni che sono collegati tra loro tramite assoni e dendriti. Le cellule nervose insieme alle cellule gliali formano il tessuto neurale. Le cellule gliali superano il numero delle cellule nervose e svolgono la funzione di nutrire, sostenere e proteggere i neuroni.

Da un punto di vista anatomico (vedi Figura 1), l'encefalo si compone del tronco encefalico, del cervelletto e del prosencefalo, quest'ultimo suddiviso ulteriormente in telencefalo e diencefalo. Il tronco encefalico comprende il bulbo, il ponte e il mesencefalo. Il bulbo, noto anche come midollo allungato, costituisce la zona di transizione tra il midollo spinale e l'encefalo vero e proprio. La sua sostanza bianca contiene fasci ascendenti somatosensoriali, che portano informazioni sensoriali all'encefalo, e fasci discendenti corticospinali, che trasferiscono informazioni dalla corteccia cerebrale al midollo spinale. Nel bulbo avviene l'incrocio delle vie piramidali, i sistemi di vie nervose che hanno origine nella corteccia motoria e sono responsabili dell'esecuzione dei movimenti. Il ponte di Varolio, semplicemente detto "ponte", è una prominente protuberanza del tronco encefalico situata sopra il bulbo e al di sotto del mesencefalo. La sua funzione primaria è quella di instradare le informazioni scambiate tra il cervello e il cervelletto. La terza regione del tronco encefalico è il mesencefalo, una struttura di dimensioni ridotte e poco sviluppata che confina con il diencefalo. I suoi compiti principali includono il controllo dei movimenti oculari e la trasmissione di segnali per i riflessi uditivi e visivi.

Il cervelletto, situato alla base del prosencefalo sopra la nuca, rappresenta la seconda struttura per grandezza dell'encefalo. Tra le sue funzioni principali vi sono il controllo della

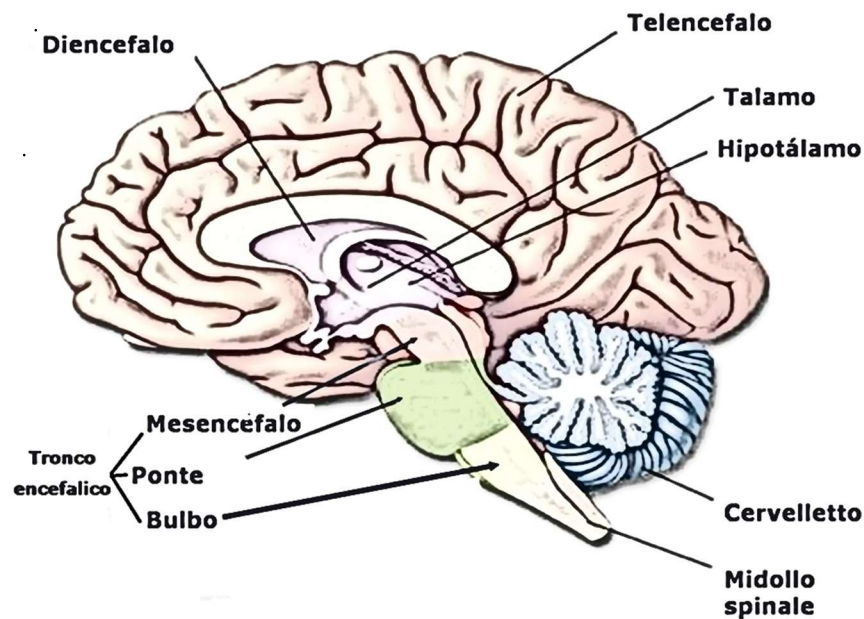


postura, il coordinamento muscolare e l'elaborazione delle informazioni sensoriali. Il cervelletto svolge anche un ruolo nelle funzioni cognitive. Nonostante il suo coinvolgimento in questo campo non sia ancora del tutto chiaro, è però noto che questa struttura è importante, ad esempio, per garantire buone capacità di linguaggio.

Il prosencefalo, più comunemente definito cervello, è costituito dal telencefalo, che comprende la corteccia cerebrale e i gangli della base, e dal diencefalo, cui appartengono il talamo e l'ipotalamo.

Il diencefalo si trova tra il tronco encefalico ed il telencefalo. È costituito da due parti principali, il talamo e l'ipotalamo, e contiene due strutture endocrine, l'ipofisi (ghiandola pituitaria) e l'epifisi (ghiandola pineale).

Figura 1

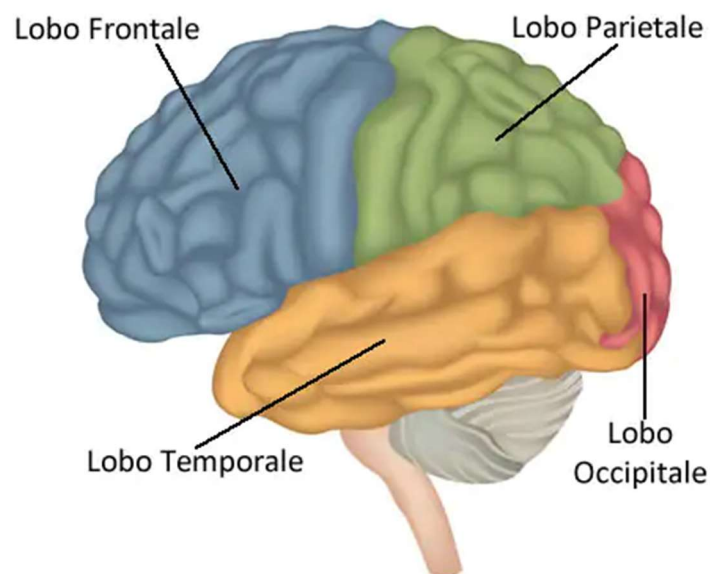


La corteccia cerebrale è il centro per l'integrazione delle informazioni sensoriali e il centro decisionale per molte risposte motorie. Se consideriamo la corteccia da un punto di vista funzionale, possiamo suddividerla in tre specializzazioni principali: aree sensoriali che ricevono informazioni sensoriali e le convertono in percezioni, aree motorie che controllano il movimento dei muscoli scheletrici ed aree associative (o corteccia associativa) che combinano

le informazioni provenienti dalle varie aree sensoriali e motorie e controllano le azioni volontarie. Il flusso di informazioni di solito segue un percorso che include una o più di queste aree.

Nell'essere umano la corteccia cerebrale presenta delle circonvoluzioni. È infatti notevolmente ripiegata al fine di poter contenere un'ampia superficie senza un aumento del volume del cervello. Le pieghe più profonde hanno il nome di scissure. All'interno della corteccia cerebrale umana, sono individuate quattro scissure principali: due laterali e due centrali, che delimitano i quattro lobi cerebrali: il lobo frontale, il lobo parietale, il lobo temporale e il lobo occipitale. Ogni lobo è successivamente suddiviso in emisferi destro e sinistro in base alla loro localizzazione emisferica.

Figura 2



Il lobo frontale occupa grande parte degli emisferi cerebrali ed è generalmente suddiviso in anteriore e posteriore; la parte posteriore, che contiene la corteccia motoria e quella premotoria, svolge compiti di pianificazione dei movimenti. La parte anteriore del lobo frontale, invece, presiede ad attività psichiche superiori, partecipa all'apprendimento, alla memoria e alla parola.

Il lobo parietale occupa la parte superiore e laterale dell'encefalo, presiede alla ricezione degli stimoli sensoriali tattili, del dolore, pressori e termici. Il lobo parietale sinistro ha ruoli primari sul destro, controlla il linguaggio parlato e scritto, la memoria delle parole, le capacità matematiche e di problem solving. Il lobo parietale destro presiede attività quali la ricostruzione di immagini visive, l'orientamento nello spazio, la percezione delle traiettorie degli oggetti e delle parti del corpo in movimento.

Il lobo temporale occupa la parte inferiore degli emisferi cerebrali, contiene il sistema limbico ed è diviso in lobi destro e sinistro. Il primo è responsabile dell'elaborazione del linguaggio parlato e della selezione delle parole (area di Wernicke), mentre il secondo elabora i suoni ambientali, informazioni, sequenze sonore e tono della voce. In generale, il lobo temporale elabora emozioni, sentimenti e concetti relativi alla percezione visiva e influenza le risposte istintive.

Il lobo occipitale, si trova nella parte posteriore del cervello. Il suo ruolo principale è quello di elaborare le immagini e i dettagli in esse contenuti e di estrarre informazioni sulla postura e l'equilibrio del corpo attraverso il sistema visivo.

Nel sistema EEG, gli elettrodi posizionati seguendo la convenzione 10/20 registrano l'attività neuronale, consentendo l'analisi delle connessioni neurali coinvolte nelle funzioni linguistiche, sensoriali ed emotive associate a queste regioni cerebrali.

### **1.3 Elettrodi per EEG e sistema di posizionamento standard 10/20**

Il sistema di registrazione dei segnali EEG, chiamato elettroencefalografo, è composto da una unità di acquisizione dei segnali misurati sullo scalpo, da una unità di elaborazione dei segnali e da una unità di visualizzazione/memorizzazione dei dati. L'unità di acquisizione adotta elettrodi di misura tipicamente alloggiati su di una apposita cuffia, oppure su un caschetto, i quali vengono adattati sulla testa del paziente. Il segnale è solitamente registrato da 16-24 paia di elettrodi, tenendo in considerazione che maggiore è il numero degli elettrodi, migliore sarà il segnale.

Nel trattamento di neurofeedback, tradizionalmente si adottano due tipologie di montaggio: unipolare e bipolare. Nel montaggio unipolare, l'elettrodo attivo viene posizionato sul cranio e il segnale da esso registrato viene confrontato con un secondo elettrodo, chiamato elettrodo di riferimento. La differenza tra l'attività rilevata dall'elettrodo attivo e quella dall'elettrodo di riferimento rappresenta l'attività cerebrale nell'elettrodo attivo.

Nel montaggio bipolare, invece, vengono utilizzati due elettrodi attivi, posizionati separatamente sul cranio. La differenza tra i segnali registrati da questi due elettrodi costituisce la base del neurofeedback (Dempster, 2012). Uno dei vantaggi della registrazione bipolare è la capacità di respingere le interferenze comuni durante la registrazione. Questo significa che eventuali artefatti esterni che possono presentarsi contemporaneamente su entrambi i canali vedono la loro ampiezza e fase sottratte, migliorando la selettività spaziale. Ad esempio, gli artefatti dovuti al movimento degli occhi e al battito delle palpebre possono essere ridotti attraverso questo metodo (Evans & Abarbanel, 1999).

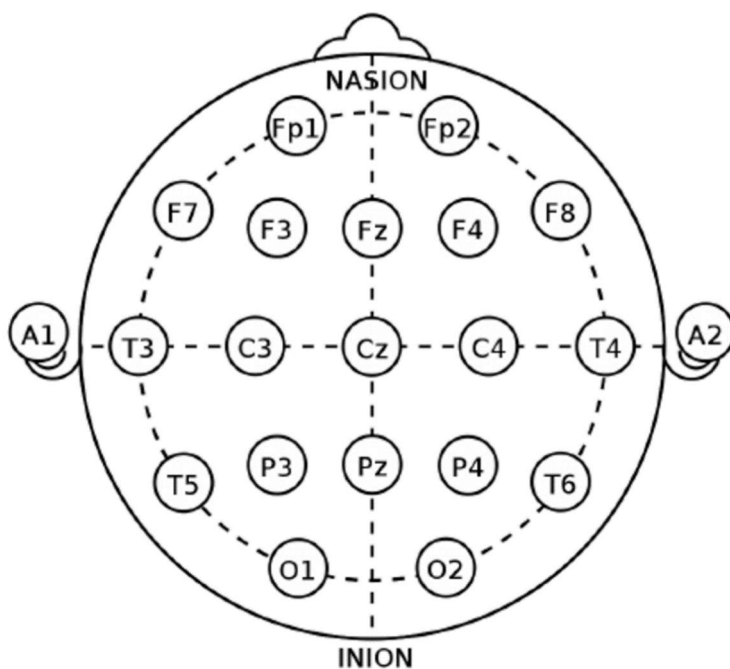
Gli elettrodi di superficie per EEG possono essere fissati alla cute con l'ausilio di collarini adesivi, di una fascia, di un caschetto o di una specifica cuffia. Alcuni dei tipi comuni di elettrodi includono:

- elettrodi secchi: non richiedono l'uso di gel conduttivo e possono essere facilmente posizionati sulla superficie del cuoio capelluto. Sono convenienti, ma potrebbero avere una conducibilità leggermente inferiore rispetto agli elettrodi bagnati;
- elettrodi bagnati: utilizzano un gel conduttivo o una pasta per migliorare la trasmissione del segnale elettrofisiologico. Di solito offrono una migliore conducibilità rispetto agli elettrodi secchi, ma richiedono una preparazione più accurata e potrebbero essere meno comodi per l'utente;
- elettrodi a cupola o a disco: hanno una superficie a forma di cupola o coppetta che viene applicata direttamente sulla pelle. Possono essere realizzati in vari materiali conduttivi e possono avere diversi diametri per adattarsi alle esigenze di registrazione;
- elettrodi a scalpello: hanno un design a scalpello che permette di penetrare leggermente nella superficie del cuoio capelluto. Questa caratteristica può aiutare a stabilizzare l'elettrodo e migliorare la qualità del segnale, sebbene a costo di una leggera scomodità;
- elettrodi ad anello o a clip: si attaccano attorno alle orecchie o alle tempie del paziente e sono utilizzati per misurare l'attività cerebrale in quelle regioni.

- elettrodi a secco attivi: sono una variazione degli elettrodi secchi, che includono componenti aggiuntivi per migliorare la sensibilità del segnale. Possono essere utilizzati per rilevare segnali deboli in modo più efficace.

Gli elettrodi vengono posizionati sulla cute avendo cura di rispettare determinate corrispondenze tra le regioni corticali e il sito di applicazione; a tale scopo si segue la disposizione standard nota come sistema internazionale standard 10/20. Questo sistema permette di localizzare 21 elettrodi sulla superficie del cuoio capelluto. Per definire l'esatto posizionamento vengono presi in considerazione due punti di riferimento: la punta o depressione tra il naso e la fronte all'altezza degli occhi, e la punta o sporgenza alla base del cranio sulla linea mediana della testa (vd figura 3). Da questi punti viene misurata la lunghezza del cranio nei piani trasversale e medio.

Figura 3



Le posizioni e la nomenclatura di questi elettrodi sono state determinate dall'American Clinical Neurophysiology Society (Hirsch et al., 2013; 2021).

Gli elettrodi vengono generalmente identificati con lettere diverse in base alla zona dello scalpo dove vengono posizionati: Fp (Frontopolare); F (Frontale); T (Temporale); P (Parietale); O (Occipitale); A (Auricolare). La lettera sarà inoltre accompagnata da un numero dispari (1, 3, 5, 7) se l'elettrodo è posizionato alla sinistra della mediana, da numeri pari (2, 4, 6, 8) se è posizionato alla sua destra e dalla lettera z se l'elettrodo è situato sulla mediana. Il "10-20" sta ad indicare la posizione in percentuale degli elettrodi: Per iniziare, si prende a riferimento la mediana e si considera il 10% della sua lunghezza. Il risultato sarà la distanza tra il Nasion e il primo elettrodo che andremo a posizionare: Fpz.

Successivamente si posizionano gli altri elettrodi presenti sulla mediana, considerando il 20% di distanza l'uno dall'altro. Per gli altri elettrodi si segue un principio simile, fatta eccezione per gli elettrodi che si trovano su una seconda mediana, ovvero quella che intercorre tra i due punti auricolari A1 e A2. In questo caso si andranno a posizionare gli elettrodi T3 e T4 al 10% della distanza dai punti auricolari e gli elettrodi successivi (C3 e C4) al 20%.

Oltre a questi elettrodi, ne possono essere aggiunti altri per l'eye tracking, l'ECG e l'attività muscolare: queste informazioni sono molto utili per effettuare una miglior distinzione tra segnale utile e artefatti e per distinguere meglio tra le varie azioni compiute dal soggetto o le varie fasi di allerta/sonno.

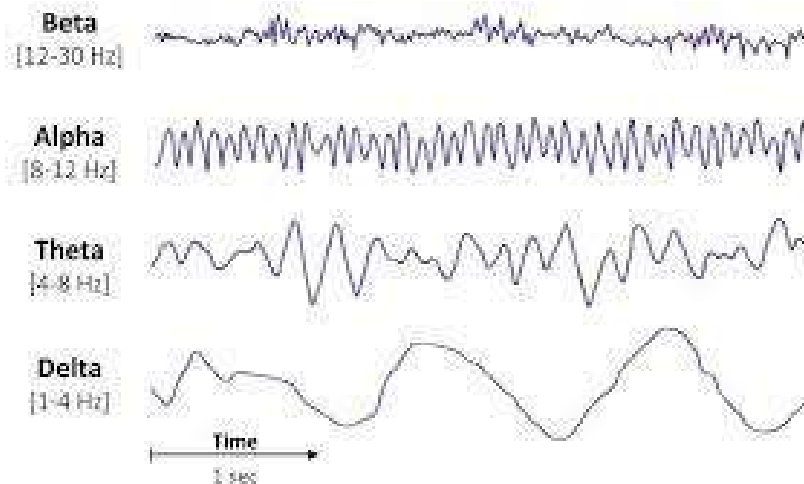
## **1.4 I tracciati del segnale EEG**

I tracciati EEG si contraddistinguono per le fluttuazioni spontanee del potenziale che possono essere attribuite a diversi stati mentali, livelli di coscienza o condizioni patologiche. Quando la corteccia cerebrale è attivamente coinvolta nell'elaborazione delle informazioni o nella ricezione di input sensoriali, come si verifica nello stato di allerta, l'attività neuronale è significativa ma priva di sincronizzazione temporale. Ogni singolo neurone o piccolo gruppo neuronale è impegnato in uno specifico aspetto del compito cognitivo complesso e manifesta un'attivazione rapida ma scarsamente coordinata con i neuroni adiacenti. D'altra parte, durante lo stato di sonno profondo, molti neuroni corticali, non essendo coinvolti in un'intensa

elaborazione delle informazioni, vengono stimolati in modo sincronizzato da un input comune. Ciò genera una risposta altamente coerente e si traduce in un segnale EEG con un'ampiezza maggiore. L'EEG è una forma d'onda complessa che include più componenti in frequenza (figura 4). Queste forme d'onda vanno dalle onde più lente associate al sonno profondo e al rilassamento, alle onde più veloci che sono presenti durante la veglia e l'elaborazione cognitiva e sono state definite secondo le seguenti definizioni:

- Onde Delta ( $\delta$ ): Frequenza di 0,5-4 Hz;
- Onde Theta ( $\theta$ ): Frequenza di 4-8 Hz;
- Onde Alpha ( $\alpha$ ): Frequenza di 8-13 Hz;
- Onde Beta ( $\beta$ ): Frequenza di 13-30 Hz;
- Onde Gamma ( $\gamma$ ): Frequenza superiore a 30 Hz.

Figura 4



Il ritmo delta è il più lento dei ritmi EEG e generalmente ha una frequenza tra 1 e 3 Hz, è associato a stati di sonno non-REM o di incoscienza. Una piccola quantità di onde delta è normale, tuttavia, un eccesso può apparire sia localmente che globalmente. Il ritmo delta concentrato è associato a lesioni localizzate o a traumi, mentre l'eccesso di delta globale indica

tossicità, patologia generalizzata, invecchiamento, o altri problemi sistemici. Poiché riflette generalmente lesioni o disfunzioni, l'eccesso di ritmi delta focalizzati è spesso associato al mancato funzionamento delle zone colpite. In questi casi, l'opzione indicata in neurofeedback è quella di allenare ad abbassare i ritmi delta (downtraining).

Il ritmo theta (tipicamente 4-7 Hz) è un ritmo mediato da meccanismi subtalami, e, come delta, tende ad avere un caratteristico aspetto non sinusoidale. L'eccesso di onde theta è tra le deviazioni più comuni associate alla disregolazione del cervello. Nonostante l'associazione di theta alla disattenzione ed al pensiero interiorizzato, va riconosciuto che tale ritmo è associato anche a pensieri creativi e al recupero della memoria. Pertanto, poiché può verificarsi a livelli moderati anche in un cervello vigile, non dovrebbe essere considerato come un ritmo intrinsecamente "cattivo" che deve sempre essere minimizzato.

Il ritmo alpha presenta un tracciato di 8-12 Hz. Negli anni si è delineata una distinzione nel ritmo alfa, identificandone due sottotipi principali: l'alfa inferiore (compreso tra 8 e 10 Hz) e l'alfa superiore (tra 10 e 12 Hz). Altri studi, invece, suggeriscono la presenza di tre sottogruppi distinti nel ritmo alfa. Queste definizioni implicano differenze comportamentali e funzionali significative tra l'alfa alta e bassa. Si suppone che l'attività nell'intervallo d'onda dell'alfa inferiore sia correlata alla memorizzazione delle azioni nella memoria semantica, mentre ciò non sembra applicarsi all'alfa superiore (Dempster, 2012).

Uno studio condotto da Wang et al. ha esaminato gli effetti dell'asimmetria dell'attività cerebrale nella frequenza alpha e del neurofeedback mirato alla riduzione della frequenza high-beta su pazienti affetti da disturbo depressivo maggiore e sintomi d'ansia. I risultati hanno evidenziato un miglioramento significativo nei sintomi di depressione e ansia in entrambi i gruppi sottoposti al trattamento di neurofeedback (Wang et al., 2019).

Il ritmo alpha è un ritmo di riposo del sistema visivo, massimo posteriormente, che aumenta quando gli occhi si chiudono, e che ha un tipico andamento crescente e calante. Il ritmo alpha rappresenta il rilassamento del sistema visivo e svolge anche alcuni tipi di scansione della memoria. Un individuo durante intervalli alpha è tipicamente consapevole, ma rilassato. La depressione può essere associata ad un ritmo alpha maggiore nella zona frontale sinistra e il training che ripristina l'asimmetria, riducendo il ritmo alfa in questa zona, induce un miglioramento dell'umore. Esiste una variante del ritmo alpha denominata ritmo Mu che è una classe di onde cerebrali registrate nell'elettroencefalogramma (EEG) che si situano nella



gamma di frequenza simile alle onde alpha, tipicamente tra 8 e 13 Hz. Queste onde si ritrovano spesso nelle aree cerebrali coinvolte nel controllo dei movimenti volontari, in particolare nella corteccia motoria primaria. Le onde Mu sono state inizialmente osservate e studiate in relazione alle attività motorie, soprattutto durante il riposo o quando una persona osserva qualcun altro eseguire un movimento. Sono state identificate come un riflesso dell'attività neuronale coinvolta nella preparazione e nell'immaginazione di movimenti motori.

Le forme d'onda beta si possono ulteriormente suddividere in Beta basse ed in Beta alte. Il ritmo beta basso (o SMR) è caratterizzato da frequenze di 12-15 Hz, ed è associato a stati di allerta, di concentrazione, e all'intenzione di rimanere fermi. Nel complesso, è emerso che il training del ritmo sensomotorio (SMR) ha benefici significativi in una vasta gamma di situazioni, in particolare per le convulsioni e per il trattamento dell'insonnia. Sembra che il training SMR sia un meccanismo centrale associato alla stabilità del cervello, del corpo ed alla resistenza allo stress. Le onde beta alte (in genere 20-30 Hz) sono tipiche di stati ansiosi e agitazione.

Le onde gamma sono onde veloci (35-45 Hz), individuate in epoca più recente rispetto alle altre e quindi ad oggi conosciute in modo meno approfondito; non sono infatti facili da registrare a causa della loro ridottissima ampiezza. Sono riscontrabili in momenti di massima performance (fisica e mentale) e profonda concentrazione.

A seguito della registrazione dei ritmi onda cerebrali è necessaria una analisi qualitativa dei tracciati registrati che permetta di studiare i diversi ritmi cerebrali, identificando eventuali anomalie nell'attività cerebrale ea aiutando a comprendere i correlati neurali di vari processi cognitivi e stati di coscienza.

## **1.5 L'analisi del tracciato EEG**

L'EEG misura la differenza di potenziale tra un elettrodo attivo posizionato su un sito di attività nervosa e un elettrodo di riferimento posizionato a una certa distanza dal primo. Le registrazioni EEG descrivono l'attività elettrica in dettaglio e in modo accurato, consentendo di identificare potenziali cambiamenti con una risoluzione temporale in millisecondi. Nonostante l'eccellente risoluzione temporale, l'EEG ha una scarsa risoluzione spaziale per localizzare correttamente

le sorgenti elettriche corticali. Si tratta infatti di circa 1 centimetro quadrato e corrisponde all'attività media di circa 10 milioni di neuroni corticali.

Tradizionalmente l'analisi EEG viene suddivisa in analisi nel dominio del tempo e della frequenza. Nell'uomo in condizioni fisiologiche, l'ampiezza dei potenziali registrati sullo scalpo varia da 10 a 100 $\mu$ V e viene distinta in bassa (< 30 $\mu$ V), media (30 - 70 $\mu$ V) e alta (>70  $\mu$ V) ampiezza.

In generale, il comportamento dinamico dell'attività elettrica cerebrale può essere diviso in due principali categorie: i potenziali spontanei, come i ritmi Alpha e del sonno, ed i potenziali evocati o potenziali evento-relati. I potenziali evocati (EP) costituiscono la risposta diretta ad alcuni stimoli esterni come un segnale luminoso o uditivo; mentre i potenziali evento-relati (ERP) dipendono anche dallo stato di elaborazione cerebrale dello stimolo e rappresentano l'attività media EEG che si registra in concomitanza alla stimolazione e al compito motorio o cognitivo somministrato al soggetto. Tali fenomeni evento-correlati provocano variazioni a specifiche frequenze dell'attività EEG continua e possono rappresentare sia delle diminuzioni, sia degli incrementi della potenza del segnale in una o più bande di frequenza. In particolare, a seguito di un'attività motoria, si registra una modulazione della potenza nelle bande Alpha e Beta (Pfurtscheller & da Silva, 1999; Toma et al., 2002).

Le tecniche di analisi nel dominio del tempo sono principalmente volte alla quantificazione dei potenziali evento-relati (ERPs) ovvero di quelle risposte cerebrali misurabili a seguito di un qualsiasi stimolo interno oppure esterno; tra esse la media temporale è la più utilizzata.

I cambiamenti nell'attività dell'EEG a frequenze specifiche in risposta a un evento sono denominati "fenomeni evento-relati". Essi si manifestano attraverso un generale decremento o incremento della potenza all'interno di una determinata banda di frequenza, risultante rispettivamente in una diminuzione o un aumento di sincronia tra le popolazioni neuronali coinvolte. Nel caso in cui si verifichi una diminuzione della potenza e una conseguente riduzione della sincronia, ci si riferisce a tale fenomeno con il termine "ERD" (Event-Related Desynchronization). (Event Related Desynchronization) originariamente proposto da Pfurtsheller e Aranibar (1977). Con il termine ERS (Event Related Synchronization) si intende, invece, un aumento della sincronizzazione delle attività neurali a seguito di un evento specifico. In altre parole, durante il verificarsi di un evento, si osserva un incremento nella potenza delle onde cerebrali in una determinata banda di frequenza. Questo fenomeno indica che le

popolazioni di neuroni coinvolte nell'elaborazione dell'evento stanno agendo in modo più coordinato, risultando in un aumento della sincronia delle attività elettriche cerebrali.

La trasformata di Fourier veloce (FFT) è il metodo più comune di analisi in frequenza dei segnali campionati e costituisce la base di molti metodi avanzati. È un efficiente algoritmo computazionale progettato per trasformare velocemente il segnale e visualizzarlo in tempo reale. Matematicamente la trasformata di Fourier, di cui la FFT è un'implementazione, è un operatore che permette di scomporre un segnale generico in una somma infinita di sinusoidi di frequenze, ampiezze e fasi diverse in modo tale da vedere quanto di ogni frequenza è presente nel segnale (Rudin, 1970). L'insieme di valori in funzione della frequenza (componenti in frequenza), continuo o discreto, prende il nome di spettro di ampiezza.

Al fine di monitorare la distribuzione di specifiche bande di ampiezza o potenza sono stati sviluppati programmi di visualizzazione computerizzati. Tali software utilizzano tecniche grafiche denominate compressed spectral arrays (CSAs) per visualizzare in tempo reale il segnale acquisito da un singolo canale (Williamson et al., 2014).

La tecnica CSA usa l'analisi in frequenza per fornire una rappresentazione tridimensionale del segnale EEG, raffigurando l'ampiezza sull'asse verticale, la frequenza sull'asse orizzontale ed il tempo sull'asse "z". Questa rappresentazione del segnale viene utilizzata principalmente dal terapeuta per identificare anomalie nei segnali EEG e per la gestione della seduta, ma può essere utilizzata anche dal paziente durante la fase di training. Il feedback può essere fornito al paziente in diverse modalità (stimoli visivi, tattili, acustici, ecc.) a discrezione del terapeuta. In genere, il software presenta visivamente il segnale di ritorno attraverso intervalli di ampiezza (o potenza), animazioni e grafici, consente l'analisi dei risultati e la registrazione dei dati. Per valutare l'efficacia dell'allenamento o per pianificare futuri training, sarebbe utile poter valutare i risultati ottenuti dal paziente. I software sviluppati per il neurofeedback, solitamente, sono dotati di strumenti necessari per esportare i dati della sessione in Excel, Matlab o altri pacchetti software per l'analisi dei dati offline.

## 1.6 Il Biofeedback ed il Neurofeedback

Il biofeedback include una varietà di tecniche che aiutano i pazienti a utilizzare la connessione mente-corpo per raggiungere uno stato di profondo rilassamento. Una volta raggiunto questo stato, il paziente può imparare a controllare meglio la risposta involontaria del corpo allo stress, che è associata a un'ampia gamma di malattie e disturbi, tra cui depressione, disturbo post-traumatico da stress, disturbo dell'adattamento, irritabilità e altro (Lehrer et al., 2020).

Durante il training di biofeedback, non vengono utilizzati in alcun modo stimoli esterni sul corpo e non vengono somministrati farmaci, ma vengono posizionati dei sensori sul corpo del paziente per registrare funzioni involontarie come la temperatura della mano, la frequenza cardiaca, la tensione muscolare e l'attività delle ghiandole sudoripare nelle dita. Queste funzioni sono regolate dal sistema nervoso autonomo e sono considerate da molti come funzioni fisiologiche che non possono essere controllate coscientemente. Tuttavia, con la misurazione in tempo reale di queste funzioni, i professionisti possono aiutare i pazienti ad imparare a influenzare l'attività involontaria per potenziare l'autoregolazione e ottenere un sollievo dai sintomi. Ad esempio, monitorando l'attività delle ghiandole sudoripare sulla punta delle dita, i pazienti possono imparare a capire come lo stress influisce sul loro corpo e, con sufficiente pratica, possono apprendere come evitare che lo stress possa inficiare negativamente sul loro organismo.

Il biofeedback EEG, noto anche come neurofeedback, è un tipo di biofeedback che utilizza proprio l'elettroencefalogramma come strumento per la rilevazione dell'attività del cervello in tempo reale. Il training di neurofeedback è un processo di apprendimento che rafforza e sviluppa fisicamente le connessioni sinaptiche del cervello, portando a una possibilità di maggiore controllo mentale che può essere a lungo termine per molti pazienti (Viviani & Vallesi 2021). Finché il paziente continua a esercitare le abilità apprese durante il trattamento, ha un maggiore controllo sulla propria salute fisica e mentale, senza dover ricorrere a farmaci.

In diversi studi è stato dimostrato che il neurofeedback può essere utilizzato per aiutare i pazienti a controllare gli schemi anomali delle onde cerebrali, il che può contribuire a ridurre i sintomi di disturbi d'ansia (Tolin et al. 2020), attacchi di panico (Kopańska et al., 2022), depressione (Fernández-Álvarez et al., 2022), insonnia (Kwan et al., 2022) e come vedremo più avanti anche a migliorare alcune abilità e competenze mentali (Yeh, Hsueh & Shaw., 2021; Bagherzadeh et al., 2020; Pamplona et al., 2020; Zich et al., 2020).

Tra i primi ricercatori del campo, il dottor Joe Kamiya (1969) dell'Università di Chicago studiava la coscienza cercando di stimolare l'attività delle "onde alpha" nel cervello. Si tratta del tipo di onde che il cervello emette in uno stato di riposo e calma. In questi studi si è scoperto che alcuni individui potevano imparare a identificare quando il loro cervello produceva onde alpha e ad aumentarne la produzione. Tale processo incrementale del ritmo alpha risultava rilassante. Kamiya, utilizzando un semplice sistema di ricompensa e con la collaborazione dei suoi soggetti, condusse il primo training di biofeedback EEG in assoluto.

Nello stesso periodo, Wyrwicka e Sterman (1968) hanno studiato l'attività cerebrale durante il sonno. I loro soggetti di studio erano gatti e si resero conto che l'attività cerebrale a una certa velocità era associata al rilassamento. Nella sperimentazione, i gatti venivano premiati ogni volta che il loro cervello funzionava alla velocità associata allo stato di rilassamento e, in tal modo, scoprirono che i gatti rispondevano diventando generalmente più rilassati.

Poco dopo queste scoperte, Sterman fu contattato dalla NASA per risolvere un problema con gli astronauti che erano stati esposti a un particolare carburante per razzi. Gli astronauti riportavano mal di testa, nausea, iperventilazione, allucinazioni e convulsioni. Durante gli esperimenti con questo carburante (con i gatti), Sterman scoprì che i gatti che erano stati premiati per l'attività cerebrale nello stato di rilassamento erano più resistenti alle convulsioni che derivavano dall'esposizione al carburante per razzi.

Nel tempo l'utilizzo del neurofeedback si è diffuso a livello internazionale e attualmente è una metodologia ampiamente riconosciuta sia in contesti di ricerca che clinici. Anche la comunità medica sta rispondendo e numerosi professionisti del settore si stanno formando come operatori di neurofeedback o stanno indirizzando i loro pazienti al trattamento con questa metodologia.

La ricerca si è intensificata e nuovi metodi e protocolli vengono scoperti con sorprendente celerità. È interessante notare che negli ultimi anni il neurofeedback si è rivelato utile anche per migliorare prestazioni atletiche (Maszczyk. et al., 2020; Domingos et al., 2020; Dana, Rafiee & Gholami, 2019), aiutando gli atleti con l'allenamento per la "peak performance" (Pacheco., 2016; Graczyk et al., 2014).

Come già anticipato, lo scopo del Neurofeedback EEG è quello di fare in modo che il paziente apprenda come modulare e autoregolare il proprio sistema nervoso centrale. Tale capacità si acquisisce per mezzo dell'informazione che proviene dall'elettroencefalogramma

(EEG) elaborato al computer. Il computer visualizza con un ritardo di pochi millisecondi l'elettroencefalogramma del soggetto, fornendogli un feedback in tempo reale del segnale prodotto dai processi neurofisiologici ed aiutandolo così nel provare a modularli. Quando la modificazione avviene nella direzione voluta il soggetto viene premiato (con uno stimolo visivo, acustico o tattile). In questo modo, grazie ad un esercizio continuativo, il soggetto diventa in grado di praticare stabilmente questa forma di modulazione delle proprie attività neurocognitive. È importante sottolineare che il tracciato EEG non riflette l'attività cerebrale in senso stretto, ma rappresenta invece un utile indicatore di certi aspetti del funzionamento cerebrale; particolari forme d'onda, infatti, possono essere buoni rivelatori di patologie o lesioni o semplicemente dello stato di rilassamento del soggetto (Alhussein et al., 2019; Noorlag et al., 2022).

Dalle ricerche di alcuni neurologi è emerso che le lesioni che si verificano in regioni specifiche del cervello producono sintomi specifici, per lo più correlati a tali regioni (es. Cserpan et al., 2022; Wang et al., 2022). Ad esempio, i lobi frontali, FP1, FP2, FPZ, FZ, F3, F4, F7 sono responsabili dell'attenzione immediata e sostenuta, della gestione del tempo, delle abilità sociali, delle emozioni, dell'empatia, della memoria di lavoro, della pianificazione esecutiva, della fibra morale o del carattere. Ogni regione cerebrale rappresenta una sensazione o un compito specifico; pertanto l'identificazione di queste aree fornisce il trattamento di neurofeedback migliore e più accurato.

I lobi parietali, PZ, P3 e P4, risolvono problemi concettualizzati dai lobi frontali. La grammatica complessa, la denominazione degli oggetti, la costruzione di frasi e l'elaborazione matematica sono identificabili con il lobo parietale sinistro, mentre l'orientamento delle mappe, il riconoscimento spaziale e la conoscenza della differenza tra destra e sinistra sono interamente funzioni del lobo parietale destro. I lobi temporali T3, T4, T5 e T6 hanno diverse funzioni. Le funzioni dell'emisfero sinistro sono associate alla lettura (riconoscimento delle parole), alla memoria, all'apprendimento e all'umore positivo, mentre quelle dell'emisfero destro sono legate alla musica, all'ansia, al riconoscimento facciale e al senso dell'orientamento. D'altra parte, i ricordi visivi, la lettura accurata e i ricordi traumatici che accompagnano i flashback visivi sono solitamente elaborati nei lobi occipitali O1 e O2. Le altre funzioni del lobo occipitale comprendono la localizzazione degli oggetti nell'ambiente, la visione dei colori, il

riconoscimento dei disegni e la corretta identificazione degli oggetti, la lettura, la scrittura e l'ortografia (Marzbani et al., 2016).

La corteccia sensoriale e motoria (sensorimotoria), localizzata nei punti CZ, C3 e C4, ha funzioni di controllo cosciente di tutti i movimenti scheletrici, come scrivere a macchina, suonare strumenti musicali, scrivere a mano, utilizzare macchinari complessi, parlare e riconoscere l'origine delle sensazioni corporee.

Alcuni studiosi hanno evidenziato che la corteccia sensomotrice interviene nel codificare compiti sia fisici che cognitivi (Hong et al., 2015; Maruyama et al., 2021). I soggetti che hanno difficoltà a trovare una sequenza logica in dei compiti cognitivi possono trarre beneficio da un training di neurofeedback a livello della corteccia sensomotrice dell'emisfero sinistro (C3). Il training della corteccia sensomotrice dell'emisfero destro (C4) può richiamare, invece, sensazioni, emozioni o calma. Il training in corrispondenza della linea mediana centrale può facilitare una risposta mista. Sui soggetti che soffrono di epilessia vengono solitamente prese in considerazione per i training le zone lungo la corteccia sensomotrice (C3) con l'obiettivo di aumentare il ritmo beta lento (SMR). Inoltre, il training lungo la corteccia sensomotrice può essere applicato per il trattamento di ictus, epilessia, paralisi, ADHD e disturbi dell'integrazione sensomotrice (Demos, 2005).

Negli ultimi anni sono emerse varie proposte relative a protocolli di neurofeedback, alcuni dei quali sono stati oggetto di standardizzazione. L'onda alpha, rilevabile nell'attività cerebrale, è comunemente associata a uno stato di rilassamento attento, come indicato da ricerche quali quella condotta da Evans & Abarbanel (1999). Il profilo dell'andamento delle onde alpha è spesso descritto come un'esperienza legata a sensazioni di tranquillità e piacevolezza. Le diverse frequenze delle onde alpha indicano una attività cerebrale di natura creativa, pertanto sono coinvolte nel processo di induzione del rilassamento muscolare, contribuendo così alla transizione verso lo stato di sonno. È stato verificato che durante la pratica meditativa si registra un incremento delle onde alpha (Kora et al., 2021; Tang et al., 2019).

Il training del ritmo alpha viene solitamente utilizzato per il trattamento di varie patologie, come la riduzione del dolore (9 Hz), la riduzione dello stress e dell'ansia (10 e 30 Hz), il miglioramento della memoria, il miglioramento delle prestazioni mentali e il trattamento delle lesioni cerebrali (10-12 Hz) (Benatti et al., 2023; Nawaz et al., 2022).

Sono stati condotti diversi studi sul protocollo alpha in cui l'ampiezza di banda di frequenza più comune è stata la gamma di frequenza 7-10 Hz che spesso si utilizza per la meditazione, il sonno, la riduzione dello stress e dell'ansia. Anche la frequenza di 10 Hz provoca un rilassamento muscolare profondo, la riduzione del dolore, la regolazione della frequenza respiratoria e la diminuzione della frequenza cardiaca (Dempster, 2012; Vernon, 2005). L'incremento delle onde alpha nelle aree frontali deve essere comunque eseguito con cautela per impedire il manifestarsi di possibili reazioni collaterali correlate all'umore (Weeler et al., 1993; Hammond et al., 2008).

Il protocollo "Alert" (o training delle onde beta) è uno dei protocolli storici utilizzati a metà degli anni '80 per trattare i deficit di attenzione ed iperattività (ADD/ADHD) (Hao et al., 2022); Il protocollo "Focus" è equivalente ad "Alert", con la differenza che la banda allenata è quella delle onde beta lente (ritmo SMR). Tale protocollo prevede l'incremento delle onde beta lente (12-15 Hz) e permette al paziente di ottenere uno stato interno rilassato ma concentrato, attento e pronto (Patil et al., 2022).

Il protocollo di neurofeedback basato sul ritmo delle onde alpha/theta è uno dei metodi più ampiamente adottati per la riduzione dei livelli di stress (Gruzelier, 2009; Nan et al., 2022; Raymond et al., 2005). Inoltre, questa strategia è utilizzata per trattare stati di depressione profonda, dipendenza e ansia, poiché favorisce l'incremento della creatività, induce sensazioni di rilassamento e migliora le performance musicali. Inoltre, è associata alla promozione del processo di recupero dalle conseguenze dei traumi. Per la posizione degli elettrodi, solitamente vengono collocati in corrispondenza delle posizioni O1, O2, CZ e PZ. Le frequenze nell'intervallo alpha/theta si collocano tra 7 e 8,5 Hz, con un valore tipico di 7,8 Hz. Questo trattamento viene effettuato generalmente con gli occhi chiusi ed ha l'obiettivo di aumentare il rapporto tra le onde theta e alpha, sfruttando un feedback uditivo come mezzo (Demos, 2005; Egner & Gruzelier, 2003; Thompson & Thompson, 2003). Durante una sessione alpha/theta, si verifica un evento noto come "crossover" in cui il ritmo alpha diminuisce e il ritmo theta diventa dominante. Quando avviene questa transizione dallo stato dominante alpha allo stato dominante theta è importante monitorare le condizioni ed i progressi del paziente. Questo tipo di interazione terapeuta/paziente è unico nel training alpha/theta ed è un fattore importante che lo distingue da altre forme di neurofeedback. Il protocollo Deep (alpha/theta) prevede che gli occhi del paziente siano sempre chiusi, gli elettrodi siano posizionati in posizione Cz o Pz e le sessioni



di trattamento durino per un tempo minimo di 30 minuti. Il training Alpha/theta viene utilizzato nei casi in cui il paziente voglia essere più consapevole dei propri pensieri interiori, emozioni, ricordi, e per questo spesso viene svolto parallelamente alla psicoterapia.

In generale si può affermare che gli obiettivi del training di neurofeedback sono di due tipi: i rinforzi, che portano alla possibilità di ricompensa, e gli inibitori, che rimuovono tale possibilità. Utilizzando una combinazione di rinforzi ed inibitori, il training può essere configurato in modo tale da condurre il paziente verso qualsiasi condizione desiderata. Di norma il neurofeedback viene effettuato almeno una volta alla settimana in modo che i risultati possano essere rafforzati e mantenuti. Le sessioni generalmente durano meno di un'ora, ad eccezione del training alpha/theta che viene utilizzato, spesso, in combinazione con sedute di psicoterapia o interventi correlati. È spesso possibile determinare la durata della sessione ottimale monitorando l'avanzamento delle variabili EEG rilevanti e tenendo conto dello stato del paziente. Se i valori EEG iniziano a deviare, indicando affaticamento o perdita di connessione agli obiettivi, oppure se il cliente riferisce di essere stanco e annoiato, la seduta dovrebbe essere interrotta per quella sessione. Il neurofeedback può essere preso in considerazione come un'opzione terapeutica per diversi disturbi psicologici e neurologici. Tuttavia, è fondamentale che venga condotto sotto la supervisione attenta di professionisti esperti nel campo, capaci non solo di gestire e adattare il trattamento in base alle esigenze individuali, ma anche di interromperlo qualora fosse necessario. Questa tecnica è principalmente destinata a integrare e supportare i percorsi psicoterapeutici, contribuendo agli interventi terapeutici complessivi.

## **1.7 Neurofeedback in Psicoterapia**

Nei precedenti paragrafi è stato presentato il neurofeedback come una tecnica che utilizza strumenti e apparecchiature per misurare l'attività cerebrale e fornisce un feedback in tempo reale al paziente in base alle sue proprie onde cerebrali. Attraverso l'apprendimento e la regolazione consapevole delle attività cerebrali, si mira a regolare il funzionamento del cervello e ad influenzare positivamente i sintomi o i disturbi psicologici. Tuttavia, questa metodologia, pur essendo efficace, potrebbe risultare invasiva all'interno dei processi psicoterapeutici, poiché l'utilizzo di strumenti tecnologici potrebbe interferire con la relazione tra terapeuta e

paziente. L'integrazione del neurofeedback in percorsi terapeutici che attribuiscono grande importanza alla dimensione relazionale può essere complessa. Tale integrazione dovrebbe essere chiaramente presentata ai pazienti prima dell'avvio della terapia e dovrebbe essere inserita solo dopo una approfondita fase di valutazione iniziale, definizione degli obiettivi terapeutici e costruzione del rapporto terapeutico.

La psicoterapia è un campo scientifico in continua evoluzione. Grazie al continuo aggiornamento ed alla capacità di integrare nuove tecniche di intervento, gli psicoterapeuti hanno la possibilità di utilizzare strategie più funzionali alla risoluzione delle problematiche presentate dai pazienti. Solitamente, gli psicoterapeuti scelgono un modello teorico e lo applicano in modo flessibile e integrativo nella loro pratica clinica. Negli ultimi decenni, un numero crescente di psicoterapeuti ha preferito non identificarsi completamente in un unico approccio, ma si è definito integrativo o eclettico (Feixas e Botella, 2004). In una recente indagine su un campione di oltre 1000 psicoterapeuti, solo il 15% di essi ha dichiarato di utilizzare un solo orientamento teorico nella propria pratica clinica e il numero mediano di orientamenti teorici utilizzati nella pratica è stato di quattro (Tasca et al., 2015).

In base ai modelli teorici e scientifici su cui sono costruiti i singoli approcci di psicoterapia, è possibile integrare nuovi processi che permettano di raggiungere un miglioramento in termini di risultati sulle psicopatologie.

Gli approcci integrati, in psicoterapia, sono approcci terapeutici che combinano elementi provenienti da diverse teorie e metodologie psicoterapeutiche al fine di creare un approccio più completo ed efficace nel trattamento dei disturbi psicologici (Zarbo et al., 2016). Questi approcci riconoscono che non esiste una singola teoria o tecnica che possa agire in modo univoco sulle problematiche psicologiche e che ogni individuo ha bisogni unici.

Gli approcci integrati in psicoterapia possono includere combinazioni di diverse teorie come la psicodinamica, la cognitivo-comportamentale, l'umanistica, la gestalt, la familiare/sistemica, la mindfulness, l'EMDR (Eye Movement Desensitization and Reprocessing), e molte altre. L'obiettivo è utilizzare gli aspetti più efficaci e appropriati di ciascuna teoria per adattarsi alle esigenze specifiche del paziente e del problema trattato. In letteratura sono stati riportati più di 400 approcci terapeutici differenti per la cura delle psicopatologie (Zarbo et al., 2016).

Questi approcci integrati possono utilizzare una varietà di strategie terapeutiche, come l'integrazione di tecniche di esplorazione dell'inconscio, strategie cognitive e comportamentali,

approcci esperienziali, di consapevolezza corporea, e modelli di lavoro sistemico con le relazioni familiari. L'obiettivo degli approcci integrati è creare un approccio personalizzato che si adatti alle esigenze individuali del paziente.

L'integrazione del neurofeedback in psicoterapia può essere utile in diversi ambiti. Ad esempio, può essere utilizzato per il trattamento dei disturbi dell'umore, dell'ansia, dell'ADHD, dei disturbi del sonno e di altre condizioni mentali. Inoltre, può essere utilizzato come strumento complementare alle tecniche terapeutiche esistenti, consentendo ai pazienti di acquisire una maggiore consapevolezza e controllo delle loro risposte fisiologiche e mentali.

L'uso del neurofeedback in psicoterapia può consentire al terapeuta di monitorare l'attività cerebrale del paziente in tempo reale e di lavorare insieme al paziente per modificare determinati schemi o disfunzioni cerebrali che potrebbero contribuire ai sintomi o ai problemi emotivi del paziente. Ad esempio, nel caso di un paziente con ansia, il neurofeedback potrebbe essere utilizzato per aiutare il paziente a riconoscere e ridurre l'attivazione eccessiva delle onde cerebrali associate all'ansia (Chen et al., 2021).

L'integrazione del neurofeedback in un percorso di psicoterapia richiede che il terapeuta abbia una formazione specifica in questa tecnica e che sia in grado di utilizzarla in modo sicuro ed efficace. È importante sottolineare che il neurofeedback non sostituisce la psicoterapia tradizionale, ma può essere un trattamento coadiuvante al percorso terapeutico.

I terapeuti di diversi approcci possono integrare il neurofeedback all'interno del loro metodo terapeutico personalizzato. Si possono, ad esempio, combinare tecniche umanistiche, come la terapia centrata sul cliente o la Gestalt, con sessioni di neurofeedback. Ad esempio, durante una seduta di neurofeedback, il terapeuta potrebbe incoraggiare il paziente a esplorare le sue sensazioni interne o a riflettere sulle emozioni e i pensieri che emergono durante la sessione.

Sebern Fischer nel libro "Neurofeedback in the developmental trauma" (2014) afferma *"È opportuno ripetere che è molto più facile raggiungere la mente attraverso il cervello che raggiungere il cervello attraverso la mente. Tuttavia la mente è fondamentalmente relazionale e richiede una relazione dentro la quale crescere, un luogo dove essere compresa, nutrita, diretta e supportata per progredire. Un cervello regolato darà origine a una mente regolata che, come sappiamo dalla letteratura sulla meditazione e dalla pratica, a sua volta regolerà il cervello"*. In questo breve riferimento è possibile ritrovare i principi attraverso cui è auspicabile portare il neurofeedback nei percorsi di psicoterapia. In questo caso, il neurofeedback non viene

inteso come uno metodo unico di intervento, ma come uno strumento da integrare nei percorsi terapeutici per migliorare l'efficacia degli interventi. Inoltre può essere utile per monitorare il funzionamento cognitivo e l'avvenuta regolazione cerebrale del paziente.

Il training di neurofeedback può quindi operare promuovendo la neuroplasticità, facilitando gli aggiustamenti nell'attività neuronale che supportano un funzionamento ottimale. È stato dimostrato che il neurofeedback attiva i meccanismi specifici che facilitano la sinaptogenesi e gestiscono l'eccitabilità della rete attraverso il flusso sanguigno capillare (Sunder & Bohnen 2017). Questi risultati promettenti indicano che è possibile ricablare il cervello per ottenere un funzionamento ottimale attraverso l'uso di neurofeedback.

I meccanismi di adattamento sinaptico, come l'apprendimento hebbiano, e la plasticità omeostatica sono processi coinvolti nel neurofeedback (De Pitta et al., 2016; Zenke et al., 2017). I risultati riportati in letteratura dimostrano la capacità di neuroplasticità a qualsiasi età. I bambini, da soli o con l'aiuto dei loro genitori, riportano benefici immediati che tendono a mantenersi più facilmente. Nei bambini, il processo di "ri-apprendimento" sembra avvenire in modo rapido. Ad ogni età, si osserva una risposta desiderata più immediata quanto più il sistema nervoso centrale è gravemente disregolato (Kirk, 2015).

Un cervello stabile è un cervello in uno stato di sana omeostasi, ma resta da valutare la possibilità dei pazienti di seguire dei percorsi impegnativi dal punto di vista del tempo da impiegare. Nel corso degli anni, nella pratica clinica, si è osservato che l'esercizio costante con il neurofeedback consente ai pazienti di raggiungere uno stato di competenza rinnovata o nuova. Nella maggior parte dei casi, si è riscontrata una risoluzione dei sintomi o un significativo miglioramento dei principali disturbi dopo circa 50 sedute (circa sei mesi), specialmente se i pazienti seguono con costanza il programma di sedute e le altre terapie integrate prescritte. Con l'evoluzione del metodo, utilizzando intervalli di frequenza di rinforzo ancora più bassi, si è osservato che alcuni pazienti, soprattutto bambini molto piccoli e pazienti anziani che hanno subito una commozione cerebrale acuta, hanno riportato un completo miglioramento già dalla 20<sup>a</sup>/25<sup>a</sup> seduta (Kirk, 2015).

L'integrazione tra psicoterapia e neurofeedback rappresenta un approccio promettente nel trattamento dei disturbi psicologici. L'utilizzo integrato di queste due metodologie consente di indirizzare in modo più preciso i processi neurologici sottostanti ai sintomi e ai problemi emotivi del paziente. L'intervento integrato si incentra sulla plasticità del cervello per favorire

l'apprendimento e la regolazione delle attività cerebrali disfunzionali, offrendo un approccio sicuramente più completo ed efficace, prendendo in considerazione gli aspetti cognitivi, emotivi e neurologici del funzionamento individuale (Fisher, 2014).

La psicoterapia fornisce uno spazio sicuro e protetto in cui il paziente può esplorare e comprendere i suoi processi psicologici, mentre il neurofeedback offre una modalità concreta per la regolazione attiva delle attività cerebrali disfunzionali.

Attraverso l'uso del neurofeedback, il paziente è in grado di sviluppare una maggiore consapevolezza riguardo alle proprie reazioni e ai modelli di pensiero che guidano il suo comportamento. Questa pratica permette al paziente di acquisire abilità per una regolazione più efficace delle risposte cognitive ed emotive. Ciò si traduce in un processo di apprendimento che non solo favorisce l'individuazione dei meccanismi sottostanti ai suoi sintomi, ma anche la capacità di modificarli attivamente.

L'interazione tra il neurofeedback e i processi psicoterapeutici classici può portare a risultati più significativi in termini di efficacia. Il processo di modulazione delle attività cerebrali non solo contribuisce all'equilibrio e all'omeostasi nel cervello, ma può anche promuovere il benessere psicologico generale e la riduzione dei sintomi legati a vari disturbi. Questa convergenza tra le dimensioni psicologiche e neurologiche apre nuove prospettive nel campo del benessere e della crescita personale.

L'approccio integrato tra psicoterapia e neurofeedback offre ai pazienti una gamma più ampia di strumenti terapeutici per affrontare le proprie sfide. Questo approccio sinergico può essere altamente adattabile alle esigenze individuali dei pazienti. Questo permette ai pazienti di essere coinvolti nella scelta del percorso che meglio si adatta alle loro necessità e ai loro obiettivi di trattamento.

In conclusione, l'unione tra psicoterapia e neurofeedback apre nuove vie per un trattamento psicologico più completo ed efficace. Questo approccio ibrido può favorire una migliore comprensione di sé, la regolazione delle risposte psicologiche e una maggiore resilienza mentale, promuovendo così un benessere complessivo e un potenziale di crescita personale. L'utilizzo del neurofeedback può essere inserito sia nel trattamento di problematiche riguardanti la salute mentale che nel trattamento di disturbi neuropsicologici ed anche nel potenziamento di alcune abilità cognitive.

## Capitolo secondo

### Neurofeedback e memoria di lavoro

#### 2.1 La memoria di lavoro

La memoria di lavoro (o working memory) è un tipo di memoria a breve termine che si ritiene sia generata da un cambiamento temporaneo nell'attività elettrica, rispetto alla memoria a lungo termine, che si ritiene attui un cambiamento più duraturo nel sistema nervoso. La memoria di lavoro è necessaria per mantenere le informazioni nella propria mente mentre si lavora su compiti complessi o si ragiona (Baddeley, 2003).

Sono stati esplorati diversi modelli e spiegazioni su come le persone elaborino e immagazzinino i ricordi a breve termine. Per diversi anni, l'approccio più accreditato è stato il modello della memoria di lavoro proposto da Baddeley e Hitch (1974). In questo modello si definisce la memoria di lavoro come funzione cognitiva composta da tre elementi: due magazzini a breve termine (fonologico e visuo-spaziale) e un esecutivo centrale, che controlla il flusso di informazioni tra questi magazzini e altri processi cognitivi. Recentemente, questo modello è stato riadattato per includere tra i magazzini una terza componente denominata buffer episodico. Questo concetto fisiologico di memoria di lavoro, relativamente nuovo coinvolge, dunque, tre componenti principali: il loop fonologico, il magazzino visuo-spaziale e il buffer episodico, tutti controllati da quello che viene definito l'esecutivo centrale (Baddeley, 2003).

I magazzini di memoria a breve termine trattengono un numero limitato di informazioni che rimangono disponibili solo per pochi secondi, prima che vengano perse. Il limite della capacità della memoria a breve termine si riferisce sia al numero di informazioni che possono essere tratteneute (span) sia al tempo in cui queste informazioni rimangono disponibili.

Il magazzino fonologico mantiene le informazioni verbali, mentre quello visuo-spaziale elabora le informazioni visive e spaziali. Il loop fonologico, è suddiviso in due ulteriori sottocomponenti: il magazzino fonologico ed il processo di controllo articolatorio. La prima sottocomponente ha il compito di mantenere l'informazione linguistica, mentre la seconda è coinvolta nei processi del linguaggio interiore. Le tracce presenti nel magazzino fonologico

sono soggette a perdersi rapidamente, ma grazie alla ripetizione sub-vocalica è possibile mantenere viva la traccia mnestica per poterla successivamente riutilizzare.

Baddeley, Gathercole e Papagno (1998) hanno evidenziato che l'abilità di ricordare non-parole (come misurato nei Test di ripetizione di non-parole, ovvero parole che non esistono, per esempio 'tambilina', 'verdusape') sia un predittore dello sviluppo del vocabolario nella prima infanzia. Questo mette in evidenza come la funzione del magazzino fonologico non sia solo quella di ricordare parole familiari, ma anche di sostenere l'apprendimento di nuove parole. Oltre all'apprendimento del vocabolario nella prima lingua, la memoria fonologica è anche legata allo sviluppo del linguaggio parlato: i bambini con una maggiore capacità di memoria fonologica riescono a produrre frasi di maggiore lunghezza e racconti maggiormente complessi sia di tipo grammaticale che semantico rispetto a quelli che dimostrano una minore capacità in questo tipo di memoria (Adams & Gathercole, 2000).

Il Taccuino (o magazzino) visuo-spaziale rappresenta un sistema di elaborazione ed immagazzinamento di informazioni visive e spaziali. Esso svolge un ruolo importante nella progettazione dei movimenti nello spazio ed è composto da due parti: la componente visiva che comprende l'elaborazione delle caratteristiche fisiche e funzionali degli oggetti e la componente spaziale che comprende l'elaborazione della posizione ed il movimento nello spazio.

Il Sistema Esecutivo Centrale è responsabile sia delle risorse attentive sia della manipolazione delle informazioni ed esercita il controllo sui sistemi sussidiari. Shallice (1988) ha ampliato il concetto proponendo il Modello del Sistema Attentivo Supervisore (SAS), un meccanismo di controllo superiore coinvolto nell'attività decisionale.

Il buffer episodico svolge, invece, una funzione di integrazione delle informazioni rilevate dal magazzino visuo-spaziale e di quelle del magazzino fonologico in un unico codice multimodale e crea da questo delle rappresentazioni multimodali attraverso processi di consapevolezza che servono a collegare informazioni complesse provenienti da molteplici fonti e in diverse modalità. Il buffer episodico costituisce l'interfaccia tra la memoria di lavoro e la memoria a lungo termine poiché è in questa sede che l'ippocampo integra le nuove informazioni con quelle esistenti nella memoria a lungo termine. In questo sistema a capacità limitata confluiscono quindi tutte le diverse nuove informazioni che, aggiungendosi a quelle preesistenti, danno la possibilità di creare nuove rappresentazioni.

## **2.2 La valutazione della memoria di lavoro**

In psicologia e neuroscienze, le capacità mnemoniche vengono rilevate attraverso esercizi, la maggior parte dei quali sono stati validati e standardizzati ormai da molti anni. Gli esercizi classici propongono di ripetere l'elenco più lungo di elementi in ordine corretto subito dopo la presentazione. Gli elementi possono includere, di solito, parole, numeri o lettere. Il compito è noto come digit span quando si usano i numeri.

Lo span di memoria è una misura comune della memoria di lavoro e della memoria a breve termine. Viene inserita anche come componente dei test di abilità cognitiva in batterie come WAIS e WISC. La memoria a ritroso è una variante più impegnativa che prevede il richiamo di elementi in ordine inverso. È difficile dare una definizione strutturale dello span di memoria, perché ci si trova subito di fronte alla distinzione tra i prerequisiti dello span di memoria e i processi effettivamente coinvolti. La memoria richiede "associabilità, cioè la capacità del soggetto di raggruppare le serie di elementi, di percepire le relazioni tra le serie per poi riprodurle al meglio.

Un altro processo coinvolto nella memoria è quello dell'immaginazione. Un soggetto, per poter ripetere la serie presentata, deve essere anche in grado di immaginarla. L'effettiva riproduzione della serie di stimoli implica il processo di memoria. Se l'individuo non possedesse alcuna memoria, la riproduzione della serie sarebbe impossibile.

In un tipico test di memoria, un elenco di numeri o lettere casuali viene letto ad alta voce o presentato sullo schermo di un computer alla velocità di uno al secondo. Il test inizia con due o tre numeri e aumenta fino a quando la persona non commette errori. In questo tipo di test è necessario evitare schemi riconoscibili (ad esempio 2, 4, 6, 8). Alla fine di una sequenza viene chiesto alla persona sottoposta al test di ricordare gli elementi nell'ordine corretto. La capacità media di memorizzazione di un adulto, senza errori, è di sette cifre più o meno due (Miller, 1956). Tuttavia, la capacità di memorizzazione può essere notevolmente ampliata (in alcuni casi fino a 80 cifre) apprendendo un sofisticato sistema mnemonico di regole di ricodifica in base al quale le sottostringhe di 5-10 cifre vengono tradotte in un nuovo pezzo (Ericsson et al., 2004).

Nel dicembre 2015, un uomo di nome Lance Tschirhart è entrato nel Guinness dei primati per aver memorizzato una sequenza di 456 cifre pronunciate ad alta voce alla velocità di una al secondo, in occasione del Campionato mondiale della memoria a Chengdu, in Cina.



In un compito di span di cifre all'indietro, la procedura è in gran parte la stessa, tranne per il fatto che ai soggetti sottoposti al test viene chiesto di ricordare le cifre in ordine inverso (ad esempio, se viene presentata la seguente stringa di numeri "1 5 9 2 3", al soggetto viene chiesto di ricordare le cifre in ordine inverso; in questo caso, la risposta corretta sarebbe "3 2 9 5 1").

Altri test di memoria si concentrano sia su un compito di elaborazione sia su un compito di immagazzinamento della memoria. In genere, il compito prevede l'alternanza tra un'attività che richiede elaborazione mentale e cognizione e una parola o una cifra da memorizzare. Per esempio, il compito di elaborazione potrebbe prevedere che il partecipante verifichi la correttezza di un problema aritmetico, oppure che legga una frase e risponda a una domanda di comprensione sul suo significato. Al partecipante viene quindi presentata una parola da memorizzare, prima di passare alla domanda di elaborazione successiva. Al termine dell'esercizio, il partecipante cercherà di ricordare il maggior numero possibile di parole. Daneman e Carpenter (1980) studiarono questo metodo trovando una forte correlazione tra il numero di parole memorizzate e le prestazioni di comprensione delle domande di elaborazione. In altre parole, chi aveva un alto punteggio di memoria e riusciva a ricordare molte parole otteneva buoni risultati anche nelle domande di elaborazione.

Un test di misurazione dello span di memoria visuo-spaziale, cioè della quantità di informazioni visuo-spaziali che si riescono a trattenere nella memoria recente è il Test di Corsi. Lo stimolo, in questo test, è costituito da una tavoletta di legno di cm 32 x 25 in cui sono attaccati 9 cubetti di 45 mm per lato, disposti in modo asimmetrico. I cubetti sono numerati dal lato rivolto verso l'esaminatore in modo che il soggetto non possa vederli. Nella procedura di somministrazione, l'esaminatore è seduto di fronte al soggetto e tocca con l'indice i cubetti in una sequenza standardizzata, di lunghezza crescente (da due a dieci cubetti), al ritmo di un cubetto ogni 2 secondi e tornando ogni volta con l'indice sul tavolo alla fine di ogni sequenza. Appena terminata la dimostrazione della sequenza, l'esaminatore chiede al soggetto di riprodurla toccando i cubetti nello stesso ordine (sono disponibili anche versioni computerizzate per esempio sulla piattaforma Pebl-2). Vengono presentate tre sequenze per ogni serie. Se il soggetto riproduce correttamente almeno due sequenze su tre, si passa ad esaminare la serie successiva. Il numero di cubetti relativo alla serie più lunga, per la quale sono state riprodotte correttamente almeno due sequenze, costituisce il punteggio del test che rappresenta lo span di memoria spaziale di quel soggetto. Lo span di memoria spaziale medio è uguale all'incirca a 5,

ma sono state trovate differenze statisticamente significative tra punteggi medi in funzione dell'età e della scolarità in campioni di adulti e anziani (Spinnler e Tognoni, 1987). Su un campione di studenti universitari sono state trovate differenze statisticamente significative di rendimento tra maschi e femmine, a favore dei primi, oltreché differenze per età e scolarità (Orsini et al, 1982). Inoltre, per la somministrazione del test di Corsi è possibile utilizzare una versione computerizzata, disponibile sulla piattaforma software Pebl-2.

### **2.3 Neurofeedback e memoria di lavoro**

Il training di neurofeedback (NFT) ha rivelato i suoi effetti terapeutici per il trattamento di una varietà di disturbi neurologici e psicologici e ha dimostrato la sua fattibilità per migliorare alcune funzioni cognitive nei partecipanti a diversi studi. I sistemi di neurofeedback utilizzano l'EEG come tecnica di registrazione perché è relativamente economica, portatile ed ha una buona facilità di installazione. Come già affermato in precedenza, diversi studi hanno dimostrato che l'addestramento con neurofeedback ha effetti terapeutici per il trattamento di una serie di disturbi neurologici e psicologici, quali l'epilessia (Serman, 2000; Reddy & Sneha, 2019), il disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD) (Enriquez-Geppert et al., 2019; Monastra et al., 2006) e disturbi da dipendenza (Peniston & Kulkosky, 1989; Dave & Tripathi, 2022), tra gli altri. Inoltre, questo allenamento applicato a utenti sani ha dimostrato la sua capacità di migliorare alcune capacità cognitive (Loriette et al., 2021; Jirayucharoensak et al., 2019).

Caratterizzato da differenze individuali, un disegno NFT in banda alpha è uno dei protocolli più efficaci (Bazanov & Aftanas., 2010) e funzionali nel miglioramento delle prestazioni cognitive. Questo tipo di training è stato molto discusso in letteratura e con risultati spesso contrastanti (Gruzelier, 2014; Palva et al., 2007). Negli ultimi due decenni, le ricerche hanno riportato una relazione tra l'attività alpha e le funzioni della memoria (Klimesch, 1996; Klimesch et al. 2006) e hanno dimostrato che le attività alpha e theta sono correlate alle prestazioni della memoria (Klimesch, 1999). Tuttavia, la reattività alpha e le variazioni evento-correlate della potenza alpha mostrano anche che, durante la richiesta di un compito reale, le prestazioni cognitive (in particolare quelle della memoria) aumentano con la soppressione dell'attività alpha. Anche l'elaborazione della memoria è associata all'attività EEG alpha pre-

stimolo (Wang & Hsieh, 2013). Analogamente, è stato dimostrato che l'NFT alpha produce miglioramenti significativi nella memoria di lavoro (Zoefel et al., 2011). Questi studi hanno indicato che i miglioramenti nella memoria a breve termine sono positivamente correlati a un aumento dell'ampiezza relativa della banda upper alpha individuale durante il training, in particolare quando il segnale EEG è registrato dal canale Cz (Nan et al., 2012).

In un altro studio, soggetti con lieve deterioramento cognitivo sono stati addestrati ad aumentare la potenza della banda upper alpha individuale del segnale dell'elettroencefalogramma (EEG) sulla regione parietale centrale. È stato osservato un aumento della frequenza alpha di picco per tutto il periodo del training e anche le prestazioni della memoria sono migliorate significativamente (Lavy et al., 2019). Un altro studio NFT ha fornito risultati promettenti che dimostrano l'allenabilità del ritmo alpha fronto-parietale e le sue correlazioni funzionali con la memoria di lavoro e la memoria episodica (Hsueh et al., 2012). Questi risultati supportano l'importanza della modulazione alpha nei miglioramenti cognitivi e sebbene durante l'NFT venga utilizzata per l'addestramento una specifica attività EEG su una determinata regione cerebrale, ciò produce cambiamenti anche in regioni cerebrali diverse da quella del training (Kober et al., 2015; Ros et al., 2020).

Bazanov e Aftanas (2010) hanno affermato che il ritmo alpha è caratterizzato da differenze individuali e di conseguenza il training più efficace si basa su un progetto individualizzato e non uguale per ogni individuo. Infatti, solo il 75%-80% dei protocolli standard di neurofeedback ha dimostrato efficacia.

Bazanov et al. (2018) hanno confrontato un training theta/beta standard, uno individualizzato ed uno EMG-individualizzato per il trattamento dell'ADHD con neurofeedback ed hanno dimostrato che un training individualizzato delle bande di frequenza poteva migliorare l'efficienza del neurofeedback, così come il controllo del movimento oculare durante il training.

Il fascino di effettuare un training cognitivo risiede nella possibilità di potenziare direttamente le attività neurali associate a una buona memoria e quindi di ridurre i momenti di vuoto di memoria. Per definizione, la memoria di lavoro condivide molto con altre funzioni cognitive fondamentali (ad esempio, il controllo cognitivo e l'attenzione), che sono fortemente associate alle prestazioni nei test di intelligenza (Chen et al., 2019). Le misurazioni dell'attività neurale sono dei forti predittori di lievi compromissioni cognitive in persone con vari tipi di

deficit cognitivi. I cambiamenti elettrofisiologici relativi alla memoria di lavoro sono alcuni dei segnali più precoci del rischio preclinico di deterioramento cognitivo lieve (Jiang et al., 2021).

Utilizzando il neuroimaging funzionale, le regioni cerebrali che sono state costantemente implicate nei training di neurofeedback in tempo reale, hanno incluso l'insula anteriore (controllo cognitivo, autoconsapevolezza) e i gangli della base (integrazione sensomotoria, apprendimento implicito), indipendentemente dalla regione di interesse mirata (Memmert et al., 2016). Esistono diverse reti coinvolte nelle funzioni cognitive e affettive (Trambaiolli et al., 2021) e ciò si nota in particolare negli studi basati sulla fMRI che consentono una migliore definizione spaziale delle strutture coinvolte durante tali processi (Skottnik et al., 2019; Direito et al., 2021).

L'invecchiamento cognitivo è causato da cambiamenti sinaptici, metabolici e strutturali che portano lentamente alla perdita della piena funzione cognitiva. L'EEG misura le funzioni sinaptiche sincronizzate e la rete a livello dello scalpo. Lavori recenti hanno identificato le alterazioni neuro-sinaptiche come uno dei primi biomarcatori della malattia di Alzheimer preclinica, comparando prima dell'insorgenza di lesioni neuronali mediate dalla proteina-tau o di cambiamenti della struttura cerebrale (Jack et al., 2011; Sperling et al., 2011). Tra i sintomi precoci più comuni della demenza vi sono i deficit della memoria di lavoro. Gli esatti meccanismi neurali che sottostanno alla regolazione della memoria di lavoro sono ancora oggetto di dibattito nella letteratura scientifica (Mi et al., 2017). Sono stati presentati diversi e modelli per spiegare il funzionamento della memoria e le sue implicazioni nel funzionamento cognitivo.

Il "modello della frequenza" ipotizza che la Memoria di lavoro determina la riattivazione periodica delle rappresentazioni di memoria ad ogni ciclo gamma all'interno delle oscillazioni gamma-theta nella zona dell'ippocampo, mediate da depolarizzazioni lente consecutive e con una costante di tempo che dovrebbe corrispondere al periodo theta. Supponendo che ogni memoria venga attivata esattamente una volta durante un ciclo di burst theta, gli stessi ricordi vengono riattivati ripetutamente nei cicli theta successivi (Lisman e Idiart, 1995). Le frequenze più elevate, come i ritmi gamma, sono associati a deficit cognitivi. Gli studi sulla stimolazione cognitiva, che hanno applicato il trattamento della frequenza gamma nel decadimento cognitivo lieve e nella malattia di Alzheimer lieve, hanno gettato le basi per i futuri trattamenti con neurofeedback per il ritmo gamma (Wong et al., 2021; Mimenza-Alvarado et al., 2021).

Il modello del “persistent firing” ipotizza che la memoria di lavoro sia supportata dall’attività persistente di alcuni neuroni attivi nella corteccia prefrontale, nell’ippocampo, nel distretto parietale e in altre reti corticali e sottocorticali, in assenza di stimoli percettivi diretti. Ad esempio, nei siti frontali si osserva una maggiore attività EEG durante il recupero della memoria, diversa dai potenziali evocati visivamente durante la percezione. Questo modello si propone di spiegare come la rete di memoria supporti le funzioni della memoria di lavoro attraverso oscillazioni sincronizzate alla stessa frequenza in diverse regioni cerebrali. Recenti evidenze in modelli animali e con il sostegno delle neuroimmagini hanno evidenziato che le reti di connettività cerebrale possono essere definiti neuro-marcatori indicatori di deficit precoci nel rischio di demenza di Alzheimer (Zhang et al., 2012). In modelli di ricerca animali è stato riscontrato che i peptidi della Beta amiloide (A $\beta$ ) interrompono l’attività neurale a livello sinaptico e inducono modelli di attività anomali nei circuiti delle reti neurali all’interno e tra le regioni cerebrali (Palop e Mucke, 2010).

I modelli di connettività funzionale del cervello negli esseri umani sono altamente predittivi delle prestazioni cognitive (Hachinski et al., 2006). I segnali cerebrali a livello ematico-ossigeno-dipendente misurati con la risonanza magnetica funzionale mostrano che la connettività cerebrale (in particolare quella parietale e fronto-temporale bilaterale) è correlata ai biomarcatori di Demenza di Alzheimer nel liquor (A $\beta$  e tau), in particolare durante i compiti di memoria di lavoro (Jiang et al., 2016; LeDoux, 2020).

La “teoria sinaptica della memoria di lavoro” ha proposto che le sinapsi siano coinvolte nell’immagazzinamento di informazioni a breve termine nei circuiti neurali (Mongillo et al., 2008). Secondo questo modello, la memoria di lavoro si basa su un meccanismo di facilitazione sinaptica specifico per ogni elemento, il quale non richiede un’attivazione costante e ad alta frequenza dei neuroni durante l’intero compito di memoria, risultando più efficiente come schema funzionale (Mi et al., 2017). Inoltre, è stato osservato che le oscillazioni dell’EEG e l’attività della rete neuronale a riposo sono strettamente correlate alle prestazioni nella memoria di lavoro (Borhani et al., 2019) e al deterioramento cognitivo (McBride et al., 2013).

Il neurofeedback applicato alle zone della corteccia frontale e pre-frontale migliora i comportamenti orientati agli obiettivi e le funzioni esecutive. I comportamenti orientati agli obiettivi sono fortemente associati all’attività cerebrale della corteccia prefrontale (Miller & Cohen, 2001). Le funzioni esecutive comprendono, invece, i processi mentali che consentono

agli individui di assumere il controllo sulle risposte automatiche del cervello per produrre comportamenti orientati agli obiettivi (Garon et al., 2008).

Le funzioni della corteccia prefrontale comprendono la pianificazione, la definizione degli obiettivi, il processo decisionale, l'attenzione volontaria, il cambio di compito, il cambio di set, le inibizioni comportamentali e percettive, la regolazione volontaria e la correzione degli errori. Nel neurofeedback terapeutico, in particolare quello che mira al miglioramento del controllo cognitivo, alcune funzioni sembrano essere fondamentali per stabilire la ricompensa intrinseca, integrare le informazioni di feedback e autoregolare il comportamento. La maggior parte di queste funzioni interagisce con l'attenzione, un concetto ampio che può essere definito come l'insieme dei processi che si occupano dell'allocazione della memoria di lavoro alle diverse rappresentazioni neurali disponibili nel cervello (Knudsen, 2007).

L'attenzione svolge un ruolo fondamentale nell'allocazione delle risorse cerebrali alla memoria di lavoro, mentre la cognizione di alto livello si basa sulla memoria di lavoro per apprendere i compiti (Cowan et al., 2005). Alcuni studi indicano un meccanismo neurale condiviso che supporta sia l'attenzione che la memoria di lavoro (Ikkai & Curtis, 2011; Gazzaley & Nobre, 2012). I meccanismi neurali condivisi supportano la teoria secondo cui esiste anche una connessione reciproca tra le due funzioni cognitive. In quest'ottica sarebbe utile integrare programmi di training con neurofeedback che abbiano in considerazione eventi correlati ad entrambe le funzioni cognitive di working memory ed attenzione (Jiang et al., 2018; Ledoux, 2020).

Studi sul training di neurofeedback in popolazioni giovani e sane hanno indicato che il protocollo standard SMR potrebbe essere un metodo efficace per aumentare la memoria di lavoro semantica, migliorare l'attenzione e la capacità percettiva, ridurre i tempi di reazione e gli errori di esecuzione (Vernon et al., 2003). D'altra parte, gli studi sull'invecchiamento cognitivo hanno evidenziato la necessità di nuovi strumenti, tecnologie e mezzi che favoriscano la protezione e la conservazione dell'attività cerebrale, poiché il suo declino compromette la qualità di vita e aumenta i fattori di rischio per la demenza (Lustig et al., 2009). Come strumento unico per migliorare le funzioni cognitive oltreché intervenire su disturbi d'ansia e/o depressivi, il neurofeedback può essere molto utile sia per il trattamento dei sintomi associati alle demenze che per l'intervento sulle popolazioni più esposte a tali problematiche. Tale trattamento è stato proposto anche come metodo di intervento per il lavoro sui traumi e sul disturbo post-traumatico

da stress (Fisher, 2004; Van der Kolk et al., 2016). Il valore aggiunto di questa metodologia di intervento è di poter avere un monitoraggio reale della regolazione cerebrale consentendo anche un intervento mirato e personalizzato per migliorare le funzioni cognitive e affrontare specifiche problematiche mentali.

## **Capitolo terzo**

### **Neurofeedback e ansia**

#### **3.1 L'ansia in Neuropsicologia**

Il termine “ansia” può riferirsi a una serie di fenomeni simili, tra cui una classe di disturbi psichiatrici, alcuni modelli di comportamento nei modelli animali e/o affetti negativi simili a tratti (Steimer, 2022). L'ansia è caratterizzata da aumento dell'arousal, dell'attivazione autonoma e neuroendocrina e da specifici modelli di comportamento. La funzione di questi cambiamenti è quella di facilitare la gestione di una situazione avversa o inaspettata.

L'ansia patologica interferisce significativamente con la capacità di affrontare con successo le sfide della vita. Una recente prospettiva suggerisce che l'ansia sia uno stato emotivo orientato al futuro, sperimentato in varia misura da tutti gli esseri umani (Chen et al., 2021; Diotaiuti et al., 2021). È abbastanza probabile che la frequenza e l'intensità delle risposte di paura di un dato individuo a una chiara e imminente minaccia fisica o psicologica siano inferiori alla quantità di paura in risposta all'anticipazione di tali eventi e alle rappresentazioni mentali ansiose del tipo “e se...” di possibili eventi futuri. La paura e l'ansia possono essere distinte in base al grado di certezza che si ha circa la probabilità, la tempistica o la natura di una minaccia futura (Rosen & Schulkin, 1998; Davis et al., 2010).

Decenni di ricerche su modelli con roditori hanno fornito un'enorme conoscenza dei sistemi di difesa gerarchicamente organizzati, della neurobiologia sottostante a questi sistemi e delle circostanze in cui vengono reclutate le diverse risposte difensive (Gray & McNaughton, 2000). Tutte le specie animali hanno modi innati di affrontare le minacce percepite. Anche se nella vita ci sono molte possibili fonti di pericolo, i meccanismi di difesa del cervello, che si sono evoluti per affrontare la predazione, sono una base fondamentale su cui sono costruite la paura e l'ansia. Le risposte antipredatorie classiche sono riassunte dall'espressione “risposta attacco-fuga”. Coniata da Walter Cannon all'inizio del XX secolo, questa espressione descrive i comportamenti messi in atto in situazioni di emergenza in cui è in gioco la vita o il benessere. “Congelato dalla paura” è un'altra espressione di uso comune per descrivere un comportamento



difensivo vitale. Il congelamento è una tipica risposta di difesa di molte specie molto efficace in presenza di una minaccia. Questo comportamento adattivo aiuta a ridurre la possibilità di essere visti dal predatore oltretutto far perdere l'appetibilità. Per molti animali la strategia difensiva chiave si articola principalmente in tre parti: in primo luogo congelare il movimento; fuggire se è possibile; e combattere se è necessario.

Congelamento, fuga e lotta sono reazioni di difesa attivate automaticamente da stimoli esterni e sono espresse allo stesso modo (o in modi molto simili) in tutti i membri di una specie.

Il Sistema nervoso autonomo è formato da due componenti, il sistema simpatico e quello parasimpatico. Ciascun sistema invia fibre nervose ai vari tessuti e organi del corpo, regolandone il funzionamento. Originariamente si pensava che il simpatico prendesse il controllo in situazioni che richiedevano la mobilitazione di energia, per esempio quando era in questione la vita o il benessere, mentre il parasimpatico si contrapponeva alla risposta del simpatico, ristabilendo nel corpo l'equilibrio ogni volta che il pericolo veniva superato. Se questo punto di vista è ancora generalmente accettato, è ormai riconosciuto che le due componenti interagiscono in modi più complessi di quanto originariamente si pensasse.

Cannon (1920) ha evidenziato che i comportamenti difensivi richiedono energia e l'attivazione dei nervi simpatici è essenziale per la gestione delle risorse energetiche. Pertanto, l'attività nervosa simpatica aumenta la respirazione, che aiuta a convertire l'acido lattico in glucosio e a rifornire i muscoli della loro principale fonte di energia. Inoltre, innalza la frequenza cardiaca, aumentando il flusso di sangue attraverso il sistema circolatorio per facilitare l'apporto di energia ai muscoli. I nervi del simpatico partecipano anche alla redistribuzione del sangue nel corpo, al fine di dirigere l'energia ai muscoli necessari per la lotta o la fuga. A questo scopo, va ridotto il flusso di sangue verso settori quali l'intestino e la pelle e aumentato quello verso gli arti. Questo risultato è ottenuto con la costrizione e il rilassamento dei vasi sanguigni nei tessuti del corpo interessati. La diminuzione del flusso nella pelle ha anche il vantaggio di ridurre la perdita di sangue nel caso di una ferita. Cannon usò il termine "sistema simpatico-adrenergico" per descrivere quest'azione combinata dei nervi simpatici e degli ormoni del midollo surrenale alla base della reazione lotta/fuga.

I meccanismi cerebrali che sono alterati nei disturbi di paura e ansia possono essere compresi nei termini dei meccanismi fondamentali che sono alla base dell'elaborazione delle minacce e del controllo delle risposte di difesa negli animali e nei soggetti sani. I circuiti che sono

responsabili di queste funzioni sono all'interno dell'amigdala, dello striato ventrale (NAcc), dell'amigdala estesa (BNST), dell'ippocampo e di varie zone della corteccia prefrontale (corteccia prefrontale laterale e mesiale, corteccia orbito-frontale, corteccia del cingolo anteriore e corteccia insulare) (Grupe & Nitschke, 2013; Mathew et al., 2008; Tuescher et al., 2011).

I comportamenti e i pensieri evitanti, tra cui la preoccupazione, impediscono agli individui ansiosi di essere esposti a prove che potrebbero contraddire le previsioni negative sul futuro (Borkovec et al., 2004).

Secondo la classica teoria dei due processi (Mowrer & Lamoreaux, 1946), la risposta esagerata alla paura di fronte a segnali di minaccia ambientale porta all'apprendimento operante di comportamenti di evitamento per ridurre la paura. Mentre si presume che questi processi operino implicitamente nei modelli animali, l'estensione di questo pensiero ai disturbi d'ansia umani suggerisce che l'evitamento può aumentare ulteriormente le aspettative di minaccia in condizioni di incertezza. Poiché gli eventi evitati o di cui ci si preoccupa di solito non si verificano, le tendenze comportamentali e cognitive all'evitamento vengono rinforzate negativamente e gli individui ansiosi sviluppano la falsa convinzione di aver impedito questi esiti negativi (Borkovec et al., 1999).

Secondo i principi della teoria dell'elaborazione emotiva e della terapia dell'esposizione (Foa & Kozak, 1989), gli interventi psicologici efficaci per i disturbi di paura e ansia richiedono l'attivazione della "struttura della paura" dell'individuo, che apre la strada a nuove informazioni sulla sicurezza che si pongono in competizione con le convinzioni o i ricordi di paura esistenti. In questo modo, la terapia basata sull'esposizione è funzionalmente simile al training dell'estinzione in laboratorio e mira direttamente al comportamento evitante. Il disturbo d'ansia di stato, il disturbo post-traumatico da stress e il disturbo ossessivo compulsivo sono caratterizzati da comportamenti di evitamento di situazioni potenzialmente minacciose o dannose. I pazienti con disturbo di panico sviluppano la convinzione di potersi impegnare in pensieri o azioni di ricerca di sicurezza che prevengono gli attacchi di panico; in realtà, però, tali attività proteggono lo stimolo condizionato dall'estinzione, come è stato dimostrato nei modelli animali di apprendimento dell'evitamento (Bouton et al., 2001).

Nelle persone che soffrono di ansia generalizzata, il più diffuso dei disturbi di paura/ansia, si ha un aumento della sensibilità al rilevamento delle minacce (Barlow et al., 2002). In casi

estremi quasi tutto può essere minaccioso e innescare comportamenti difensivi (congelamento, evitamento), aumentare l'eccitamento cerebrale (attraverso il rilascio di noradrenalina e dopamina) e innescare le risposte allo stress (attraverso l'attivazione del sistema nervoso autonomo e il rilascio di ormoni dello stress, in particolare adrenalina, noradrenalina e cortisolo).

La tendenza a vedere come una minaccia anche situazioni non pericolose è indicata con il termine bias (pregiudizio) interpretativo e la si ritrova sia nell'ansia generalizzata sia in disturbi d'ansia specifici. Le persone che soffrono di questi ultimi hanno pregiudizi particolari: quelle che soffrono di fobia nei confronti dei ragni (aracnofobia) possono essere particolarmente sensibili agli indizi della presenza di un ragno, ma non essere affatto sensibili a quelli che rimandano ai serpenti o a situazioni sociali; le persone con disturbo da attacchi di panico possono essere insolitamente attente a sensazioni corporee che potrebbero segnalare un attacco; le persone che soffrono di disturbo post-traumatico da stress legato a eventi di guerra possono essere ipersensibili al suono del ritorno di fiamma nella marmitta delle auto o alla vista del sangue o di armi. Il più delle volte in queste risposte esasperate alle minacce è presente un'iperattività dell'amigdala (Mineka & Zinbarg, 2006). La focalizzazione sulla minaccia può impedire di prestare attenzione ad altri fattori che in circostanze normali potrebbero ridurre il rischio per la propria sopravvivenza.

Le persone con un disturbo d'ansia, essendo impegnate nel preoccuparsi, evitano di provare intense emozioni negative per i potenziali esiti temuti, ma perdono anche l'opportunità di correggere le convinzioni inesatte sulla probabilità che tali eventi possano realmente accadere. Aiutare i pazienti a superare le loro tendenze evitanti, sia che ciò comporti la messa in discussione dei loro pensieri sulla minaccia nella terapia cognitivo-comportamentale (CBT) (Beck, 1976) o l'esposizione a scenari temuti nella terapia di esposizione (Foa & Kozak, 1989), è un primo passo fondamentale per ridurre l'aumento dell'aspettativa di minaccia di fronte all'incertezza.

L'ansia può essere attivata anche da stimoli solo debolmente associati al pericolo. Le situazioni nuove in cui una persona non sa esattamente cosa aspettarsi possono a loro volta innescare l'ansia. Inoltre, l'ansia può svilupparsi quando, indipendentemente da eventi esterni, particolari ricordi o pensieri portano a preoccuparsi. In ciascuno di questi casi, una volta che lo stimolo, la situazione, il pensiero o la memoria attirano l'attenzione ed entrano nella memoria

di lavoro, essi vengono interpretati alla luce dei modelli cognitivi e degli schemi che si fondano sulla memoria semantica ed episodica, e danno origine a stati di coscienza noetici e auto-noetici che includono implicazioni per il sé (LeDoux, 2020).

Durante questo processo le rappresentazioni degli stimoli, delle situazioni, dei pensieri e dei ricordi, attivano i circuiti difensivi di sopravvivenza, portando all'eccitamento cerebrale e ad altre conseguenze fisiologiche nel corpo, nonché ad altri aspetti degli stati motivazionali difensivi che sostengono l'attenzione nei confronti dello stimolo, del pensiero o del ricordo ansiogeno.

L'ansia, proprio come la paura, non è il risultato diretto dell'attivazione di un circuito di sopravvivenza. È un'interpretazione cognitiva che a volte, ma non sempre, dipende dall'attività del circuito di sopravvivenza nel generare sentimenti autocoscienti.

Gli stati di ansia esistenziale (come la percezione di condurre una vita poco significativa o la prospettiva della morte) non dipendono dai circuiti di sopravvivenza, ma sono preoccupazioni di alto livello che vivono nell'autocoscienza. Queste, possono avere un impatto indiretto sulle attività del circuito di sopravvivenza, ma coinvolgono soprattutto concetti astratti legati alle scelte e alle loro potenziali conseguenze in situazioni future presagite, tutte incentrate sul sé conscio.

Dunque, l'ansia coinvolge l'individuo in una proiezione del futuro, spesso catastrofica che porta all'attivazione cerebrale del circuito di difesa. In uno studio di validazione italiana della Temporal Focus Scale (Diotaiuti et al., 2021), a cui ho collaborato, sono state individuate correlazioni significative tra il focus temporale (presente, passato o futuro) e le disposizioni individuali di ansia o depressione dei soggetti coinvolti. Il focus temporale può essere definito come la componente cognitiva che indica la misura in cui gli individui incentrano la loro attenzione al passato, al presente e al futuro (Shipp et al., 2009). Le correlazioni positive emerse tra il focus temporale incentrato sul futuro e le misure di ansia (di tratto e di stato) mostrano che una persona ansiosa vive nel costante timore che il futuro prossimo sia caratterizzato da esiti negativi che la renderebbero incapace di gestire la situazione. Nel tentativo di controllare l'ansia, anticipa un futuro che non esiste e che viene vissuto in modo eccessivamente minaccioso.

Alcuni studiosi hanno analizzato le associazioni tra prospettiva temporale e ansia di tratto tra gli studenti universitari (Zimbardo & Boyd, 2014) e tra prospettiva temporale e sintomi di

ansia (Stolarski & Matthews, 2016; Zhang & Howell, 2011). Questi studi hanno dimostrato che l'ansia è associata sia al passato negativo che al futuro negativo. Pertanto si evidenzia la questione secondo cui aver vissuto eventi traumatici o esperienze negative in passato, suscita nell'individuo l'attivazione di pensieri negativi riguardo il proprio futuro in una determinata situazione.

La focalizzazione attentiva su finali catastrofici fa in modo che si attivi nella persona il circuito di difesa e conseguentemente la sensazione di ansia. Zaleski (1996) ha introdotto il concetto di "ansia da futuro" considerandola come una caratteristica di personalità in cui una prospettiva temporale futura negativa precede lo sviluppo dell'ansia.

Lo studio delle reazioni e dei comportamenti legati all'ansia ha portato a diversi studi sull'attivazione cerebrale, anche attraverso l'uso di strumentazioni come la risonanza magnetica, la spettroscopia funzionale e l'elettroencefalogramma. Clancy et al. (2017) con tecnica di rilevazione EEG hanno evidenziato che i pazienti con PTSD mostrano un'elevata potenza relativa dei ritmi beta, insieme a una ridotta potenza relativa dei ritmi alpha. Ciò è coerente con le osservazioni dei sintomi dell'iperarousal comportamentale in questi soggetti. Inoltre, i pazienti con PTSD hanno dimostrato associazioni significative tra la ritmicità alpha e l'iperarousal (Ros et al., 2014) o il controllo degli impulsi (Clancy et al., 2017), mentre i deficit di disattenzione legati al PTSD erano correlati positivamente con la potenza beta e negativamente con la potenza alpha in uno studio con adulti sui traumi infantili (Lee et al., 2017).

Le persone con dipendenza da alcol, che notoriamente presentano sintomi di ansia, mostrano un eccesso di potenza beta (Porjesz & Begleiter, 2003), mentre sono state trovate anche associazioni genetiche tra il neuromodulatore inibitorio GABA, la dipendenza da alcol e le oscillazioni beta (Binder & Nemeroff, 2010). Altrove, l'ormone di rilascio della corticotropina, un ormone coinvolto nella risposta allo stress, è stato associato alle oscillazioni alpha a riposo (Enoch et al., 2008).

### **3.2 Gli strumenti di valutazione dell'ansia**

Nella letteratura scientifica si ritrovano diversi modelli e teorie che spiegano l'insorgenza e la cronicizzazione dei disturbi d'ansia. Secondo il modello cognitivo dell'ansia di Clark & Beck (2010), l'ansia viene determinata da un evento stimolo attivante e che può essere rappresentato da una sensazione fisica, un pensiero, un'immagine o una situazione esterna. Lo stimolo viene valutato inizialmente in modo rapido e involontario. Per gli individui ansiosi questo stimolo attivante assume una valenza negativa perché percepito come un possibile pericolo. Lo stimolo attiva, così, la modalità primitiva di minaccia. I pensieri sono sempre più veloci ed automatici e fanno in modo che la persona possa perdere la consapevolezza del motivo per cui si sono agitati. La minaccia viene vissuta in modo pervasivo e non permette di vedere altro, se non la minaccia stessa. Tale modalità determina la comparsa dei sintomi dell'ansia.

Le differenze individuali nelle reazioni agli stimoli ansiogeni dipendono dal modo in cui viene valutata la minaccia e si giudicano le risorse personali per affrontare il pericolo. Un aspetto chiave della valutazione secondaria agli stimoli ansiogeni risiede nella capacità di definire la propria abilità di affrontare la minaccia percepita.

Diversi autori hanno cercato di studiare e misurare l'atteggiamento preoccupato dei soggetti riguardo ai propri stati fisici e ai correlati relativi all'emozione dell'ansia.

Uno dei costrutti più conosciuti è quello dell'Anxiety sensitivity, che è stato definito come la paura delle sensazioni somatiche dell'ansia e legato alla credenza che queste abbiano conseguenze disastrose sull'individuo (Reiss, 1985). L'Anxiety sensitivity è concettualizzata come un amplificatore dell'ansia: le persone altamente sensibili all'ansia ritengono che la loro stessa eccitazione sia pericolosa, e quindi sperimentano un'ansia intensificata in risposta a stimoli che suscitano paura (Taylor, 2014). Si ritiene che essa svolga un ruolo significativo nello sviluppo e nel mantenimento dei disturbi d'ansia. In uno studio si è dimostrato che l'Anxiety sensitivity è maggiore tra i pazienti con disturbi d'ansia rispetto ai gruppi di controllo (Olatunji & Wolitzky-Taylor, 2009) e un alto livello di questo indicatore che una persona può raggiungere è un fattore di rischio per lo sviluppo di un disturbo d'ansia (Wheaton et al., 2012). Da tale costrutto è stato strutturato e validato uno dei questionari più utilizzati in campo clinico, l'ASI (Anxiety Sensitivity Index) (Reiss et al. 1986). L'ASI è una scala self-report di 16 item che misura il grado di preoccupazione per le possibili conseguenze negative dei sintomi d'ansia. L'ASI è stato tradotto in diverse lingue e le sue caratteristiche sono risultate stabili in diverse

culture sia per i gruppi clinici che per quelli non clinici (Reiss, 1991). Gli studi condotti su popolazioni cliniche e non cliniche hanno inoltre dimostrato che l'ASI ha solide proprietà psicometriche, tra cui l'evidenza della sua elevata coerenza interna, l'alta affidabilità test-retest, la validità correlata al criterio nel distinguere i pazienti con disturbi d'ansia dai controlli e la validità di costrutto come misura della "paura della paura", distinta dall'ansia di tratto (Maller & Reiss, 1992; Isyanov & Calamari, 2004).

Sebbene l'ASI sia stato costruito come misura unidimensionale, diversi studi analitici fattoriali sull'ASI hanno fornito supporto per una struttura gerarchica multidimensionale che consiste di un singolo fattore di ordine superiore (cioè l'AS) e un certo numero di fattori di ordine inferiore, con soluzioni che vanno da uno a quattro fattori (Zinbarg, Barlow & Brown, 1997; Rodriguez et al., 2004). La soluzione fattoriale più comunemente replicata è costituita da tre fattori correlati: preoccupazione fisica (PC), preoccupazione sociale (SC) e preoccupazione cognitiva (CC) (Taylor et al., 2007).

L'Anxiety sensitivity in generale è considerato un fattore di vulnerabilità simile a un tratto, comune a molti problemi d'ansia (Wheaton et al., 2012), mentre i tre fattori di ordine inferiore possono riflettere modalità specifiche attraverso le quali l'Anxiety sensitivity sviluppa e mantiene diversi sintomi di salute mentale. Per esempio, la ricerca suggerisce che la dimensione "preoccupazione fisica" è più fortemente associata agli attacchi di panico e al disturbo di panico, rispetto alle preoccupazioni sociali o cognitive (Deacon & Abramowitz, 2006). Le preoccupazioni sociali sono più fortemente correlate alla diagnosi di fobia sociale (SP; Taylor et al., 2007), mentre alcuni studi hanno suggerito che il disturbo d'ansia generalizzato potrebbe essere caratterizzato da elevate preoccupazioni cognitive (Rector et al., 2007). Taylor et al., (2007) hanno effettuato dei miglioramenti delle proprietà psicometriche nell'ASI-3, rispetto all'ASI. L'ASI-3 ha dimostrato una struttura fattoriale più stabile e una maggiore validità di costrutto rispetto all'ASI. Pertanto, l'uso dell'ASI-3 è preferibile a quello dell'ASI, soprattutto quando si studiano le tre dimensioni dell'Anxiety sensitivity.

Un altro strumento frequentemente utilizzato per la misurazione dell'ansia di stato e di tratto è lo State-Trait Anxiety Inventory (STAI), ideato da Spielberger et al. (1983). Questo strumento può essere utilizzato in ambito clinico per diagnosticare l'ansia e distinguerla dalle sindromi depressive. Inoltre, viene spesso utilizzato nella ricerca (ad esempio, Greene et al., 2017, Ugalde et al., 2014; Diotaiuti et al., 2022).

Lo STAI, nella sua forma Y, si presenta suddiviso in due scale (Y1 e Y2), che valutano rispettivamente l'ansia di stato, tramite domande riferite a come il soggetto si sente al momento della somministrazione del questionario, e l'ansia di tratto, con domande che indagano come il soggetto si sente abitualmente. È possibile in tal modo operare una prima discriminazione tra l'ansia intesa come sintomo e l'ansia espressa come modalità abituale di risposta agli stimoli esterni.

La costruzione di questo test iniziò nel 1964 con l'elaborazione di un unico gruppo di item, somministrato con modalità diverse, per la misurazione sia dell'ansia di stato che di quella di tratto. Successivamente, ulteriori sviluppi teorici e l'aggiornamento con gli ultimi risultati delle ricerche empiriche, si è proceduto a modificare le caratteristiche e gli item del test, e fu messa a punto la forma X dello STAI. Più di 6000 studenti della High School, 600 pazienti neuropsichiatrici e ospedalizzati, 200 reclusi furono inclusi in uno studio per la standardizzazione e la validazione della forma X del questionario (Spielberger & Gorsuch, 1968).

Successivamente, Spielberger iniziò una sostanziale revisione della scala. Le ragioni principali che guidarono tale operazione furono: sviluppare uno strumento di misura che potesse discriminare maggiormente i sentimenti di ansia da quelli di tristezza/depressione e che permettesse una migliore diagnosi differenziale tra pazienti colpiti da disturbi d'ansia o da reazioni depressive; migliorare la struttura della scala con un più adeguato bilanciamento tra le voci dell'ansia presente e dell'ansia assente; sostituire alcune voci che si prestavano ad interpretazioni particolari. Nella nuova forma Y fu sostituito il 30% degli item della forma X, migliorando le proprietà psicometriche di entrambe le sub-scale.

Lo State-Trait Anxiety Inventory forma Y (Spielberger et al., 1983) (Traduzione italiana a cura di Pedrabissi & Santinello, 1989) è un questionario di autovalutazione, in forma di Scala Likert, dove il soggetto valuta su una scala da 1 a 4 (con 1 = per nulla e 4 = moltissimo) quanto diverse affermazioni si addicono al proprio comportamento. La STAI è composta da un totale di 40 domande, 20 riguardano l'ansia di stato (Y1) e 20 l'ansia di tratto (Y2).

L'ansia di stato indica quanto la persona si percepisca in ansia in un determinato momento ed esprime una sensazione soggettiva di tensione e preoccupazione, comportamenti relazionali di evitamento (o avvicinamento eccessivo e prematuro) e un aumento dell'attività del sistema nervoso autonomo (incremento della frequenza cardiaca, della tensione muscolare, della



risposta galvanica...etc..) relativa ad una situazione stimolo, quindi transitoria e di intensità variabile.

L'ansia di tratto, invece, si riferisce a come il soggetto si sente abitualmente, rappresenta, dunque, una condizione più duratura e stabile della personalità che caratterizza l'individuo in modo continuativo, indipendentemente da una situazione particolare (Vigneau, & Cormier, 2008). Lo STAI-Y può essere somministrato sia a singole persone che a gruppi. Il questionario non ha limiti di tempo, ma di solito si impiegano circa 8/10 minuti per completare una delle scale e all'incirca 15/20 per completarle entrambe.

Le istruzioni nelle due scale sono diverse: nella scala di Stato si chiede al soggetto di indicare come si sente adesso, nell'esatto momento in cui si trova, mentre nella scala di tratto si chiede al soggetto di indicare come si sente abitualmente.

La scala di stato viene sempre fatta compilare per prima poiché è sensibile alle condizioni nelle quali il soggetto affronta il test ed il relativo punteggio può essere influenzato dal clima emotivo che si può creare se viene somministrata prima la scala di tratto. Inoltre, le due sottoscale possono essere utilizzate anche separatamente ed indipendentemente l'una dall'altra, soprattutto per scopi di ricerca. Si ricavano quindi due punteggi: uno per l'ansia di tratto ed uno per l'ansia di stato.

Gli item sull'ansia di stato includono affermazioni del tipo: "Sono teso, sono preoccupato" e "Mi sento calmo, mi sento sicuro" (in reverse). Gli item dell'ansia di tratto includono, invece, affermazioni del tipo: "Mi preoccupo troppo per qualcosa che in realtà non ha importanza" e "Sono soddisfatto, sono una persona stabile" (in reverse). Tutti gli item sono valutati su una scala a 4 punti (ad esempio, da "Quasi mai" a "Quasi sempre"). Punteggi più alti indicano una maggiore ansia.

I coefficienti di consistenza interna della scala variano da .86 a .95; i coefficienti di affidabilità test-retest variano da .65 a .75 su un intervallo di 2 mesi (Spielberger et al., 1983). La validità del costrutto e la validità concorrente della scala sono state ampiamente dimostrate (Spielberger, 1989).

Gli studi hanno anche dimostrato che il punteggio STAI è un predittore sensibile del disagio del caregiver nel tempo e che può variare con i cambiamenti nei sistemi di supporto, nella salute e in altre caratteristiche individuali (Elliott et al., 2001; Shewchuk et al., 1998).

Recentemente sono state validate anche alcune forme abbreviate della STAI che hanno prodotto punteggi simili a quelli della versione completa. Ad esempio, Bergua et al. (2016) hanno effettuato uno studio di validazione di una forma short a 10 item. La struttura fattoriale della forma abbreviata è paragonabile a quella delle scale complete. I risultati hanno mostrato una buona consistenza interna (i coefficienti alpha erano pari a 0,92 e 0,85 per le scale STAI-Y brevi di stato e di tratto, rispettivamente). Inoltre, entrambe le scale brevi STAI-Y di stato e di tratto hanno classificato correttamente l'88% dei partecipanti utilizzando un punto di cut-off pari a 23.

Come affermato in precedenza, uno dei più autorevoli ricercatori in materia di stati emotivi è sicuramente Beck. A lui ed al suo gruppo di ricerca (Beck et al., 1998) dobbiamo la costruzione e la validazione di uno dei questionari più utilizzati in ambito clinico per la misurazione dell'ansia: il BAI (Beck Anxiety Inventory).

Il Beck Anxiety Inventory è un questionario self-report per misurare la gravità dell'ansia nelle popolazioni psichiatriche. Un pool iniziale di 86 item è stato ricavato da tre scale preesistenti: la Anxiety Checklist, la Physician's Desk Reference Checklist e la Situational Anxiety Checklist (Beck et al., 1993)

Una serie di analisi è stata utilizzata per ridurre il pool di item. La scala finale è composta da 21 item, ognuno dei quali descrive un sintomo comune di ansia. All'intervistato viene chiesto di valutare quanto sia stato infastidito da ciascun sintomo nell'ultima settimana su una scala a 4 punti. Il BAI ha mostrato un'elevata consistenza interna ( $\alpha = .92$ ) e un'affidabilità test-retest su 1 settimana,  $r(81) = .75$ . Il BAI discrimina i gruppi diagnostici ansiosi (disturbo di panico, disturbo d'ansia generalizzato, ecc.) da quelli non ansiosi (depressione maggiore, disturbo distimico, ecc.). Inoltre, il BAI è risultato moderatamente correlato con la Hamilton Anxiety Rating Scale riveduta,  $r(150) = .51$ , e solo lievemente correlato con la Hamilton Depression Rating Scale riveduta,  $r(153) = .25$ .

In questa rassegna ho inserito solo alcuni tra gli strumenti più utilizzati sia in campo di ricerca che in campo clinico. Recentemente sono stati effettuati ulteriori studi per nuove scale di valutazione dell'ansia, anche specifici per determinati aspetti situazionali. Ad esempio, in seguito alla pandemia da Covid-19, Lee (2020) ha sviluppato la Coronavirus Anxiety Scale (CAS), che è un breve test di screening (5 item) di salute mentale per identificare i probabili casi di ansia disfunzionale associati alla crisi COVID-19. La CAS discrimina bene tra persone

con e senza ansia disfunzionale utilizzando un punteggio ottimizzato di  $\geq 9$  (sensibilità del 90% e specificità dell'85%).

Un altro studio (Brunton et al., 2019) ha sviluppato una scala per valutare l'ansia correlata alla gravidanza. Questo strumento, il Pregnancy-related Anxiety Scale (PrAS), ha permesso di evidenziare nove fattori influenti sullo sviluppo dell'ansia nelle gestanti. L'affidabilità della consistenza interna è risultata buona, con la maggior parte delle sottoscale che hanno superato  $\alpha = .80$ . È uno strumento facile da somministrare e i punteggi più alti indicano una maggiore ansia da gravidanza. Anche per lo sport sono stati effettuati diversi studi che possono portare ad una maggiore conoscenza e capacità di valutazione dell'ansia sportiva. Ad esempio Smith et al. (2006) hanno proposto La Sport Anxiety Scale (SAS) che misura le differenze individuali nell'ansia somatica e in due classi di ansia cognitiva: la preoccupazione e il disturbo della concentrazione. La SAS può essere utile per definire in modo più preciso l'ansia legata allo sport e per valutare come le componenti cognitive e somatiche dell'ansia siano correlate alle prestazioni e ad altre misure di risultato nello sport.

La valutazione dell'ansia in diversi contesti, tramite scale psicometriche, contribuisce a una migliore comprensione delle sfumature cognitive e somatiche dell'ansia. In ambito accademico, ad esempio gli studenti universitari affrontano una pressione psicologica, con elevate aspettative e stress legati alle performance, evidenziando l'importanza di comprendere e gestire l'ansia per favorire il benessere durante il percorso di studi.

### **3.3 L'ansia negli studenti universitari**

L'ansia è una condizione di disagio psicologico che negli studenti universitari è caratterizzata da una sensazione di apprensione e preoccupazione costante legata alle attività accademiche ed alla vita universitaria. Questo tipo di ansia può manifestarsi in diversi modi e può avere un impatto significativo sulla vita degli studenti.

Gli studenti universitari spesso si sentono sotto pressione a causa delle aspettative accademiche elevate. Devono affrontare scadenze rigorose, esami impegnativi e la necessità di

mantenere un buon rendimento per raggiungere i propri obiettivi di carriera. Queste pressioni sono causa di ansia e stress.

La letteratura recente ha suggerito che gli studenti devono essere ben preparati per le richieste future; i fattori di stress e le maggiori responsabilità nella vita accademica e sociale portano, spesso, a problemi di salute mentale tra gli studenti universitari (Asif et al., 2020; Fitzpatrick, 2017). La prevalenza e la frequenza dei disturbi mentali variano in diversi contesti culturali a causa di molteplici fattori. Attualmente si ritiene che i problemi di salute mentale siano un problema di salute pubblica molto importante, stimando che circa un terzo delle disabilità a livello mondiale derivino da tali difficoltà (Victoria, 2002).

Gli studenti universitari possono trovarsi ad affrontare numerosi fattori di stress, oltre alle richieste accademiche, che possono contribuire allo sviluppo o all'esacerbazione di problemi di salute mentale. Per gli studenti più giovani, questi possono includere sfide evolutive, tra cui l'aumento della libertà per la presa di decisioni, la sfida alle convinzioni familiari attraverso l'assunzione di comportamenti a rischio o la pressione a fare bene, mentre per quelli in età matura, ci possono essere richieste contrastanti tra lo studio, la famiglia e gli impegni lavorativi (Stallman, 2008). Molti studenti universitari affrontano anche problemi finanziari, come il pagamento delle tasse universitarie, il costo degli alloggi e delle spese quotidiane. Queste preoccupazioni possono contribuire all'ansia, poiché gli studenti cercano di bilanciare le esigenze accademiche con le sfide finanziarie (Iqbal et al., 2015).

Gli studenti possono sperimentare una forte paura di fallire o di non essere all'altezza delle aspettative degli altri (ad es. genitori, professori o colleghi). Questa paura può essere debilitante e influire negativamente sulla fiducia in sé stessi e sul benessere generale. Ad esempio, gli studenti internazionali devono affrontare le differenze culturali e linguistiche, oltre a possibili problematiche di isolamento sociale. L'allargamento della partecipazione all'istruzione terziaria nell'ultimo decennio ha aumentato il numero di studenti che possono essere più vulnerabili alle pressioni accademiche, come gli studenti provenienti da contesti culturalmente e linguisticamente diversi, gli studenti con disabilità fisiche o mentali, o quelli provenienti da contesti in cui sono i primi membri della famiglia a frequentare l'università (Connell et al., 2007).

L'università può essere un ambiente altamente competitivo, in cui gli studenti si confrontano tra loro per ottenere buoni risultati accademici o per raggiungere opportunità di carriera. Questa

competizione può aumentare l'ansia e il senso di insicurezza. I percorsi accademici individuali differiscono principalmente per tempi e per voti. In queste due variabili gli studenti possono vivere la frustrazione di rimanere indietro o di avere voti più bassi rispetto ai compagni di corso (Matar Boumosleh & Jaalouk, 2017). Inoltre, non tutti gli studenti sviluppano le relazioni significative che desiderano nell'ambito universitario.

Per alcuni studenti l'esperienza universitaria comprende un profondo senso di solitudine e difficoltà di adattamento sociale. Il modello della discrepanza cognitiva di Peplau e Perlman (1984) considera la solitudine come una discrepanza cognitiva tra le relazioni sociali desiderate e quelle sperimentate. Questo modello può essere particolarmente utile per definire l'esperienza di solitudine degli studenti universitari, soprattutto perché tale esperienza non è necessariamente legata all'isolamento sociale (Richardson et al., 2017). Il modello aiuta a spiegare come la solitudine possa essere una problematica per gli studenti nonostante siano circondati da coetanei nel contesto universitario. Gli studenti possono sperimentare alti livelli di contatto sociale ma sentirsi comunque soli a causa delle discrepanze cognitive tra la qualità desiderata delle relazioni e le reali esperienze vissute (Moeller & Seehuus 2019).

In uno studio, Laursen e Hartl (2013) hanno riscontrato che il tempo trascorso da soli non era predittivo delle esperienze di solitudine degli adolescenti. Tuttavia, il fatto di essere soli la sera del fine settimana era maggiormente predittivo della solitudine riferita.

Un altro studio (Lodder et al., 2017) ha sottolineato che è la qualità dei contatti sociali e la corrispondenza o meno con le relazioni desiderate, e non la quantità di relazioni, a essere più utile per comprendere la solitudine dei giovani.

Tra le varie situazioni che possono causare l'ansia negli studenti universitari, sicuramente l'esame riveste un ruolo centrale. Infatti, l'ansia per l'esame riveste un tipo di problematica che può essere slegata dalle altre forme di ansia. L'ansia da esame è un tipo specifico di ansia che si manifesta quando gli studenti si avvicinano a un esame o a una valutazione accademica importante. È comune che gli studenti si sentano nervosi e preoccupati prima di un esame, ma in alcuni casi l'ansia può diventare molto intensa e interferire con le prestazioni accademiche oltretutto con benessere generale. In letteratura esistono diversi termini per indicare lo stesso concetto di ansia. L'ansia da test, lo stress da esame o lo stress da test, sono spesso sinonimi di paura o preoccupazione di una valutazione negativa che si traduce in risposte comportamentali, fisiologiche o emotive negative (Zeidner, 1998).

Nei contesti educativi, l'ansia da esame è una forma di "ansia accademica" (Cassady, 2010) caratterizzata da stimoli specifici del contesto (ad esempio, l'istruzione in classe) e da reazioni specifiche alla materia accademica (Hembree, 1990). L'ansia da esame si differenzia da altre forme di ansia per la sua focalizzazione sugli aspetti valutativi (cioè sui test da affrontare). Secondo stime recenti, tra il 15% e il 22% degli studenti presenta livelli elevati di ansia da test (Putwain e Daly, 2014; Thomas et al., 2017).

Esistono diverse caratteristiche che rendono peculiare il comportamento di chi vive l'ansia da esame. Tali caratteristiche comprendono preoccupazioni eccessive in cui gli studenti sperimentano ansia riguardo alle prestazioni che avranno durante l'esame, possono temere di fallire, di dimenticare le informazioni o di non essere all'altezza delle aspettative degli altri (professori, familiari ecc.) (Zeidner 1998). L'ansia da esame è spesso citata tra i fattori cardine che determinano un'ampia gamma di esiti sfavorevoli per gli studenti, tra cui scarse prestazioni cognitive, risultati scolastici insufficienti, disagio psicologico e cattiva salute. Nella misura in cui l'ansia influenza la prestazione in modo sostanziale, alcuni individui ottengono risultati peggiori di quelli che le loro capacità consentirebbero (Zeidner 2007). Inoltre, la ricerca sperimentale suggerisce che questa relazione è probabilmente, almeno in parte, causale, poiché è stato riscontrato che alti livelli di ansia hanno un impatto negativo sia sull'apprendimento (Bisaz et al., 2009) che sulla memoria (Schwabe & Wolf, 2010) e sulle prestazioni (Cassady & Johnson, 2002).

L'ansia da esame può manifestarsi con sintomi fisici come sudorazione eccessiva, tremori, battito accelerato del cuore, sensazione di mancanza di respiro, mal di stomaco, nausea o disturbi del sonno (Zeidner, 1998). Questi sintomi possono rendere difficile concentrarsi e influire sulle prestazioni durante l'esame. Anche le difficoltà di concentrazione sono un sintomo comune sia durante la preparazione che durante la prova di esame.

L'ansia può interferire con la capacità di concentrarsi e pensare chiaramente, e per questo motivo gli studenti possono trovare difficile elaborare le informazioni o ricordare ciò che hanno studiato a causa delle distrazioni legate all'ansia (Aydın et al. 2006). Inoltre, l'ansia da esame, come altre forme di ansia, è caratterizzata da pensieri negativi e/o catastrofici riguardo alle conseguenze di un esame. Gli studenti possono temere di deludere sé stessi o gli altri, di perdere opportunità o di compromettere il loro futuro accademico o professionale. Tale modalità di pensiero porta spesso a comportamenti di evitamento e procrastinazione, cercando di evitare gli

esami o di rinviarne la preparazione. Questi comportamenti possono creare ulteriore stress e aumentare l'ansia nel tempo (Zeidner, 1998). L'ansia da esame ha, dunque, anche un impatto sul benessere generale degli studenti. Possono manifestarsi sintomi di stress emozionale, stanchezza e irritabilità a causa dell'ansia costante legata agli esami.

Nonostante l'ansia da esame sia molto comune ed in parte accettata dagli studenti che la vivono, non è semplice trovare delle strategie che gli studenti possano adottare per affrontarla. Sebbene siano stati condotti studi su interventi specifici per ridurre l'ansia da test, esistono solo poche revisioni sistematiche sul tema dell'ansia da esame e sugli interventi utili alla sua riduzione. Due recenti revisioni hanno esaminato l'efficacia delle tecniche complementari alternative per ridurre l'ansia da esame tra gli studenti universitari (Martin & Naziruddin, 2020; Zhang et al., 2022). Da questi studi è emerso che la musicoterapia, la desensibilizzazione sistematica, l'ipnoterapia, i training di rilassamento, l'aromaterapia per la riduzione dello stress, la desensibilizzazione cognitiva e il training di rilassamento assistito da biofeedback/neurofeedback hanno la capacità di ridurre l'ansia da test.

In un recente studio di Lemay et al. (2019) è stato valutato l'impatto di un intervento di sei settimane di yoga e meditazione sulla percezione dello stress, sui livelli di ansia e sulle capacità di mindfulness degli studenti universitari. Diciassette partecipanti di età compresa tra i 19 e i 23 anni hanno completato lo studio di nove erano iscritti al corso di studi in farmacia e otto erano iscritti ad altri corsi accademici. Dall'analisi pre-post dei dati è emerso che i punteggi di ansia e stress degli studenti erano diminuiti in modo significativo, mentre la mindfulness totale era aumentata in modo significativo. I cambiamenti nei dati categoriali tra il periodo precedente e quello successivo all'intervento, sui questionari BAI (*Beck Anxiety Inventory*) e PSS (*Perceived Stress Scale*), sono stati significativi. Nessuno studente ha ottenuto un punteggio elevato per lo stress o per l'ansia nel questionario successivo all'intervento. In generale, gli studenti che hanno partecipato allo studio hanno sperimentato una riduzione dei livelli di stress e ansia dopo aver completato il programma di yoga e meditazione di sei settimane prima degli esami finali. I risultati di questo studio suggeriscono che l'adozione di una pratica di mindfulness anche solo una volta alla settimana può ridurre lo stress e l'ansia negli studenti universitari.

Un altro studio recente di Uysal et al. (2023) ha indagato l'efficacia di due diverse tipologie di interventi nella gestione dell'ansia da test, dell'ansia generale e della ruminazione durante il

COVID-19 in un campione di studenti universitari: l'Acceptance and Commitment Therapy (ACT) e la Cognitive Behavioural Therapy (CBT). Lo studio ha coinvolto 77 studenti che dovevano sostenere l'esame di ammissione all'università in Turchia. I partecipanti sono stati assegnati a due gruppi con programmi differenziati di ACT o CBT. Dai risultati delle analisi pre-post intervento è emerso che entrambi i programmi hanno ridotto l'ansia da test, l'ansia generale e la ruminazione, mostrando livelli di efficacia simili. Ciò ha suggerito che l'ACT e la CBT possono essere entrambi utili per migliorare la salute mentale degli studenti, soprattutto in seguito alla pandemia da COVID-19.

Per misurare l'ansia da esame negli studenti sono state proposte diverse scale. Una delle più utilizzate è la *Westside Test Anxiety Scale* (WTAS) (Driscoll, 2007). La scala è costruita per misurare i disturbi dell'ansia, con la maggior parte degli item che chiedono di valutare se si è notata una riduzione delle prestazioni o la preoccupazione, che interferisce con la concentrazione. Questo strumento comprende 10 item su una scala Likert a 5 punti che va da 1 (per niente vero o mai vero) a 5 (estremamente o sempre vero). Sei dei 10 item sono basati sull'ansia da esame e 4 item sulla preoccupazione e sul timore di affrontare un esame. Ogni punteggio viene conteggiato, con la possibilità di ottenere 50 punti totali, da cui si ricava in seguito un punteggio medio: da 1.0 a 1.9 l'ansia da test è bassa, da 2.0 a 2.5 è normale, da 2.5 a 2.9 è normale/elevata, da 3.0 a 3.4 è moderata/elevata, da 3.5 a 3.9 ansia da test elevata e da 4.0 a 5.0 è estremamente elevata. Poiché questo strumento è stato utilizzato per misurare l'ansia da test in molti studi diversi e ha un'affidabilità alpha di 0.78, un'affidabilità split-half di 0.77 e un coefficiente di validità di 0.51, è stato ampiamente confermato che l'impiego di questo strumento sia ottimale per misurare l'ansia da esame. Attualmente, però, non risulta uno studio di validazione nel contesto culturale italiano.

Un'altra scala per la valutazione dell'ansia da esame è la *Test Anxiety Inventory* (TAI) (Spielberger, 2010). Il TAI è un questionario self-report composto da 20 item, ciascuno valutato su una scala Likert a quattro punti, con punteggi che vanno da 1 (Quasi mai) a 4 (Quasi sempre). Il punteggio dell'ansia da test TAI si basa sulla somma delle risposte a tutti e 20 gli item, con un range di punteggio compreso tra 20 (basso livello di ansia da test) e 80 (alto livello di ansia da test). Il TAI contiene due sottoscale di derivazione fattoriale: Preoccupazione ed Emotività. Queste sottoscale valutano le principali componenti dell'ansia da test identificate in ricerche precedenti (Liebert & Morris, 1967; Morris & Liebert, 1970). La sottoscala della TAI



“Preoccupazione” valuta i pensieri negativi relativi alla possibilità di non superare un test e le reazioni avverse che possono derivare da una cattiva prestazione (ad esempio, “Durante i test mi ritrovo a pensare alle conseguenze di un fallimento”). La TAI “Emotività”, invece, valuta i vissuti ansiosi e la tensione associata all’eccitazione del sistema nervoso autonomo, che possono riflettersi in sintomi corporei (ad esempio, “Durante gli esami mi sento molto teso”). Ampiamente utilizzato in numerosi studi per valutare le differenze individuali nell’ansia da test, il TAI è stato tradotto e adattato in più di 20 lingue diverse, compreso l’italiano (Comunian, 1985). Il questionario ha un’alta affidabilità di consistenza interna ( $\alpha = .90$  o superiore) e una forte validità predittiva, come indicato dalle correlazioni negative con il rendimento accademico (ibidem).

Un’altra scala molto utilizzata, già validata nel contesto culturale italiano, è la *Italian Multi-Faceted Test Anxiety Questionnaire* (PAF-I, dal tedesco Prüfungsangstfragebogen; Ringeisen et al., 2020). Attualmente sono disponibili versioni validate anche in tedesco (PAF) ed in inglese (PAF-E). Nello studio di validazione di tutti gli item sono stati tradotti mediante una procedura standardizzata a più fasi. Sulla base di un campione di 745 studenti universitari italiani (M-age  $\frac{1}{4}$  21.64, SD  $\frac{1}{4}$  4.04, 42.8% maschi, 56.3% femmine), l’analisi fattoriale confermativa ha convalidato la struttura a quattro fattori: preoccupazione, interferenza, mancanza di confidenza ed emotività. Ogni sottoscala è costituita da cinque item per un totale di 20 item. Le analisi di affidabilità hanno confermato le proprietà positive della scala. Inoltre, dallo studio di validazione italiano, è stata evidenziata una debole invarianza di genere delle quattro sottoscale prese in esame. I modelli di associazione latente tra le quattro sfaccettature dell’ansia e il modello di personalità a cinque fattori hanno indicato un’adeguata validità di costruito. Punteggi di interferenza più bassi sono stati correlati a una migliore media dei voti, a sostegno della validità di criterio. Il PAF-I può essere utilizzato per valutare simultaneamente le quattro dimensioni dell’ansia da test in modo efficiente dal punto di vista temporale tra gli adulti di lingua italiana.

Un ulteriore strumento molto utilizzato è la *Cognitive Test Anxiety Scale* (CTAS; Cassady & Johnson, 2002). Questa scala psicometrica si è focalizzata sugli aspetti cognitivi dell’ansia da esame. Essa è stata sviluppata attraverso molteplici test pilota con risposta su scala likert a quattro punti. Gli item sono stati codificati in modo che punteggi elevati indicassero alti livelli di ansia cognitiva da test e, viceversa, bassi punteggi evidenziassero bassi livelli di ansia

cognitiva. La scala è risultata avere un'elevata coerenza interna ( $\alpha=.86$ ). Gli studi pilota utilizzati per sviluppare la CTAS sono durati circa 2 anni e si sono basati sui dati raccolti da oltre 400 partecipanti. La CTAS, nella sua versione validata, è una misura a 27 item progettata per valutare gli indicatori cognitivi dell'ansia da test nelle fasi di preparazione e di esecuzione del ciclo di apprendimento di un test/esame. Per ottenere un punteggio alla CTAS bisogna sommare le risposte fornite a ciascun item per creare un punteggio totale (dopo aver ricodificato gli item a punteggio inverso). Di quest'ultimo strumento non risulta ancora una validazione italiana.

L'ansia negli studenti universitari è spesso riscontrabile durante il percorso accademico. Come detto in precedenza, le aspettative elevate, gli esami stressanti e la necessità di mantenere prestazioni ottimali possono generare un carico emotivo significativo. Lo sport può essere un utile alleato nella gestione dell'ansia: l'attività fisica non solo migliora la salute mentale, ma offre anche uno spazio di distensione, riducendo lo stress e promuovendo un equilibrio tra studio e benessere psicologico (Edwards, 2006; Maugeri et al., 2020). Il contesto sportivo, tuttavia, può anche essere, soprattutto in situazioni agonistiche, un attivatore di stati d'ansia che necessitano di una adeguata gestione da parte degli atleti (Kuan et al., 2018). Per questa ragione risultano numerosi in letteratura i contributi concernenti interventi per la gestione e la riduzione dei livelli di ansia negli atleti (Ong & Chua 2021;

### **3.4 L'ansia nello sport**

L'analisi dei fattori psicologici che possono influenzare le prestazioni degli atleti è stata oggetto di studio negli ultimi decenni in numerose discipline (Brown & Fletcher 2017; Massuça et al., 2014). Vi è una crescente comprensione di come aspetti quali l'ansia agonistica, la motivazione, gli stati d'animo, gli stati di Flow e l'autoefficacia siano in relazione tra loro (Sklett et al., 2018). Pertanto, nei processi di allenamento degli atleti, la valutazione del loro funzionamento psicologico è una dimensione che viene sempre più integrata nella loro preparazione globale (Sonesson et al., 2017).

Tra le manifestazioni di ansia più rilevanti legate alla prestazione sportiva vi è l'ansia da competizione, che, in ottica di una buona performance, deve essere controllata per migliorarne

i processi di adattamento alla gara ed è stata recentemente oggetto di interesse di diversi studi (Kuan et al., 2018; Ismail & Amer, 2016).

I fattori che possono influenzare l'ansia da competizione, sia nella sua manifestazione cognitiva che somatica e secondo il modello proposto da Martens e collaboratori (1980), sono diversi: la percezione del livello dell'avversario, l'importanza della competizione, la fiducia nelle proprie capacità o le abilità di far fronte allo stress (Gonzalez-Campos et al., 2015).

Un altro dei costrutti psicologici che sono stati analizzati in modo approfondito in ambito sportivo sono gli stati d'animo, evidenziando come alcune dimensioni possano influenzare le prestazioni degli atleti (Brandt et al., 2017).

Uno dei questionari più utilizzati per analizzare gli stati d'animo degli sportivi è quello proposto da McNair et al. (1992), il *Profile of Mood States* (POMS), che considera sette fattori: tensione, depressione, rabbia, vigore, fatica, confusione e amicizia. In un contesto sportivo, è stato osservato in numerosi lavori che un punteggio specifico delle sue dimensioni (noto come profilo iceberg) è un buon predittore della prestazione sportiva (Aoki et al., 2017; Durguerian et al., 2015). Questo profilo implica punteggi più alti nella dimensione del vigore e punteggi più bassi nelle altre.

Anche l'autoefficacia gioca un ruolo importante nel determinare una buona prestazione sportiva e favorisce la gestione efficace degli stati d'ansia durante la competizione. L'autoefficacia è considerata un modulatore del comportamento e si sviluppa nelle persone a partire dai successi ottenuti in comportamenti passati, dalle esperienze vicarie, dalla persuasione verbale o dagli stati fisiologici presentati (Bandura, 1999). Alcuni autori hanno sottolineato la necessità di valutare misure specifiche di autoefficacia (Bandura 1986), ma altri sottolineano che una percezione generale di autoefficacia può essere un predittore adeguato del comportamento (Schwarzer, 2014). In merito a ciò, molti sono stati gli studi che sono occupati di analizzare l'autoefficacia in ambito sportivo, in quanto uno dei costrutti psicologici considerati più rilevanti per la prestazione atletica (Estevan et al., 2016; Ouyang et al., 2020).

In generale, si ritiene che l'atleta possa gestire una serie di capacità psicologiche necessarie per adattarsi meglio ai contesti di gara. Per valutare queste capacità, esistono strumenti come lo *Psychological Inventory of Sports Performance* (SPPI) (Hernández-Mendo et al., 2014) che permette di analizzare un'ampia gamma di fattori come la fiducia in sé stessi, il controllo del

coping negativo, il controllo attenzionale, il controllo visuo-immaginario, il livello motivazionale, il controllo del coping positivo ed il controllo attitudinale.

Diversi studi hanno analizzato le relazioni tra le variabili incluse nel profilo psicologico sportivo con l'ansia agonistica, lo stato emotivo e l'autoefficacia (Besharat & Pourbohloul, 2011; Lane et al., 2002; Reigal et al., 2020; Verner-Filion et al., 2014). Nel contesto sportivo, la valutazione dell'associazione tra queste variabili è rilevante, dato il loro legame con le prestazioni agonistiche.

In uno studio di meta-analisi, Ong & Chua (2022) hanno verificato l'efficacia degli interventi psicologici sull'ansia competitiva nello sport. La ricerca ha identificato 37 studi che soddisfacevano i criteri di inclusione. La meta-analisi è stata condotta su 34 studi dopo la rimozione degli outlier. I risultati hanno mostrato un effetto complessivo di piccola o media entità degli interventi psicologici sull'ansia agonistica negli atleti ( $g = -0.42$ ; 95% CI, da  $-0.58$  a  $-0.25$ ). Successive analisi di sottogruppo hanno mostrato che questo risultato era valido indipendentemente dal disegno sperimentale, dallo strumento di misura dell'ansia, dal tipo di ansia, dal sesso, dal Paese, dallo sport, dalla componente dell'intervento, dal metodo di erogazione dell'intervento e dalla durata dell'intervento. Inoltre, i risultati hanno indicato che gli effetti potrebbero essere maggiori per gli atleti di livello superiore rispetto a quelli di livello inferiore. Le meta-analisi separate hanno inoltre suggerito l'esistenza di effetti di dimensioni medio-grandi per l'intensità dell'ansia cognitiva ( $g = -0.54$ ) e della fiducia in sé stessi ( $g = 0.55$ ), e di un effetto di dimensioni medio-piccole per l'intensità dell'ansia somatica ( $g = -0.36$ ).

I risultati di questo studio di meta-analisi gli autori forniscono una solida base di evidenza per l'uso di interventi psicologici per aiutare a ridurre l'ansia da competizione negli atleti. Meta-analisi come quella di Ong & Chua (2022) mostrano che gli interventi psicologici riducono efficacemente l'ansia competitiva negli atleti, offrendo solide basi per utilizzare tali interventi nella gestione dell'ansia in ambito sportivo.

L'uso del neurofeedback, focalizzato sul sistema nervoso autonomo, può offrire un approccio innovativo per intervenire sull'ansia, addestrando il cervello a regolare tali risposte e favorire stati mentali più calmi e bilanciati, sia negli atleti sia in altri contesti.

### 3.5 Neurofeedback e ansia

Il sistema nervoso umano è suddiviso in due parti principali: il sistema nervoso centrale ed il sistema nervoso periferico. Il sistema nervoso periferico comprende il sistema nervoso autonomo, che è particolarmente legato a stati mentali negativi come l'ansia e lo stress (Hoehn-Saric & McLeod, 2000). Il sistema nervoso autonomo è responsabile della respirazione, della frequenza cardiaca, della digestione, della produzione di ormoni ed è costituito da due parti principali: il simpatico e il parasimpatico (Kreibig, 2010). Questi sistemi nervosi agiscono come poli opposti dell'asse dell'"eccitazione" avviando rispettivamente risposte di stress e di rilassamento. Naturalmente esiste una comunicazione bilaterale tra il sistema nervoso centrale e quello periferico, e quest'ultimo di solito orchestra gli effetti a valle del sistema nervoso centrale sulla base delle informazioni disponibili sullo stato della persona e sullo stato dell'ambiente (Olbrich et al., 2011). Dato questo ponte, sia il sistema nervoso autonomo che quello periferico possono essere utilizzati come "finestre" sullo stato comportamentale attuale dell'organismo.

La componente principale del sistema nervoso centrale è il cervello. Negli animali più evoluti, il cervello ha sviluppato una neocorteccia. Essa è fondamentale per molte delle funzioni cognitive superiori umane ed è responsabile della nostra capacità di pensare, apprendere, ricordare, comunicare e interagire con il mondo circostante. È una parte estremamente complessa e versatile del cervello, e la sua disfunzione può portare a una vasta gamma di disturbi cognitivi e comportamentali.

Gli esperimenti sulle oscillazioni elettrocorticali (misurate dall'EEG) nell'uomo e negli animali hanno rilevato che le variazioni di potenza e frequenza oscillatoria sono strettamente correlate all'eccitazione comportamentale. I bassi livelli di arousal corticale/comportamentale sono caratterizzati da oscillazioni significative a bassa frequenza (cioè ritmi delta, theta e alpha), mentre alti livelli arousal corticale/comportamentale sono definiti da oscillazioni ad alta frequenza (cioè ritmi beta e gamma) (McGinley et al., 2015; Podvalny et al., 2015). Da un punto di vista funzionale, è stato stabilito che il ritmo alpha è una oscillazione inibitoria (Jensen et al., 2010) e la diminuzione della potenza alpha è stata collegata a una maggiore attivazione nelle cortecce sensoriali e motorie (Sauseng et al., 2009).

Gli stati di stress/arousal più bassi (cioè con una potenza alpha più alta) si accompagnerebbero a una diminuzione dell'interesse e della consapevolezza degli stimoli

ambientali. All'opposto, invece, gli stati di stress/arousal più alti (cioè con una potenza alpha più bassa) causano un aumento dell'eccitazione e della preoccupazione per i fattori ambientali. Inoltre, è stato dimostrato che la potenza alpha è inversamente correlata con la pendenza 1/f dello spettro di potenza dell'EEG, che è un indicatore consolidato dell'attivazione elettrocorticale (Muthukumaraswamy & Liley, 2018). Di conseguenza, le prestazioni comportamentali ottimali dovrebbero teoricamente coincidere con le caratteristiche oscillatorie tipiche dell'equilibrio eccitazione-inibizione (E/I), cioè con una potenza EEG media allo stato di riposo, bilanciata tra attività ad alta e bassa frequenza (per una discussione approfondita, si veda Ros et al., 2014).

In una recente review, Markiewicz (2017) ha evidenziato che il training con neurofeedback è efficace in molti disturbi psichiatrici che riguardano variabili psicologiche come lo stress e l'ansia. Per evitare gli effetti collaterali dei farmaci, la terapia con neurofeedback è un nuovo metodo promettente con effetti terapeutici stabili e duraturi con minimi effetti collaterali (Serrano Pintado & Llamazares, 2014; Micoulaud-Franchi et al., 2021).

Numerosi studi in letteratura hanno evidenziato l'utilità del trattamento dei disturbi d'ansia attraverso il neurofeedback, che si concentra sul sistema nervoso centrale e sul cervello (Fovet et al., 2015) per migliorarne la neuroregolazione e la stabilità. La regolazione dell'attività cerebrale può influenzare i cambiamenti comportamentali (Marzbani et al., 2016; Van der Kolk et al., 2016). Attualmente esistono diverse modalità di imaging del neurofeedback che includono la risonanza magnetica in tempo reale (RT-MRI), la spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso (fNIRS) e l'elettroencefalogramma (EEG). Esistono studi in letteratura che hanno utilizzato queste diverse metodiche per ottenere i dati di imaging sul funzionamento cognitivo in tempo reale.

Tuscan et al. (2013) hanno esplorato l'utilità della procedura fNIRS nell'osservare l'asimmetria frontale durante compiti di sfida sociale in vivo tra studentesse universitarie che avevano ottenuto i punteggi più alti e più bassi in una misura di screening dell'ansia sociale. I risultati hanno rivelato che le partecipanti di entrambi i gruppi hanno registrato un aumento significativo della concentrazione di volume sanguigno e di emoglobina ossigenata nell'emisfero destro rispetto all'emisfero sinistro durante l'esecuzione di un discorso. Sono stati osservati anche effetti non emisferici. Inoltre, il gruppo ad alta ansia ha mostrato una tendenza non significativa a una maggiore attività frontale destra rispetto al gruppo a bassa ansia. Questo

studio evidenzia l'utilità del dispositivo fNIRS nel valutare con successo i cambiamenti in tempo reale della risposta cerebrovascolare in funzione di un comportamento sociale naturalistico e supporta la potenziale utilità di questa tecnologia nello studio della neurofisiologia dell'ansia sociale. Questo studio che ha utilizzato il fNIRS ha aperto la strada all'utilizzo di tale dispositivo di rilevazione in tempo reale anche per interventi di Neurofeedback.

Morgenroth et al. (2020) hanno esaminato il potenziale del neurofeedback basato sulla connettività e sull'imaging magnetico funzionale in tempo reale (rt-fMRI-nf) per migliorare la connettività funzionale tra la corteccia prefrontale dorsolaterale (DLPFC) e la corteccia cingolata anteriore (ACC) nei soggetti ansiosi. In particolare, hanno verificato se i cambiamenti nella connettività DLPFC - ACC fossero associati a una riduzione dei livelli di ansia e a un migliore il controllo attentivo.

Trentadue partecipanti con un alto livello di ansia sono stati ripartiti con assegnazione randomizzata a un gruppo sperimentale (sottoposto a rt-fMRI-nf) e a un gruppo di controllo, che ha ricevuto un feedback sham, ovvero un feedback che non corrispondeva al loro stato corporeo. La connettività funzionale nello stato di riposo (utilizzando la fMRI allo stato di riposo), i livelli di ansia e le prestazioni al test di Stroop sono stati valutati prima e dopo il training con rt-fMRI-nf. Dopo il training, rispetto al gruppo di controllo, il gruppo sperimentale ha mostrato una riduzione dei livelli di ansia e un aumento della connettività funzionale DLPFC-ACC, nonché un aumento della connettività funzionale nello stato di riposo nella rete posteriore di modalità predefinita. Inoltre, nel gruppo sperimentale, i cambiamenti nella connettività funzionale DLPFC - ACC durante il training rt-fMRI-nf sono risultati associati a una riduzione dei livelli di ansia.

Anche il neurofeedback con EEG si è dimostrato efficace nell'abbassamento dei livelli di ansia. Il training con EEG alpha o theta viene utilizzato nella maggior parte delle sessioni di neurofeedback che mirano a ridurre l'ansia, l'eccitazione e a migliorare lo stato di rilassamento. Hardt & Kamiya (1978) hanno effettuato un training di neurofeedback con dei volontari che avevano ottenuto i punteggi più alti e più bassi nella scala dell'ansia di tratto. L'obiettivo dello studio era quello di allenare i partecipanti a potenziare e inibire i loro ritmi alpha (8-13 Hz). I livelli di alpha e di ansia hanno mostrato associazioni negative statisticamente significative. Dai

risultati è inoltre emerso che l'aumento dell'alpha ha ridotto selettivamente sia l'ansia di stato che quella di tratto nei partecipanti con un alto livello di ansia.

In un recente studio di Gadea et al. (2020) con design pre-post, si è indagata l'efficacia del Neurofeedback nel ridurre l'ansia considerando diverse misure psicometriche come l'umore, l'ansia, la depressione e la rabbia (Profile of Mood State, POMS, e State Trait Anxiety Inventory, STAI), misure biologiche (livelli salivari di cortisolo) e misure neurofisiologiche (analisi della potenza della banda di frequenza dell'EEG). In conformità con le raccomandazioni generali per la ricerca sul neurofeedback, è stato incluso un gruppo di controllo che ha ricevuto il neurofeedback sham. Dai risultati è emerso che i livelli di ansia sono diminuiti dopo il neurofeedback reale e sono aumentati dopo il neurofeedback sham ( $P < 0.01$ , effect size 0.9 per il confronto tra i gruppi). Il cortisolo è diminuito dopo l'esperimento in entrambi i gruppi, anche se con effetti significativamente più pronunciati nella direzione desiderata dopo il neurofeedback reale ( $P < 0.04$ ; effect size 0.7). Il gruppo che ha ricevuto il neurofeedback reale ha aumentato significativamente la banda SMR ( $P < 0.004$  effect size 0.88), senza cambiamenti nella banda theta. Il gruppo che ha ricevuto il neurofeedback sham non ha mostrato alcun cambiamento EEG. Dunque, il miglioramento osservato nella riduzione dell'ansia è stato maggiore nel gruppo sperimentale rispetto al gruppo sham, confermato sia dalle misure soggettive (psicometriche) sia dalle misure oggettive (biologiche).

Wang et al. (2019) hanno condotto uno studio con due gruppi sperimentali sottoposti a neurofeedback e uno di controllo (con un design pre-post) su pazienti con problemi di ansia e/o depressione. Il primo gruppo ha effettuato un training di neurofeedback sulla banda Alpha mentre il secondo sulla riduzione della banda beta. Entrambi i gruppi sperimentali hanno ricevuto il neurofeedback in dieci sessioni. Tutti i partecipanti hanno completato, inoltre, il *Beck Depression Inventory II* (BDI-II), il *Beck Anxiety Inventory* (BAI) e cinque minuti di registrazione EEG a riposo prima e dopo il test. Dai risultati è emerso che entrambi i gruppi che hanno eseguito il training di neurofeedback hanno mostrato una riduzione nei sintomi di depressione e ansia. Il trattamento effettuato sulla riduzione di Beta è risultato il più efficace nel ridurre la potenza high-beta nella corteccia parietale rispetto agli altri gruppi.

Il Neurofeedback si è dimostrato efficace come intervento per la riduzione dell'ansia anche negli atleti. Ad esempio, in uno studio di Zadkhosh et al., (2017) è stato esaminato l'effetto dell'intervento di Neurofeedback alpha/theta sulla riduzione dell'ansia e sul miglioramento



delle prestazioni nei giovani calciatori. A tal fine, 30 giocatori di calcio che frequentavano la National Soccer League iraniana sono stati assegnati a due gruppi, uno sperimentale (intervento basato sul training di Neurofeedback alpha/theta) ed uno di controllo. Gli atleti del gruppo sperimentale hanno ricevuto 12 sessioni di 30 minuti di training con neurofeedback, mentre il gruppo di controllo non ha ricevuto alcun intervento. Prima e dopo gli interventi, per raccogliere i dati sono stati utilizzati il questionario *Sport Anxiety Scale* e il *Kick Performance Test*. I risultati hanno mostrato che il miglioramento dei punteggi delle prestazioni atletiche e la riduzione dell'ansia erano significativi soltanto nel gruppo sperimentale rispetto al gruppo di controllo. In base a questi risultati si è reso evidente che l'allenamento con neurofeedback alpha/theta può essere appropriato per aumentare le prestazioni atletiche e diminuire il livello di ansia sportiva. Considerando la centralità dello sport e della salute come focus principale di questo indirizzo di dottorato, mi è apparso utile condurre una revisione sistematica sul tema, al fine di consolidare le basi conoscitive del metodo e di identificare approcci innovativi che possano ottimizzare le performance sportive e promuovere il benessere fisico e mentale in generale. Il lavoro di review, in questo senso, svolge un ruolo significativo nel fornire una panoramica dettagliata e ben strutturata delle informazioni disponibili sul tema dell'allenamento con neurofeedback ed il suo impatto sulle prestazioni atletiche e sull'ansia sportiva.

## **Capitolo 4**

### **Neurofeedback e sport**

#### **4.1 Una revisione sistematica sul tema (2016-2023)**

##### **Introduzione**

Il neurofeedback (o EEG-Biofeedback) è una tecnica psicofisiologica non invasiva e quasi priva di effetti collaterali, basata sui principi del condizionamento operante (Hammond, 2011). Utilizza i cambiamenti nell'attività elettrica del cervello per aiutare le persone a regolare la potenza o l'attività di specifiche bande di frequenza dell'EEG, accedendo in tempo reale alle informazioni relative alla loro attività cerebrale. Si tratta quindi di un vero e proprio training neuro-cognitivo con il quale il soggetto, grazie al feedback fornito immediatamente in modo grafico e/o uditivo, impara a controllare, governare e modificare volontariamente la propria attività elettrica cerebrale e a correggere le alterazioni EEG e le condizioni patologiche ad esse collegate. L'attività del cervello può essere misurata utilizzando diversi segnali che fungono da feedback, come il flusso sanguigno, il consumo di ossigeno e l'attività elettrica. Quest'ultima, attraverso l'EEG, rappresenta la forma più comune e utilizzata di neurofeedback (Hammond, 2011). Durante la registrazione dell'attività elettrica cerebrale, l'EEG produce una traccia, sotto forma di onde cerebrali, che fornisce dati sul funzionamento del cervello. Queste onde sono tradizionalmente suddivise in 5 bande di frequenza (alpha, beta, gamma, theta e delta), ciascuna rappresentata da un intervallo specifico, e corrispondono a diversi stati cerebrali. Lo scopo del neurofeedback è quindi quello di insegnare alle persone a regolare l'attività cerebrale all'interno di una specifica banda di frequenza per migliorare le funzioni comportamentali, emotive o cognitive associate (Sitaram et al., 2017; Paret et al., 2019).

Dalla sua nascita negli anni '60 (Kamiya, 1962), il neurofeedback è stato utilizzato in diversi contesti e con diversi obiettivi: ad esempio, come alternativa al trattamento farmacologico negli astronauti esposti alla monometilidrazina, un additivo altamente volatile del carburante per razzi, che soffrivano di mal di testa, nausea e convulsioni (Wyrwicka W, Sterman MB, 1968; Larsen e Sherlin, 2013), come supporto nei bambini affetti da ADHD che mostrano un pattern di onde cerebrali squilibrato (Lubar e Shouse, 1976) e come strumento per migliorare le prestazioni, come ad esempio migliorare l'accuratezza e la velocità nelle abilità chirurgiche (Ros et

al. , 2009), diminuendo il numero di errori in compiti di rilevamento radar (Beatty et al., 1974), accelerando i tempi di reazione in compiti di attenzione (Egner e Gruzelier, 2004) e migliorando le funzioni della memoria (Escolano et al., 2011; Zoefel et al., 2011). Oltre ad essersi dimostrato efficace nel trattamento di queste e altre condizioni patologiche e non (Gruzelier, 2014a), il neurofeedback ha dimostrato la stabilità dei suoi risultati nel tempo (Becerra et al., 2006; Gevensleben et al., 2010; Kouijzer et al., 2009). In effetti, i cambiamenti neurofisiologici indotti da questa tecnica si basano sulla plasticità cerebrale (Ninaus et al., 2015) e gli studi di risonanza magnetica hanno confermato che questi cambiamenti sono associati a modifiche microstrutturali nella materia bianca e grigia (Ghaziri et al., 2013), suggerendo che il neurofeedback può portare a un miglioramento dell'elaborazione cognitiva e dell'apprendimento attraverso il miglioramento della velocità di conduzione nelle reti neurali.

Per quanto riguarda l'applicazione del neurofeedback nel miglioramento delle prestazioni, una linea di ricerca che ha ormai preso piede riguarda l'uso del neurofeedback nel campo della psicologia dello sport, in cui questa tecnica viene utilizzata per riequilibrare gli schemi di funzionamento del cervello al fine di migliorare le prestazioni sportive in termini cognitivi, emotivi e comportamentali (Salimnejad et al., 2019; Gong et al., 2021). La sua applicazione in ambito sportivo risale agli anni '90, quando Landers et al. (1991) sottoposero un gruppo di arcieri a sessioni di neurofeedback e riuscirono a migliorare le loro prestazioni di tiro. A partire da questo studio pionieristico, il miglioramento delle prestazioni sportive attraverso il neurofeedback è diventato un campo di ricerca sempre più indagato. I tratti che definiscono la qualità della prestazione sportiva sono i tempi di reazione (Mirifar et al., 2017) e le abilità cognitive (attenzione, concentrazione, memoria, controllo inibitorio e focus; Liu et al., 2017), per cui è necessario trovare protocolli di allenamento efficaci in grado di migliorare queste caratteristiche. Uno di questi è il neurofeedback. Questa tecnica si è dimostrata efficace nel migliorare le prestazioni degli atleti, indipendentemente dalla disciplina sportiva e dal livello di abilità degli atleti. Ad esempio, Mikicic et al. (2015) hanno utilizzato l'EEG-neurofeedback per amplificare il ritmo sensomotorio (SMR; 12-15 Hz) e le bande beta1 (13-20 Hz) e per ridurre simultaneamente le bande theta (4-7,5 Hz) e beta2 (20-30 Hz) in un campione composto da nuotatori, schermidori, atleti di atletica leggera, judoka e atleti di taekwondo. Hanno scoperto che il gruppo di allenamento ha mostrato una diminuzione più significativa dei tempi di reazione su un compito di attenzione visiva rispetto al gruppo di controllo e un aumento della velocità, dell'efficacia e

dell'accuratezza delle prestazioni. Come lo studio di Mikicic, anche quello di Parsaee et al. (2018) ha analizzato gli effetti di un training di neurofeedback sui tempi di reazione, in questo caso sia visivi che uditivi, e ha dimostrato come questa tecnica sia effettivamente efficace nel migliorare le funzioni cerebrali associate a questo tipo di abilità.

Nel campo dell'accuratezza, Cheng et al. (2015) hanno dimostrato che i golfisti pre-élite sottoposti a un allenamento di neurofeedback SMR hanno ottenuto prestazioni più accurate e hanno esibito una maggiore potenza SMR rispetto al gruppo di controllo, il che è associato a un aumento dell'attenzione, e Salimnejad, Zandi e Arsham (2019) hanno dimostrato che l'accuratezza dei passaggi a destra e a sinistra in un campione di giocatrici di rugby è aumentata in modo significativo dopo l'allenamento di neurofeedback volto ad aumentare l'SMR, mentre l'accuratezza del tiro non ha mostrato un miglioramento significativo. Infine, per quanto riguarda le prestazioni cognitive e psicologiche, Liu et al. (2017) hanno dimostrato che un allenamento di neurofeedback si è rivelato in grado di migliorare le capacità cognitive degli atleti, con un conseguente miglioramento della capacità di attenzione sostenuta. D'altra parte, a differenza degli studi citati finora, l'obiettivo dello studio di Dupee (2008) era quello di migliorare la concentrazione e il livello di arousal, di ridurre l'ansia e di aumentare l'autoregolazione degli stati fisiologici e psicologici per migliorare le prestazioni degli sciatori, ma il suo studio ha dimostrato che l'allenamento con neurofeedback non ha modificato i punteggi degli atleti, nonostante il miglioramento delle condizioni fisiologiche e psicologiche. Pertanto, per fornire una revisione aggiornata e completa degli ultimi sviluppi dell'allenamento con neurofeedback nelle discipline sportive, il presente studio esamina gli articoli pubblicati tra il 2016 e il 2023, compresi gli studi randomizzati e non randomizzati. In particolare, gli obiettivi primari di questo studio sono la categorizzazione degli articoli pubblicati su riviste specializzate relativi al neurofeedback dal punto di vista dei tempi di reazione e delle capacità cognitive e l'analisi e la valutazione di questi studi dai punti di vista sopra citati per colmare le lacune della letteratura sul neurofeedback nello sport e indicare le direzioni di ricerca future.

## **Metodi**

Questa revisione sistematica si è attenuta alle linee guida Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page et al., 2021).

## **Strategia di ricerca**

Per effettuare questa revisione sono state utilizzate le seguenti quattro banche dati bibliografiche elettroniche: PubMed, Scopus, Science Direct e Web of Science, e sono stati selezionati solo gli studi pubblicati tra gennaio 2016 e aprile 2023. La ricerca della letteratura è stata effettuata in cinque giorni, dal 16 al 20 aprile 2023, e un'ulteriore ricerca finale è stata effettuata a maggio 2023. I seguenti termini di ricerca sono stati utilizzati per ordinare gli articoli utilizzando gli operatori booleani "AND" e "OR": "neurofeedback AND sport OR atleta OR performance" e "EEG biofeedback AND sport OR atleta OR performance". Tutti gli studi sono stati filtrati anche in base alla lingua e al tipo di articolo (si vedano i criteri di inclusione e di esclusione riportati di seguito). La ricerca è stata eseguita da un solo autore e ha incluso titolo dell'articolo, abstract, parole chiave e anno di pubblicazione.

## **Selezione degli studi**

Lo screening, l'ammissibilità e la selezione degli studi sono stati effettuati da un solo autore (NOME E COGNOME). Tutti i risultati della ricerca elettronica sono stati importati nel software Rayyan per le analisi (Ouzzani et al., 2016). Gli studi eleggibili sono stati identificati seguendo un processo in tre fasi. In primo luogo, i risultati delle ricerche sono stati uniti e i record duplicati sono stati rimossi. Poi, come secondo passo, sulla base dello screening del titolo e dell'abstract, sono state escluse le pubblicazioni chiaramente irrilevanti per l'argomento in esame. Infine, sono stati recuperati i testi integrali degli studi potenzialmente rilevanti e un autore (NOME E COGNOME) li ha esaminati per verificarne l'ammissibilità (vedi criteri di inclusione ed esclusione sotto).

## **Criteri di inclusione**

Gli studi inclusi nella revisione dovevano soddisfare i seguenti requisiti: I) essere scritti in inglese; II) essere stati pubblicati tra gennaio 2016 e aprile 2023; III) includere valutazioni pre- e post-intervento; IV) essere stati condotti su sportivi sani (per questa revisione non è stata stabilita una fascia d'età); V) essere articoli originali ed empirici; VI) essere uno studio controllato randomizzato (RCT) o uno studio controllato non randomizzato (NRS), VII) essere articoli pubblicati o in corso di stampa, VIII) misurare gli effetti di un allenamento di neurofeedback sulle prestazioni sportive e cognitive degli atleti.

### **Criteri di esclusione**

Sono stati esclusi da questa revisione gli studi: I) condotti su soggetti affetti da malattie fisiche, neurologiche e/o psichiatriche o in trattamento farmacologico; II) privi di un resoconto completo dei metodi (in particolare la posizione degli elettrodi e la frequenza selezionata per il neurofeedback) e III) studi qualitativi, revisioni narrative o sistematiche, meta-analisi, capitoli di libri e articoli di conferenze.

### **Estrazione dei dati**

L'estrazione dei dati è stata eseguita da un autore (NOME E COGNOME) e verificata per accuratezza e completezza da un secondo autore (NOME E COGNOME). Le informazioni ottenute da ogni studio sono state registrate su un foglio Excel e hanno incluso i dettagli della pubblicazione (autori e anno), le caratteristiche della popolazione (numero di partecipanti, sesso, età, disciplina sportiva e livello di competenza) e le caratteristiche dello studio (disegno e procedura dello studio, dispositivo di neurofeedback, frequenza e durata delle sessioni di allenamento, posizione degli elettrodi, intervento, feedback utilizzato, gruppo di controllo, esiti, effetti dell'intervento). Le informazioni sugli studi selezionati sono presentate nella Table 1 (in appendice).

### **Valutazione del rischio di Bias**

Abbiamo utilizzato il Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT, versione 2018; Hong et al., 2018) per indagare le possibili fonti di bias. Questa lista di controllo è stata utilmente impiegata in altre revisioni sistematiche nel campo della psicologia dello sport (Gayman et al., 2016; Gröpel & Mesagno, 2019; Siekańska et al., 2021) e consente ai ricercatori di valutare la qualità metodologica di cinque diversi tipi di disegno di studio: studi qualitativi, studi controllati randomizzati, studi quantitativi non randomizzati, studi quantitativi descrittivi e studi con metodi misti, e comprende fino a cinque criteri metodologici per ciascuno di essi, valutati su una scala nominale (sì, no, non so dire). Gli articoli sono stati valutati da un autore (NOME E COGNOME) e controllati per l'accuratezza da un secondo autore (NOME E COGNOME). In

particolare, gli studi recuperati per la presente revisione sono stati studi controllati randomizzati e studi controllati non randomizzati e non controllati. Per gli studi randomizzati controllati abbiamo valutato se la randomizzazione era stata effettuata in modo appropriato, se i gruppi erano comparabili al basale, se i dati sugli esiti erano completi, se era stato effettuato il blinding e se i partecipanti avevano aderito all'intervento assegnato e il punteggio totale potenziale variava dal 20% (un criterio soddisfatto) al 100% (tutti e cinque i criteri soddisfatti). Per gli studi non randomizzati abbiamo valutato la qualità metodologica analizzando se il campione era rappresentativo della popolazione target, se le misurazioni erano appropriate, se i dati sugli esiti erano completi, se i confondenti erano stati presi in considerazione e se l'intervento era stato somministrato come previsto e il punteggio totale potenziale andava dal 20% (un criterio soddisfatto) al 100% (tutti e cinque i criteri soddisfatti). È importante notare che nessuno degli studi è stato escluso in base alla valutazione della qualità metodologica, ma i punteggi e i commenti di ogni articolo revisionato sono riportati per garantire la trasparenza e consentire ai lettori di valutare la qualità di questi studi (vedi Table 2 in appendice).

## **Risultati**

### **Selezione degli studi**

La strategia di ricerca ha evidenziato 6582 studi potenzialmente rilevanti. Gli articoli recuperati sono stati vagliati in tre fasi: in primo luogo, sono stati rimossi tutti i duplicati (2956 articoli) e altri 415 studi sono stati esclusi a causa di un tipo di pubblicazione e di un disegno di studio errati; successivamente, sulla base dello screening dei titoli e degli abstract, sono state escluse le pubblicazioni che erano chiaramente irrilevanti per l'argomento in esame, nonostante citassero i termini di ricerca (3172 articoli). Per queste due fasi abbiamo utilizzato il software Rayyan (Ouzzani et al., 2016). A questo punto, 39 articoli soddisfacevano i criteri di ammissibilità, quindi li abbiamo cercati per il recupero. Sono stati inoltre esclusi due articoli, uno per l'impossibilità di recuperare il testo completo e un altro perché non soddisfaceva il criterio di idoneità linguistica. Infine, sono stati scaricati e letti i testi completi dei restanti 37 studi e 13 articoli non sono stati inclusi. I motivi dell'esclusione sono stati i seguenti: mancanza di informazioni sulla posizione degli elettrodi e sulla/e banda/e di frequenza mirata/e dal

neurofeedback (5 articoli), neurofeedback non effettuato su sportivi (2 articoli), studi ricercati per il recupero perché menzionavano un training di feedback nel titolo e/o nell'abstract ma che non utilizzavano un training EEG-neurofeedback (4 articoli), tipo di pubblicazione errato (1 articolo di revisione) e disegno di studio errato (1 studio qualitativo). Al termine del processo di selezione, 24 articoli sono stati inclusi in questa revisione. I risultati della ricerca della letteratura sono presentati nel diagramma di flusso PRISMA (Figure 1 in appendice).

### **Caratteristiche degli studi**

Le caratteristiche principali degli studi selezionati sono riassunte nella Table 1(in appendice). Per quanto riguarda la disciplina sportiva, due studi hanno indagato il calcio (Rijken et al., 2016; Mirifar et al., 2019), due l'atletica leggera (Rijken et al., 2016; Mikicin & Orzechowski, 2022), uno la pallavolo (Hosseini & Norouzi, 2017), tre il judo (Maszczyk et al., 2018; Gołaś et al., 2019; Maszczyk et al., 2020), due di nuoto (Mikicin et al., 2020; Mikicin & Orzechowski, 2022), uno di basket (Shokri & Nosratabadi, 2021), uno di triathlon (Kober et al., 2022), due di tiro a segno (Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018; Gong, et al., 2020), uno di freccette (Norouzi et al., 2018), uno di pallamano (Szczypińska & Mikicin, 2019), uno di hockey su ghiaccio (Christie, Bertollo & Werthner, 2020), tre di golf (Wang et al., 2022; Chen et al., 2022; Pourbehbahani et al., 2023) e 6 studi non hanno specificato quale tipo di sport hanno esaminato (Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021; Mottola et al., 2021; Domingos et al., 2021). Due studi (Rijken et al., 2016; Mikicin & Orzechowski, 2022) hanno riportato i dati di due sport diversi (rispettivamente calcio e atletica leggera e nuoto e atletica leggera). Per quanto riguarda il numero di partecipanti, il campione totale dei 24 studi selezionati per questa revisione comprendeva 746 partecipanti, di cui 55 non atleti (riportati da Domingos et al., 2020 e da Kober et al., 2022) e 691 sportivi. Il livello degli atleti comprendeva 47 atleti professionisti (Rijken et al., 2016; Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018; Szczypińska & Mikicin, 2019), 34 atleti d'élite (Rijken et al., 2016; Hosseini & Norouzi, 2017; Szczypińska & Mikicin, 2019), 15 atleti non-élite (Hosseini & Norouzi, 2017), 76 studenti/atleti di livello universitario (Gong et al., 2020; Christie, Bertollo & Werthner, 2020), 24 atleti di livello internazionale (Gołaś et al., 2019; Maszczyk et al., 2020) e 145 atleti alle prime armi (Norouzi et al., 2018; Shokri & Nosratabadi, 2021; Wang et al.,



2022; Pourbebahani et al., 2023). Dodici studi non hanno riportato informazioni sul livello dei rimanenti 350 atleti (Maszczyk et al., 2018; Mirifar et al., 2019; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Mikicin et al., 2020; Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021; Mottola et al., 2021; Kober et al., 2022; Chen et al., 2022; Mikicin & Orzechowski 2022). Il numero totale di donne era 129: 12 non atlete incluse nel gruppo di controllo da Kober et al. (2022) e 117 sportive suddivise in 9 atlete d'élite (Szczyńska & Mikicin, 2019), 18 atlete di livello universitario (Christie, Bertollo & Werthner, 2020) e 35 atlete alle prime armi (Wang et al., 2022; Pourbebahani et al., 2023). Il livello delle restanti 55 atlete non è stato specificato (Mottola et al., 2021; Domingos et al., 2021; Kober et al., 2022; Chen et al., 2022) e 6 articoli non hanno riportato se hanno incluso donne nei loro studi (Rijken et al., 2016; Maszczyk et al., 2018; Mikicin, Szczyńska & Skwarek, 2018; Mikicin et al., 2020; Domingos et al., 2020; Mikicin & Orzechowski, 2022). L'età media variava dai 12,87 anni dei partecipanti allo studio di Dana, Rafiee e Gholami (2019) ai 37,1 anni degli atleti dello studio di Chen et al. (2022). Per quanto riguarda il dispositivo di neurofeedback, 7 studi hanno utilizzato il software ProComp Infiniti + BioGraph Infinity (Hosseini & Norouzi, 2017; Gołaś et al., 2019; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Christie, Bertollo & Werthner, 2020; Shokri & Nosratabadi, 2021; Chen et al., 2022; Pourbebahani et al., 2023), 1 studio ha utilizzato un sistema di neurofeedback per l'home-training (Rijken et al., 2016), 1 studio ha utilizzato il dispositivo di monitoraggio EEG wireless Enobio e il software Neuroelectrics Instrument Controller, v 1.1 - NIC 1.1 + Biograph Infiniti (Maszczyk et al., 2018), 2 studi hanno utilizzato il sistema EEG DigiTrack Biofeedback (Mikicin, Szczyńska & Skwarek, 2018), 1 studio ha utilizzato il sistema Nexus-10 MKII + il software BioTrace (Mirifar et al., 2019), 2 studi hanno utilizzato System Flex 30 + il software TruScan (Mikicin et al., 2020), 1 studio ha utilizzato il sistema Deymed TruScan (versione software 6.34.1761; Maszczyk et al., 2020), 1 studio ha utilizzato il plugin di formazione EEG incluso nel software Somnium (Domingos et al., 2021), 3 studi hanno riportato solo il software utilizzato (software BioExplorer: Mottola et al., 2021; software BioTrace: Wang et al., 2022; software SIMULINK: Kober et al., 2022) e 5 studi non hanno indicato né il dispositivo né il software utilizzato (Norouzi et al., 2018; Gong et al., 2020; Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021). Undici studi hanno addestrato la potenza Alpha, 10 la banda Beta, 9 la frequenza Theta e 10 il ritmo SMR; inoltre, 10 studi hanno addestrato più di una banda di frequenza contemporaneamente (vedi Table 1 in

appendice). La maggior parte (12) degli studi inclusi in questa revisione ha utilizzato un feedback visivo, 5 studi hanno utilizzato un feedback uditivo e 7 hanno utilizzato una combinazione di entrambi, il periodo di intervento variava da 1 giorno a 4,5 mesi e la durata del neurofeedback giornaliero variava da 4 minuti a 1,5 ore (vedi Table 1 in appendice).

### **Rischio di Bias negli studi**

Tutti gli studi inclusi in questa revisione sono stati valutati per la qualità del report in base agli standard del MMAT (versione 2018; Hong et al., 2018). Diciassette studi hanno utilizzato un disegno randomizzato controllato, mentre i restanti 7 erano studi quantitativi non randomizzati. Tra gli studi controllati randomizzati, 1 (5,88%) ha ottenuto un punteggio del 20%, 7 (41,18%) hanno ottenuto un punteggio del 40%, 8 (47,06%) hanno ottenuto un punteggio del 60% e 1 (5,88%) è stato giudicato di alta qualità (80%), mentre per quanto riguarda gli studi non randomizzati, 1 (14,28%) ha ottenuto un punteggio del 40%, 5 (71,43%) hanno ottenuto un punteggio del 60% e 1 (14,28%) è stato giudicato di alta qualità (80%). Questi due gruppi di studi sono stati valutati utilizzando cinque criteri ciascuno. Entrando nello specifico degli studi randomizzati controllati, per quanto riguarda i bias di selezione, 14 studi (82,35%) non hanno riportato le modalità di randomizzazione per l'assegnazione dei partecipanti a ciascun gruppo. Per quanto riguarda il bias di rilevazione, solo 4 studi (23,53%) hanno dichiarato che i valutatori dell'esito erano in cieco rispetto all'intervento fornito, mentre gli altri 13 studi (76,47%) non hanno fornito alcuna informazione su questo criterio. Inoltre, per quanto riguarda l'attrition bias, 4 studi (23,53%) non hanno riportato dati completi sugli esiti per diversi motivi (dati di scarsa qualità, infortunio dei partecipanti e abbandono). Infine, in 7 studi su 17 (41,18%) i gruppi erano comparabili al basale e solo in uno studio i partecipanti non hanno aderito completamente all'intervento assegnato, poiché hanno completato un numero di sessioni di neurofeedback inferiore a quello richiesto dallo studio a cui partecipavano. Per quanto riguarda gli studi non randomizzati, nessuno di essi (0%) soddisfaceva il criterio di rappresentatività del campione, sia perché mancavano di punti di taglio chiari per l'inclusione dei partecipanti, sia per il metodo di campionamento utilizzato (campionamento di convenienza o consecutivo), per cui tutti gli studi mostravano bias di selezione. La seconda caratteristica valutata è stata l'adeguatezza delle misure sia per quanto riguarda l'esito che l'intervento e tutti gli studi inclusi (100%) hanno soddisfatto questo criterio. Per quanto riguarda il bias di rilevazione, solo 2 studi

(28,57%) non hanno riportato dati di esito completi a causa della qualità insufficiente del segnale EEG o della contaminazione da artefatti nelle epoche EEG. Prendendo in considerazione i confondenti, questi sono stati menzionati solo in 4 studi (57,14%). Infine, l'ultima caratteristica valutata è stata la somministrazione dell'intervento e i risultati del MMAT hanno mostrato che solo uno studio non soddisfaceva questo requisito, in quanto i partecipanti si sottoponevano all'intervento meno di quanto richiesto. Come riportato in precedenza (si veda la sezione "Valutazione della qualità"), non sono stati esclusi gli studi con bassa qualità metodologica, in quanto non è raccomandato (Hong et al., 2018, p. 1), pertanto la Table 2 (in appendice) mostra la valutazione di ciascun criterio preso in considerazione per ogni studio, al fine di fornire una migliore illustrazione della qualità degli studi inclusi.

### **Sintesi dei risultati**

Le variabili dipendenti esaminate in questa revisione riguardano la prestazione sportiva (punteggio, prestazione fisica, parametri fisici e aspetti tecnici importanti per la prestazione) e la prestazione cognitiva (in termini di tempi di reazione, autoregolazione, attenzione, concentrazione, memoria, stress) degli atleti. Per quanto riguarda gli studi randomizzati controllati, 16 su 17 hanno mostrato un effetto positivo del neurofeedback sulle prestazioni sportive e cognitive, mentre solo lo studio di Mirifar et al. (2019) non ha mostrato miglioramenti nell'attenzione e nei tempi di reazione in seguito a un allenamento di neurofeedback mirato a diminuire le bande theta e beta, in un gruppo, e ad aumentare il ritmo SMR, in un altro. Otto studi hanno preso in considerazione la variabile "prestazione sportiva" (Maszczyk et al., 2018; Norouzi et al., 2018; Gong et al., 2020; Christie, Bertollo & Werthner, 2020; Shokri & Nosratabadi, 2021; Mottola et al., 2021; Wang et al., 2022; Pourbehbahani et al., 2023) utilizzando un allenamento di neurofeedback mirato a diverse bande di frequenza: alpha (5 studi; Norouzi et al., 2018; Gong et al., 2020; Shokri & Nosratabadi, 2021; Mottola et al., 2021; Wang et al., 2022), theta (3 studi; Maszczyk et al., 2018; Christie, Bertollo, & Werthner, 2020; Shokri & Nosratabadi, 2021), beta (2 studi; Maszczyk et al., 2018; Christie, Bertollo & Werthner, 2020) e SMR (4 studi; Gong et al., 2020; Christie, Bertollo & Werthner, 2020; Shokri & Nosratabadi, 2021; Pourbehbahani et al., 2023). Alcuni studi hanno utilizzato protocolli che prevedevano di agire su più bande di frequenza contemporaneamente o hanno confrontato gruppi sperimentali sottoposti a diversi allenamenti delle onde cerebrali e quindi sono stati

conteggiati più di una volta. Questi studi hanno dimostrato un miglioramento delle prestazioni, indotto dal neurofeedback, nelle seguenti componenti considerate della prestazione sportiva: aspetti tecnici importanti per la performance (Maszczyk et al., 2018; Norouzi et al., 2018; Mottola et al., 2021; Wang et al., 2022) e punteggio (Shokri & Nosratabadi, 2021; Gong et al., 2020; Christie, Bertollo & Werthner, 2020; Pourbehbahani et al., 2023). Nove studi hanno considerato la variabile “performance cognitiva” (Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018; Norouzi et al., 2018; Gołaś et al., 2019; Maszczyk et al., 2020; Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021; Kober et al., 2022) utilizzando onde beta (3 studi; Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018; Gołaś et al., 2019; Maszczyk et al., 2020), alpha (5 studi; Norouzi et al., 2018; Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021), theta (2 studi; Gołaś et al., 2019; Maszczyk et al., 2020) e onde SMR (2 studi; Gołaś et al., 2019; Kober et al., 2022) come target di neurofeedback e hanno osservato un miglioramento dell’attenzione e del tempo di reazione nel COG Test e nell’Oddball Task (Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018; Gołaś et al., 2019; Maszczyk et al., 2020; Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021), della memoria a breve termine nel Digit Span Test (Domingos et al., 2020; Domingos et al., 2021), la memoria di lavoro nell’N-Back Test (Domingos et al., 2021; Domingos et al., 2021), l’autoregolazione (Kober et al., 2022), l’ansia cognitiva (Norouzi et al., 2018) e l’HRV (che è stata correlata alle prestazioni cognitive, come l’elaborazione delle informazioni, la regolazione dell’attenzione, l’ansia e lo stress; Domingos et al., 2021). Inoltre, lo studio di Domingos et al. (2021) ha sottoposto due gruppi di atleti a sessioni di neurofeedback in condizioni di silenzio e di rumore e ha dimostrato che il gruppo esposto al rumore intermittente ha ottenuto risultati positivi sia nel test della memoria di lavoro ( $p = 0,005$ ) sia nel test dei tempi di reazione ( $p = 0,003$ ). Per quanto riguarda gli studi non randomizzati, tutti hanno mostrato effetti significativi del neurofeedback nel migliorare le prestazioni sportive e cognitive degli atleti. In particolare, 4 studi hanno esaminato la variabile “prestazioni sportive” (Hosseini & Norouzi, 2017; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Chen et al., 2022; Mikicin & Orzechowski 2022) utilizzando un allenamento di neurofeedback mirato a diverse onde cerebrali: SMR (2 studi; Hosseini & Norouzi, 2017; Dana, Rafiee & Gholami, 2019), alpha (1 studio; Hosseini & Norouzi, 2017), beta (2 studi; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Mikicin & Orzechowski, 2022) e theta (2 studi; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Chen et al., 2022). Anche in questo caso, alcuni studi sono stati

contati più di una volta perché hanno esaminato diverse bande di frequenza. Questi studi hanno dimostrato un miglioramento delle prestazioni, indotto dal neurofeedback, nelle seguenti componenti considerate della prestazione sportiva: punteggio (Hosseini & Norouzi, 2017; Chen et al., 2022) e parametri fisici importanti per la prestazione (Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Mikicin & Orzechowski, 2022). Sei studi hanno preso in considerazione la variabile “performance cognitiva” (Rijken et al., 2016; Hosseini & Norouzi, 2017; Szczypińska & Mikicin, 2019; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Mikicin et al, 2020; Mikicin & Orzechowski, 2022) utilizzando le tecnologie alpha (2 studi; Rijken et al., 2016; Hosseini & Norouzi, 2017), beta (4 studi; Szczypińska & Mikicin, 2019; Dana, Rafiee & Gholami, 2019; Mikicin et al, 2020; Mikicin & Orzechowski, 2022), theta (2 studi; Szczypińska & Mikicin, 2019; Dana, Rafiee & Gholami, 2019) e onde SMR (3 studi; Hosseini & Norouzi, 2017; Szczypińska & Mikicin, 2019; Dana, Rafiee & Gholami, 2019) come target del neurofeedback e hanno osservato un miglioramento del punteggio RESTQ (Recovery and Stress Questionnaire; Rijken et al, 2016), una riduzione dell’uso del self-talk (Hosseini & Norouzi, 2017) e un miglioramento della concentrazione e dell’attenzione (Szczypińska & Mikicin, 2019; Mikicin & Orzechowski, 2022), della memoria di lavoro nel Wechsler Digit Span Test (Dana, Rafiee & Gholami, 2019) e delle prestazioni lavorative mentali nel Kreapelin Test (Mikicin et al., 2020).

## **Discussione**

Lo scopo di questa revisione sistematica è quello di fornire un quadro aggiornato relativo agli ultimi sviluppi nell’utilizzo della tecnica del neurofeedback nel campo della psicologia dello sport, con particolare riferimento agli effetti sulla performance sportiva (miglioramento nei punteggi e nei parametri fisici e tecnici importanti per la buona riuscita della prestazione) e cognitiva (miglioramento nelle capacità attentive e mnemoniche, nella concentrazione, nei tempi di reazione, nell’auto-regolazione e nella gestione dello stress) degli atleti. I risultati di questa revisione indicano che la maggior parte degli studi presi in esame (ad eccezione dello studio di Mirifar e colleghi del 2019) supporta l’efficacia del neurofeedback nel migliorare la prestazione sportiva e cognitiva degli atleti. Le bande di frequenza allenate e i protocolli utilizzati sono diversi e quasi tutti suggeriscono effetti positivi.

Come evidenziato anche negli studi inclusi in questa revisione, la performance cognitiva e quella sportiva sono spesso strettamente correlate, poiché il miglioramento in una di esse è

strettamente connesso al potenziamento dell'altra. Non discuteremo perciò questi aspetti separatamente, ma cercheremo di integrarli partendo dal ruolo che ogni onda cerebrale ha nel funzionamento cognitivo dell'individuo. Negli studi inclusi in questa revisione sono stati utilizzati protocolli di neurofeedback diversi, focalizzati sull'allenamento delle bande alpha, theta e beta e del ritmo SMR. Relativamente alla banda alpha, tutti gli studi hanno mostrato effetti significativi sulla prestazione sportiva, alcuni dei quali hanno utilizzato un protocollo mirato esclusivamente a questa frequenza (Norouzi et al., 2018; Mottola et al., 2021; Wang et al., 2022), mentre altri hanno utilizzato protocolli misti (Hosseini & Norouzi, 2017; Gong et al., 2020; Shokri & Nosratabadi, 2021). La banda alpha è collegata all'elaborazione di informazioni visuospatiali, all'attenzione spaziale verso target visivi (Del Percio et al., 2009), alla velocità di elaborazione delle informazioni (Angelakis et al., 2007), alle funzioni mnemoniche (Nan et al., 2012; Guez et al., 2015) e ai tempi di reazione (Ziółkowski et al., 2012). Lo studio di Norouzi et al. (2018) ha mostrato come il Quiet Mind Training (consistente in una soppressione del ritmo alpha) contribuisca al miglioramento dell'apprendimento motorio implicito in atleti principianti, conducendo proprio ad un aumento delle risorse visuospatiali che, a loro volta, determinano un miglioramento della performance motoria. Inoltre, questi autori hanno mostrato che la prestazione motoria non veniva inficiata da condizioni di stress, confermando quanto già mostrato da Masters (1992), Lam et al. (2009) e Vine et al. (2013). Secondo questi ultimi, le tecniche di apprendimento implicito conducono ad un controllo inconscio e possono quindi contrastare l'interruzione dell'elaborazione delle abilità motorie implicite che deriva dal sovraccarico cognitivo e dalla pressione psicologica. Tuttavia, una spiegazione alternativa potrebbe derivare da un miglioramento della concentrazione o da una riduzione dell'ansia e dello stress grazie al Quiet Mind Training, in quanto capace di generare il cosiddetto "flow state", uno stato mentale associato a ridotta attenzione cosciente e ad aumentati sicurezza, calma, focus e automaticità (Harris, Vine, & Wilson, 2017).

L'attività alpha frontale è stata collegata anche a processi emotivi e motivazionali e, proprio in accordo con il modello di avvicinamento-ritiro dell'asimmetria frontale (secondo il quale l'attività frontale di sinistra è associata con processi legati all'avvicinamento, mentre l'attività frontale di destra è associata con processi legati all'evitamento; Davidson, 1992; Harmon-Jones & Gable, 2018), Mottola e colleghi (2021) hanno investigato per la prima volta gli effetti del neurofeedback sulla prestazione di resistenza, dimostrando che aumentare l'attività corticale

frontale di sinistra (NFL) ha un effetto positivo su questo tipo di performance, in quanto supporta i partecipanti ad esercitarsi per periodi di tempo maggiori mentre provano un elevato livello di sforzo fisico e li aiuta a mantenere il focus e il coinvolgimento nel compito sempre più doloroso e faticoso, ritardando quindi il loro bisogno di fermarsi e ritirarsi. Una nota componente della banda di frequenza alpha è il ritmo Mu, il quale riflette l'allocazione delle risorse cognitive per rispondere alla programmazione motoria (Pineda, 2005) durante l'esecuzione di azioni dirette ad uno scopo (Cannon et al., 2014) e, negli studi sullo sport, un ritmo Mu diminuito è stato associato ad un'augmentata performance nel golf putting (Wang et al., 2020), al successo nel compito di putting (cioè il numero di palle messe in buca; Babiloni et al., 2008; Cooke et al., 2014; Wang et al., 2019) e alla correzione dell'azione (Cooke et al., 2015). In linea con queste scoperte, lo studio di Wang et al. (2022) ha mostrato come una diminuzione del ritmo Mu conduca ad un miglioramento della performance motoria nell'ambito di abilità visuo-motorie complesse, come il golf putting, dopo una singola sessione di neurofeedback. Il miglioramento della performance motoria potrebbe essere dovuto ad un legame tra il ritmo Mu, il livello di controllo attentivo dell'azione (visto che il ritmo Mu è stato associato con il controllo motorio) e la prestazione visuo-motoria. Queste scoperte suggeriscono che un ritmo Mu più basso rifletta una maggiore allocazione delle risorse cognitive per rispondere alla programmazione motoria, risultando in un controllo motorio adattivo e in aumentati livelli di controllo dell'azione durante compiti visuo-motori complessi (Pfurtscheller, 2003; Klimesch et al., 2007) e quindi, di conseguenza, nel miglioramento della prestazione.

Coerentemente con le funzioni cognitive ricoperte dalla banda di frequenza alpha, lo studio di Domingos et al. (2020) ha mostrato un miglioramento nei tempi di reazione (Oddball Task), confermando i risultati ottenuti da Klimesch nel 1999. Inoltre, nel 2021 Domingos e colleghi hanno condotto una serie di studi, dimostrando che un ambiente rumoroso aveva effetti positivi nei test di memoria di lavoro (N-Back) e tempi di reazione (Oddball Task), che la prestazione cognitiva in questi stessi compiti era migliore se venivano effettuate 3 sessioni di neurofeedback a settimana rispetto a 2 sessioni a settimana (suggerendo che un protocollo di allenamento concentrato conduca a risultati migliori) e che un protocollo costituito da 3 allenamenti a settimana conduceva ad un miglioramento nell'Heart Rate Variability (HRV; supportando lo studio di Alexeeva et al., 2012), una misura di interesse nel campo sportivo in quanto è stata

collegata alla funzione del Sistema Nervoso Autonomo, al controllo cardiovascolare (Stys & Stys, 1998) e alla performance cognitiva (elaborazione delle informazioni, regolazione dell'attenzione, ansia e stress; Gorman & Sloan, 2000; Lucini et al., 2005; Thayer & Brosschot, 2005; Thayer & Sternberg, 2006; Thayer et al., 2009). Infine, lo studio di Rijken e colleghi (2016) ha mostrato come un programma di peak performance insieme ad un training di neurofeedback conduca a cambiamenti nella prestazione e alla riduzione dello stress, supportando lo studio di Dekker et al. (2014), nel quale un alpha-training condotto su ginnaste ha mostrato cambiamenti nella qualità del sonno e nella forma fisica e mentale.

L'onda SMR corrisponde alla banda di frequenza della corteccia sensomotoria, la quale è inversamente correlata all'attività della corteccia sensomotoria (Sterman, 1996), indicando che un'attività talamica minore è legata ad una più bassa interferenza dell'elaborazione somatosensoriale (Kober et al., 2015). Perciò, una maggiore potenza del ritmo SMR corrisponde ad uno stato mentale di elaborazione neurale durante compiti psicomotori e attentivi (Kober et al., 2015; Cheng et al., 2017). Nell'ambito delle discipline sportive, alcune ricerche hanno mostrato come un ritmo SMR elevato nella fase finale della preparazione motoria sia associato ad una prestazione migliore nel tiro con le freccette (Cheng, Hung et al., 2015), nel golf putting (Cheng, Huang et al., 2015) e nel compito di shooting con arma da fuoco (Cheng et al., 2017), suggerendo che un ritmo SMR elevato possa essere un indicatore di una maggiore efficienza psicomotoria durante l'esecuzione del movimento. Sulla base di queste evidenze, Christie, Bertollo e Werthner (2020) hanno dimostrato la capacità di un training SMR di migliorare la performance sportiva in giocatori di hockey su ghiaccio. L'aspetto interessante di questo studio è che, sebbene i partecipanti si siano dimostrati capaci di aumentare il loro ritmo SMR nel setting di laboratorio, non sono stati in grado di fare lo stesso durante la prestazione di shooting di hockey. Alcuni studi (Pfurtscheller & Berghold, 1989; Leocani et al., 2000) hanno mostrato come prima di un movimento le bande alpha e beta desincronizzino sulla corteccia sensomotoria e questo può essere attribuito alla preparazione e all'esecuzione motoria. Ulteriore conferma proviene dallo studio di Christie et al. del 2019, i quali hanno mostrato che il ritmo SMR desincronizza prima dell'illuminazione di una luce target. Perciò, l'incapacità dei partecipanti di aumentare il ritmo SMR durante la performance potrebbe essere dovuta o alla loro inabilità nel trasferire l'apprendimento dal laboratorio alla condizione di performance o ad una desincronizzazione SMR evento-relata (cioè una riduzione



dell'ampiezza) che si verifica durante la preparazione e l'esecuzione motoria (Jeon et al., 2011). Un altro studio ad aver utilizzato un training di neurofeedback mirato all'onda SMR è quello di Pourbehbahani et al. (2023) in cui è stato mostrato che il potenziamento del ritmo SMR conduce ad un miglioramento nella prestazione del golf putting, andando a confermare i risultati ottenuti da altri studi (Vernon, Frick & Gruzelier, 2004; Cheng et al., 2015; Cheng et al., 2015; Gong et al., 2020) e questo miglioramento potrebbe essere dovuto ad una facilitazione dell'apprendimento motorio attraverso la soppressione dei processi motori e cognitivi irrilevanti per il compito (Wang et al., 2020), in linea con l'ipotesi dell'efficienza psicomotoria (Hatfield, 2018).

Infine, lo studio di Kober e colleghi (2022), condotto su triatleti, ha mostrato come questi erano in grado di auto-regolare la loro attività neurale, cioè mostravano una prestazione di training superiore rispetto al gruppo di controllo, mantenendo lo stato mentale necessario ad aumentare la potenza del ritmo SMR per un periodo di tempo più lungo. Questo supporta l'assunto che gli atleti sono generalmente più allenati nell'autoregolazione e nella capacità di ignorare i pensieri irrilevanti per il compito, il che non è solo importante per l'autoregolazione dell'attività fisica, ma anche per l'autoregolazione dell'attività cerebrale (Dietrich, 2004; Dietrich & Audiffren, 2011; Emmert et al., 2016; Enriquez-Geppert et al., 2017; Kober et al., 2013; Kober et al., 2017a; Leary et al., 2006; Lo, Shr-Da Wu, & Yueh-Chang Wu, 2004; Ninaus et al., 2013; Ninaus et al., 2015; Tan et al., 2014; Tan, Jansari, Keng, & Goh, 2009; Tan et al., 2015; Wood et al., 2014). Inoltre, i triatleti mostravano un aumento di volume della materia bianca bilateralmente nel giro frontale inferiore, nell'insula e nella corteccia orbitofrontale e la letteratura indica che l'attività fisica conduce a volumi maggiori in queste regioni, collegate a migliorate abilità di controllo cognitivo che permettono un'autoregolazione di successo dell'attività fisica (Buckley et al., 2014; Cao et al., 2021; Colcombe et al., 2006; Hofmann et al., 2012; Hu et al., 2018; Voss et al., 2013). L'insula e i giri frontali mediale e inferiore sono legati alla percezione interocettiva e alla focalizzazione dell'attenzione sugli stati interni (Craig, 2009), processi cognitivi centrali nell'autoregolazione dell'attività cerebrale (Davelaar, 2018; Emmert et al., 2016; Kober et al., 2017a; Ninaus et al., 2013; Ninaus et al., 2015). I triatleti potrebbero perciò essere più efficienti nel focalizzare l'attenzione sui loro stati interni, ignorando nel frattempo gli stimoli e i pensieri irrilevanti per il compito, il che conduce ad un miglioramento nella prestazione del neurofeedback.

Sulla base delle funzioni che le onde alpha e SMR svolgono in relazione alla performance sportiva, tre degli studi che abbiamo preso in esame hanno utilizzato un protocollo di neurofeedback mirato all'allenamento di entrambe le bande di frequenza. Lo studio di Hosseini e Norouzi (2017) ha evidenziato una riduzione del self-talk e un miglioramento nel punteggio del servizio in giocatori di pallavolo di élite e non di élite, grazie ad una riduzione delle distrazioni ottenuta tramite il training sull'onda alpha. Nel loro studio, Gong et al. (2020) hanno osservato un miglioramento significativo della prestazione di shooting nel gruppo SMR e una diminuzione della prestazione nel gruppo alpha. Questo declino potrebbe essere dovuto al fatto che, secondo Plotkin e Rice (1981), aumentare o diminuire l'attività EEG in una regione cerebrale può in realtà condurre ad un aumento dell'attività in quella regione. Perciò, sebbene il gruppo alpha avesse il compito di aumentare il ritmo alpha nella regione temporale sinistra e di diminuirlo in quella temporale destra, i risultati potrebbero aver condotto ad un rafforzamento dell'attività in entrambi gli emisferi cerebrali perché i partecipanti non hanno acquisito le loro abilità di shooting attraverso il training e la prestazione non è migliorata. Infine, un altro studio ad aver dimostrato l'efficacia di un intervento di neurofeedback alpha-SMR, in combinazione con un intervento di biofeedback, è quello di Shokri & Nosratabadi del 2021 condotto su giocatori di basket, i quali hanno suggerito che, nel gruppo con intervento combinato, il neurofeedback può aver contribuito ad una prestazione migliore (nel lay-up, nel chest passing, nel dribbling e nel tiro libero), in quanto produce un aumento dell'attenzione e della vigilanza e una diminuzione dei tempi di reazione (Singer, 2000; Gruzelier et al., 2006; Raz & Buhle, 2006; Yuan et al., 2006; Chein & Morrison, 2010; Gruzelier et al., 2010), componenti importanti in ognuno dei quattro indicatori di prestazione valutati.

Un altro protocollo di neurofeedback ampiamente utilizzato è il "theta-beta ratio" (TBR), ossia il rapporto tra l'attività della banda theta e quella della banda beta, consistente nella soppressione del ritmo theta e nel potenziamento della frequenza beta. È stato osservato che il TBR sia collegato al decision making (Schutter e van Honk, 2005; Massar et al., 2012; Massar et al., 2014), al controllo attentivo (Putman et al., 2010, 2014; Angelidis et al., 2016; van Son et al., 2018) e alla down-regulation dei sentimenti negativi (Tortella-Feliu et al., 2014), perciò la sua applicazione potrebbe risultare efficace in relazione a diversi fenomeni e condizioni, tra cui il miglioramento della prestazione in ambito sportivo. A questo proposito, Maszczyk et al.

(2018) hanno mostrato come una riduzione dei valori delle onde theta e alpha, insieme ad un aumento dei valori del ritmo beta, conduca ad un significativo miglioramento nell'equilibrio dinamico dei judoka a partire dalla 6<sup>a</sup>/7<sup>a</sup> sessione di intervento, a supporto dei risultati ottenuti da Hammond nei suoi studi del 2005. Inoltre, lo studio di Dana, Rafiee e Gholami (2019), condotto su studenti-atleti dai 10 ai 14 anni, ha mostrato un miglioramento delle abilità percettivo-motorie in seguito ad un training di neurofeedback mirato ad aumentare il ritmo SMR e il ritmo beta e a diminuire l'onda theta, come dimostrato anche da studi precedenti (Hammond, 2010; Sadeghi et al., 2013; Azarpaikan, Torbati & Sohrabi, 2014; Nan et al., 2015). Inoltre, è stata mostrata l'efficace di questo training nel migliorare la prestazione della memoria di lavoro (Digit Span diretto e inverso), coerentemente con i risultati ottenuti da altri studi (Boggio et al., 2006; Escolano, Aguilar & Minguez, 2011; Wang & Hsieh, 2013; Hsueh et al., 2016; Dashtbozorgi et al., 2017; Oftadehal, Movahedi & Sepahvand, 2018). La soppressione del ritmo theta riduce la sonnolenza (Nan et al., 2015), mentre il potenziamento del ritmo beta conduce ad un aumento della concentrazione, dell'attenzione continua e del problem solving (Schwartz & Andrasik, 2017) e questi effetti, insieme alla facilitazione dell'apprendimento motorio dovuta all'aumento del ritmo SMR (Wang et al., 2020), conducono ad una maggiore attenzione (con conseguente miglioramento della memoria di lavoro) e ad una maggiore regolazione del proprio equilibrio attraverso un controllo migliore sui muscoli che mantengono la postura (Hammond, 2010). Infine, anche gli studi di Gołaś e colleghi (2019) e Maszczyk e colleghi (2020) hanno utilizzato il protocollo TBR e hanno mostrato come questo sia efficace nel migliorare l'efficienza di elaborazione visiva in termini di attenzione e tempi di reazione, sia semplici sia complessi (Christie & Werthner, 2015), negli atleti di judo. I risultati di questi studi sono in accordo con quanto riportato in letteratura, in cui viene evidenziato come una soppressione del ritmo theta contemporaneamente ad un potenziamento dell'onda beta sia efficace nel migliorare i processi attentivi e nel ridurre i tempi di reazione (Egner & Gruzelier, 2001; Egner, Zech & Gruzelier, 2004; Kamiński, 2012).

Tuttavia, le onde theta e beta possono essere allenate anche separatamente. Ad esempio, lo studio di Chen et al. (2022) ha esaminato l'effetto dell'approccio dell'istruzione funzione-specifica (FSI; un approccio basato su istruzioni verbali dirette alla funzione che forniscono ai partecipanti la strategia per controllare il parametro EEG di interesse durante il neurofeedback)

sulla prestazione nel compito di putting, mostrando un significativo miglioramento della prestazione dopo il neurofeedback dell'onda theta frontale mediale (FMT).

La regione frontale è associata a processi attentivi top-down (Buschman & Miller, 2007) e un aumento nella FMT coincide con un aumento nell'allocazione delle risorse attentive (Nigbur et al., 2011) e con un miglioramento nella memoria di lavoro (Maurer et al., 2015), nell'attenzione selettiva (Noonan et al., 2018) e nelle funzioni esecutive (Enriquez-Geppert et al., 2014), perciò un training di neurofeedback mirato ad aumentare la FMT potrebbe determinare un aumento del focus attentivo che conduce, a sua volta, ad un miglioramento della prestazione (Baumeister et al., 2008; Doppelmayr et al., 2008). Infine, lo studio di Mikicic e colleghi (2018) ha invece mostrato un miglioramento dell'attenzione e della concentrazione sia nel gruppo sperimentale (prestazione di shooting) sia nel gruppo di controllo in seguito ad un training di neurofeedback mirato al potenziamento dell'onda beta. Le onde beta sono associate ad uno stato di attività mentale, alta vigilanza, concentrazione, attenzione focalizzata e sostenuta e favoriscono un'elaborazione cognitiva attenta ai dettagli e aumentano l'arousal. I risultati di questo studio sono in accordo con quelli di altri studi (Egner & Gruzelier, 2003; Vernon, 2005; Arns et al., 2008; Perry, Shaw & Zaichkowsky, 2011) e con la teoria della detezione del segnale, secondo la quale la vigilanza è necessaria quando uno stimolo rilevante appare raramente e, quando questo si manifesta, viene richiesta attenzione immediata (Green & Swets, 1966). Inoltre, coerentemente con gli studi di Colloca e Benedetti (2005) e Kaptchuk (2006), è stato rilevato un effetto placebo nel gruppo di controllo suggerendo che, anche in presenza di un falso feedback, la mera concentrazione sull'esercizio potrebbe aiutare a migliorare il livello di attenzione.

Riassumendo, la nostra revisione sistematica indica che la maggior parte degli studi presi in considerazione supporta l'efficacia del neurofeedback nel migliorare la prestazione sportiva e cognitiva di atleti appartenenti a diverse discipline sportive e con diversi livelli di esperienza. I nostri risultati sono coerenti con quelli di altre revisioni sistematiche e meta-analisi che hanno mostrato effetti positivi del neurofeedback nel migliorare i sintomi di campioni clinici (Arns et al., 2009) e nel potenziare la prestazione in soggetti sani (Rogala et al., 2016). Tuttavia, come sarà discusso esaustivamente nella prossima sezione "Limiti e Direzioni Future", è richiesta cautela nell'interpretazione di questi risultati a causa dei limiti metodologici appartenenti agli studi esaminati.

## **Limitazioni e direzioni future**

In questa sezione verranno descritte le limitazioni che riguardano sia il livello della revisione stessa sia il livello degli articoli in essa inclusi. Una prima limitazione riguarda entrambi questi aspetti ed è sicuramente legata alla selezione degli studi e alla loro conseguente valutazione qualitativa. Al fine di fornire una descrizione più esaustiva dello stato dell'arte della ricerca sull'uso del neurofeedback in psicologia dello sport tra il 2016 e il 2023, sono stati inclusi in questa revisione sia studi randomizzati che non randomizzati, ma molti di essi presentavano un rischio di bias medio-alto, introducendo così un maggiore rischio di distorsione dei risultati. Per quanto riguarda gli studi controllati randomizzati, la maggior parte non ha fornito informazioni sul processo di randomizzazione con cui i partecipanti sono stati assegnati a ciascun gruppo, quindi non possiamo sapere se i campioni studiati fossero rappresentativi della popolazione (bias di selezione). Un altro bias presente nella maggior parte degli studi è il bias di rilevazione, dovuto alla mancanza di cecità dei valutatori dell'esito rispetto all'intervento fornito, che potrebbe quindi aver influenzato la valutazione dei risultati dello studio. Infine, un'ulteriore criticità riscontrata in poco meno della metà degli studi riguarda la comparabilità dei gruppi al basale, a causa della mancanza (o della scarsità) di informazioni sui criteri di inclusione dei partecipanti. Passando alle specifiche degli studi non randomizzati, ancora una volta il bias di selezione è il bias più presente (nessuno degli studi considerati soddisfaceva questo criterio di valutazione) e la seconda criticità osservata riguarda la mancata considerazione di possibili confondenti che avrebbero potuto influenzare i risultati, menzionata in circa la metà degli studi. Questi bias rappresentano un'importante fonte di distorsione dei risultati, per cui i lettori di questa revisione dovrebbero essere cauti nell'interpretazione. Gli studi futuri dovrebbero cercare, per quanto possibile, di randomizzare i partecipanti in gruppi sperimentali e di controllo e di fornire una chiara descrizione del metodo di randomizzazione utilizzato (riducendo così il rischio di bias di selezione), di adottare un disegno in doppio cieco, in modo da ridurre il rischio di bias di rilevamento, e di identificare criteri chiari per l'inclusione dei partecipanti, al fine di ottenere gruppi comparabili. Queste misure dovrebbero essere adottate per aumentare l'affidabilità, la riproducibilità e la validità dei risultati, per ridurre il rischio di bias e per migliorare la solidità delle prove sull'effetto degli allenamenti di neurofeedback nel campo della psicologia dello sport. Un secondo limite della revisione stessa

riguarda la mancanza di registrazione del protocollo, raccomandata da diverse linee guida per aumentare la trasparenza e la riproducibilità di una revisione sistematica. Per ridurre i potenziali bias, si è cercato di essere il più chiari possibile sulle decisioni prese e sulla metodologia utilizzata. Una terza limitazione potrebbe essere legata alla strategia di ricerca, poiché in questa revisione sono stati inclusi solo studi empirici originali, tralasciando altre forme di pubblicazione (come la letteratura grigia) che avrebbero potuto fornire ulteriore materiale per la revisione. Infine, una quarta limitazione potrebbe essere la presenza di un bias di pubblicazione, ovvero una preferenza editoriale per la pubblicazione di risultati positivi, che porta gli autori a non presentare studi con risultati negativi (Thornton & Lee, 2000; Scheel et al., 2021), dal momento che solo uno studio è stato trovato con risultati negativi. La presenza di ricerche non pubblicate avrebbe potuto ovviamente portare a risultati diversi se fossero state incluse in questa revisione, ma poiché non sono state utilizzate misure meta-analitiche in questa revisione, questo non è noto. Per quanto riguarda le limitazioni degli studi inclusi in questa revisione, la seconda riguarda la dimensione dei campioni impiegati, costituiti da pochi soggetti ciascuno a causa della difficoltà di reclutare ed eseguire disegni controllati con gli atleti, soprattutto quelli d'élite. Una terza limitazione riguarda il basso numero di ricerche che includono le donne, in quanto solo 8 studi hanno reclutato un campione femminile e altri 6 studi non hanno fornito informazioni sul sesso dei partecipanti. Le ricerche future dovrebbero approfondire questo aspetto, considerando la rilevanza e la crescita del movimento sportivo femminile. La quarta limitazione riscontrata riguarda la mancanza di un gruppo di controllo in alcuni studi (che rende impossibile determinare la relazione causa-effetto tra intervento e risultato osservato) e il coinvolgimento di un gruppo di controllo passivo in altri, che potrebbe portare al verificarsi di un effetto placebo. I gruppi di controllo passivi non sono sottoposti a training di neurofeedback, quindi gli effetti osservati potrebbero non essere dovuti a una specificità del training nelle bande di frequenza EEG oggetto di studio. Le ricerche future dovrebbero includere un gruppo di controllo attivo per minimizzare questo problema e conferire maggiore solidità ai risultati. Un'ulteriore limitazione riguarda il contesto sperimentale: la maggior parte degli studi considerati ha raccolto i dati sulle prestazioni degli atleti all'interno del laboratorio di ricerca, mentre solo due studi hanno condotto la ricerca anche sul campo (utilizzando il Wingate 5-Step Approach; Boris & Iris, 2014). Per avere una maggiore affidabilità e validità ecologica dei risultati, gli studi futuri dovrebbero adattare i loro protocolli

sperimentali alle condizioni del campo (allenamenti e gare), confrontando i risultati ottenuti in questo modo con quelli ottenuti in laboratorio ed evidenziando le eventuali differenze, in modo da poter determinare se e in che misura i risultati sono distorti dall'ambiente di laboratorio e quanto questo influisce sul risultato della ricerca. Il sesto limite di alcuni degli studi esaminati riguarda la mancanza di informazioni sulle discipline sportive valutate e sul livello di abilità dei partecipanti, che rende difficile fornire una sintesi generalizzabile dei risultati. Le ricerche future dovrebbero quindi essere più attente a fornire questo tipo di informazioni per rendere i risultati trasparenti e riproducibili. Allo stesso modo, è necessario condurre ulteriori ricerche su abilità aperte come la pallavolo e la pallacanestro, al fine di fornire una comprensione più completa dell'efficacia del neurofeedback nello sport. Infine, la maggior parte degli studi ha analizzato gli effetti a breve termine dell'allenamento con neurofeedback, ossia le prestazioni sono state misurate subito dopo o entro pochi giorni dall'applicazione dell'intervento. Questo ovviamente non consente di stabilire se gli effetti dell'intervento rimangono stabili anche a medio e lungo termine, motivo per cui i ricercatori dovrebbero includere nei loro progetti misure di follow-up negli studi futuri.

## **4.2 Gli interventi di Neurofeedback negli sport di tiro a segno**

### **Introduzione**

Negli sport di tiro a segno sono richieste costantemente qualità mentali che incidono sul controllo attentivo e sugli stati emotivi, soprattutto nelle fasi che precedono il tiro verso un bersaglio (Wang et al., 2022). Si è visto come un adeguato controllo emotivo condotto dall'atleta insieme ad un'elevata efficienza mentale possa migliorare la prestazione nel tiro a bersaglio (Mikicic et al 2018).

Il tiro con l'arco come il tiro a segno sono sport dove gli aspetti psicologici agiscono in modo ponderale sulla prestazione tanto da essere indicati come sport mentali. Per questo motivo richiedono un costante e adeguato allenamento psicofisiologico (Kim et al., 2021).

Taha e collaboratori hanno condotto uno studio in cui hanno cercato di definire le abilità mentali degli arcieri, stabilendo che un buon arciere deve mostrare un'adeguata concentrazione

mentale, gestire in modo ottimale stress e ansia e saper controllare gli stati emotivi interni (Taha et al., 2018).

La mancanza di un pieno controllo emotivo e mentale può portare a stati di blocco mentale, causati da veri e propri attacchi di panico sulla conduzione tecnica del tiro (Diotaiuti et al.2021; Nien et al 2023).

La psicologia sperimentale cerca di indagare, studiare e modificare questi fenomeni con tecniche innovative che prevedono l'utilizzo di dispositivi e programmi con tracciati di monitoraggio (EEG) (Kieffaber, & Dickter, 2013). Per potenziare le abilità mentali, fa uso da anni del Neurofeedback (Gruzelier 2014), una tecnica innovativa e molto utilizzata dai ricercatori, con il compito di potenziare/migliorare la prestazione e la condizione mentale di un atleta (Xiang et al 2018). Il Neurofeedback agisce mediante una retroazione biologica che va a coinvolgere determinate bande di frequenza EEG che, potenziate e/o inibite, vanno a cambiare il modello neurale dei partecipanti sottoposti a un vero proprio training (Watanabe et al., 2017).

La procedura di Neurofeedback training (NFT) avviene posizionando una coppia di elettrodi sul cuoio capelluto, che ha la funzione di rilevare il segnale EEG proveniente dalle diverse aree corticali (Dessy et al., 2020). Tramite un condizionamento operante condotto dal soggetto stesso il segnale viene manipolato da un feedback audio-visivo istantaneo, influenzando e modificando le bande di frequenza delle onde cerebrali nelle aree di interesse (Davelaar 2018).

È stato dimostrato che la potenza di diverse bande di frequenza (delta, theta, alpha, beta e gamma) è correlata a specifici processi cognitivi (Egner, 2004). Pertanto, le oscillazioni corticali possono essere utilizzate per comprendere il coinvolgimento della corteccia cerebrale durante l'esecuzione di diversi compiti (Mierau et al 2015). All'inizio i cambiamenti sono di breve durata, ma gradualmente diventano più duraturi ed è stato dimostrato che con un feedback continuo è possibile riqualificare i modelli di onda cerebrale andando a migliorare la flessibilità e il controllo cognitivo (Alatorre-Cruz et al., 2022).

### **Il neurofeedback nella performance sportiva**

La buona riuscita di una prestazione sportiva è strettamente legata alla riduzione dello stato d'ansia e dei tempi di reazione (Mirifar et al., 2017) e alla massimizzazione delle prestazioni



cognitive (Liu et al., 2017), per cui diversi ricercatori si sono interessati all'utilizzo del NFT per indagare se e come questo strumento possa influenzare questi aspetti della performance (Perrey, S. 2023). Ad esempio, Shokri e Nosratabadi (2021) hanno mostrato che 3 sessioni di training a settimana per 8 settimane (con l'obiettivo di rinforzare la banda di frequenza alpha e il ritmo sensomotorio e inibire le bande theta e beta conducevano ad un miglioramento della prestazione (lancio libero, test del lay-up, test del chest passing e test del dribbling) in un campione di giocatori di basket principianti. Gli effetti positivi del NFT sono stati mostrati anche in campioni di atleti professionisti. Ad esempio, Rijken et al. (2016) hanno sottoposto atleti professionisti di atletica leggera a 20 sessioni di neurofeedback e hanno osservato che l'aumento del ritmo alpha aveva come conseguenza una riduzione dello stress, come mostrato attraverso il Recovery-Stress Questionnaire. Nel 2017, Hosseini e Norouzi hanno confrontato un gruppo di pallavolisti di élite con uno di pallavolisti non di élite e hanno mostrato come l'aumento del ritmo sensomotorio (SMR) e la contemporanea inibizione della banda di frequenza alpha determinavano un miglioramento del servizio in entrambi i gruppi, sebbene l'incremento della prestazione fosse maggiore nel gruppo di élite. Infine, Domingos et al. (2020) hanno comparato un gruppo di atleti e uno di non atleti e hanno osservato che, sebbene l'NFT aumenti l'ampiezza relativa della banda alpha in entrambi i gruppi, soltanto il primo gruppo è riuscito a migliorare la prestazione in termini di tempi di reazione nell'Oddball task. Questo test presenta al partecipante una sequenza di stimoli audio o visivi ripetitivi, raramente interrotti da uno stimolo inaspettato (Squires et al, 1975). È stato dimostrato che questa interruzione da parte di uno stimolo target suscita eventi elettrici specifici registrabili sul cuoio capelluto noti come potenziali correlati agli eventi (ERP). L'allenamento della banda alpha nell'emisfero destro della corteccia sensoriale può indurre uno stato di rilassamento. Domingos nel 2021 ha notato che l'allenamento alpha può migliorare la variabilità della frequenza cardiaca negli atleti che hanno ricevuto NFT per quattro settimane consecutive (Domingos et al., 2021). In ambito sportivo i metodi di intervento con il Neurofeedback sono stati principalmente finalizzati su come ottenere performance migliori (Vernon et al., 2005; Levy & Baldwin 2019). Gli studi più importanti hanno indagato aspetti che coinvolgono la concentrazione, intesa come saper riconoscere quando si è fuori compito, cercando di raggruppare eventuali pensieri/sentimenti che evitano di interrompere l'attenzione. Una maggiore concentrazione produce tempi di reazione più rapidi. Per questo motivo Bandmeyer

e Delorme nel 2020 hanno usato il Neurofeedback per aumentare la potenza theta nell'area frontale, con lo scopo di allenare la meditazione in compiti attentivi e ottenere tempi di reazione rapidi (Brandmeyer et al., 2020).

In linea con questa ricerca, Maszczyk e colleghi nel 2020 hanno osservato un miglioramento nei tempi di reazione nel judo grazie a un protocollo NFT attraverso il quale sono riusciti a mantenere un equilibrio ottimale tra l'attività delle onde veloci (beta) e quella delle onde lente (theta), risultate associate alla concentrazione (Maszczyk et al., 2020). Harvey e colleghi hanno introdotto questa tecnica come parte integrante in un programma di allenamento per una squadra nazionale canadese di pattinaggio in partenza per i giochi olimpici, i risultati hanno mostrato un miglioramento nei tempi di reazione (Harvey et al 2011).

Un altro costrutto psicologico importante nello sport è sicuramente l'attenzione sostenuta, cioè la capacità di concentrarsi su un'azione per periodo di tempo prolungato (Fortenbaugh et al., 2017) e associata al controllo top/down dell'attività theta. Un NFT specifico per questa funzione mostra correlati positivi sul controllo di azioni complesse, come il putting nel golf (Milton et al., 2007; Chen et al., 2022).

Un ulteriore ambito associato al miglioramento della performance sportiva vede l'utilizzo del Neurofeedback nella gestione dello stress e dell'ansia. Atleti e allenatori sostengono che un NFT possa garantire un'efficace gestione dello stress, attraverso l'autoconsapevolezza e l'autoregolazione, ottenendo prestazioni migliori (Dupee et al 2011).

Prestazioni negative possono derivare da troppa eccitazione e dall'ansia di stato che, oltre a generare un'evidente scoordinazione causata dall'aumento della tensione muscolare, porta a maggiori effetti distraenti e a pensieri irrilevanti. Vi sono tuttavia numerose evidenze empiriche che confermano l'efficacia dell'intervento di Neurofeedback sull'onda alpha, con il quale migliora non soltanto la qualità dello stato emotivo, ma anche il livello di stress e di ansia percepita, nonché le prestazioni di funzioni cognitive come la memoria di lavoro (Marzbani et al., 2016).

### **La componente mentale negli sport di tiro**

Gli sport di tiro sono caratterizzati da movimenti fini e da una serie di azioni standardizzate e ripetute che richiedono una postura stabile, insieme a un'adeguata coordinazione e

concentrazione e a delle buone qualità psicologiche (Sarro et al., 2021). Un esempio è dato dal tiro con l'arco dove una mente lucida, insieme a un alto livello di attenzione visiva, permette all'atleta di rimanere focalizzato senza che rumori esterni e distrazioni mentali interne interferiscano con le prestazioni (Lee, 2009). È stato visto come per gli arcieri professionisti solo il 20% delle loro prestazioni è determinato da fattori biomeccanici, mentre il restante 80% è attribuito esclusivamente a fattori psicologici (Zhou et al 2010). Per questo motivo è cresciuto nel tempo il desiderio di studiare questi aspetti.

Kim nel 2014 ha condotto uno studio in cui ha evidenziato l'attività cerebrale degli arcieri d'élite, confrontandola con quella di esperti e novizi. Durante l'attività di tiro con l'arco simulato ha individuato i correlati neurali delle prestazioni di mira osservandone le differenze in base ai livelli di abilità degli arcieri. I risultati hanno evidenziato che arcieri d'élite hanno mostrato più attività nell'area motoria supplementare e nel cervelletto rispetto agli esperti e ai novizi e un'attività diffusa, ma minima, nelle aree frontali coinvolte nel controllo esecutivo, portando all'ipotesi che processi neurali specializzati possano aiutare la pianificazione e il controllo motorio. (Kim et al 2014).

Man mano che le abilità migliorano nel tempo, alcuni processi mediano la riduzione dell'attività elettrica nelle regioni cerebrali del controllo esecutivo, causando uno slittamento verso processi di elaborazione automatizzati (Callan & Naito 2014).

Di recente alcuni autori hanno indagato le differenze nei meccanismi neurali e cerebrali degli arcieri esperti e d'élite in merito al comportamento motorio, cercando di individuare una possibile relazione interna tra prestazioni motorie e attività cerebrale. Gli autori hanno raccolto e analizzato i risultati dell'elettroencefalografia (EEG) di 14 arcieri nazionali e 14 arcieri provinciali durante le fasi di mira e di riposo. I risultati hanno mostrato che gli arcieri d'élite avevano un accoppiamento funzionale più forte nelle bande beta1 e beta2 rispetto agli arcieri esperti nelle regioni frontali e centrali, evidenziando una maggiore capacità cerebrale sul controllo dettagliato del movimento (Gu et al., 2022).

### **Neurofeedback e sport di tiro.**

Le teorie espresse in precedenza aprono la strada alle tecniche di neuromodulazione per migliorare le capacità specifiche dei tiratori (Gong et al., 2021). Uno dei primi studi ad aver

utilizzato il Neurofeedback nel tiro con l'arco è stato condotto da Landers nei primi anni '90. Lo studio era finalizzato a determinare se un training di biofeedback EEG potesse migliorare la prestazione sportiva valutando aspetti di concentrazione e fiducia. Il campione, composto da 24 arcieri, è stato assegnato in modo casuale a 3 gruppi di trattamento: un primo gruppo con feedback corretto associato a maggiore attività a bassa frequenza nell'emisfero sinistro, un secondo gruppo con feedback errato associato a maggiore attività a bassa frequenza dell'emisfero destro e un terzo gruppo con nessun feedback. I gruppi sono stati sottoposti a pre-test e post-test su 27 prove di tiro. I dati EEG dello studio sono stati raccolti dalle posizioni T3 (emisfero sinistro) e T4 (emisfero destro). Le analisi hanno mostrato significatività solo per la prestazione sportiva, ma non per gli aspetti legati a concentrazione e fiducia. Il gruppo con feedback corretto ha migliorato significativamente le prestazioni rispetto al gruppo con feedback errato, il quale ha mostrato invece un calo significativo delle prestazioni di tiro, mentre per quanto riguarda il gruppo di controllo non sono state evidenziate differenze significative nelle prestazioni prima e dopo il test. Questo studio ha fornito il primo e concreto risultato sull'uso del feedback EEG come mezzo efficace per fornire miglioramenti prestativi negli arcieri per-élite (Landers et al., 1991). Più tardi, sempre Landers (1994) ha messo in evidenza gli effetti dell'apprendimento con i modelli elettroencefalografici ed elettrocardiografici degli arcieri che si avvicinavano per la prima volta a questo sport con lo scopo di verificare l'asimmetria emisferica cerebrale e la decelerazione della frequenza cardiaca sull'apprendimento del compito. Al termine della 14 settimana di attività, gli arcieri avevano migliorato le loro prestazioni del 62%, mostrando decelerazioni significative della frequenza cardiaca e asimmetrie EEG tra i tiri migliori e peggiori a 12 Hz nell'emisfero sinistro e 4 Hz nell'emisfero destro (Landers et al., 1994).

Precedenti ricerche hanno indagato l'asimmetria emisferica e la risposta fisiologica cardiaca nelle prestazioni degli arcieri d'élite per confrontare se eventuali variazioni della frequenza cardiaca e asimmetrie emisferiche si sarebbero verificate durante le fasi di mira. Dai risultati è emerso che non vi era nessuna decelerazione della frequenza cardiaca durante la mira e la banda alpha risultava significativamente maggiore nell'emisfero sinistro rispetto al destro. Inoltre, non sono stati evidenziati cambiamenti EEG significativi nell'emisfero destro prima del lancio e al rilascio della freccia. (Salazar et al., 1990).

Successivamente studi simili sono stati condotti anche su tiratori esperti con la pistola ad aria compressa riscontrando una potenza alpha significativamente maggiore a sinistra rispetto al sito antero-temporale destro dopo un confronto di qualità dei colpi (Loze et al., 2001).

Lo studio pionieristico di Landers sul tiro con l'arco ha presentato alcune evidenze empiriche interessanti. Tuttavia, nonostante gli anni trascorsi, ancora poco finora è stato fatto per chiarire il ruolo del Neurofeedback nel miglioramento delle capacità prestantive nel tiro.

Chang e colleghi nel 2020 hanno condotto una revisione per capire il ruolo dell'attività corticale nelle prestazioni di ordine superiore in compiti sportivi di precisione. Tra le componenti elettroencefalografiche esaminate, solo il ritmo sensomotorio ha dimostrato una relazione coerente e causale con prestazioni motorie di precisione superiore, mentre i risultati relativi all'alpha temporale sinistro e ai ritmi theta e alpha frontali non sono risultati coerenti. (Chang & Hung, 2020). Uno studio precedente alle teorie di Chang ha effettivamente evidenziato che una maggiore potenza del ritmo sensomotorio è associata a migliori prestazioni nei tiratori esperti.

Il miglioramento delle prestazioni di tiro di 24 tiratori è stato associato a una maggiore potenza SMR e a una minore potenza alpha nel sito Fz-T3 prima dell'inizio di un'azione di tiro (Cheng et al., 2017). Recentemente un'indagine simile è stata condotta in due gruppi di tiratori (gruppo esperto e gruppo composto da atleti meno esperti). Il gruppo esperto ha mostrato una maggiore accuratezza e precisione e una riduzione dei movimenti posturali durante la mira. Le misurazioni EEG hanno rivelato che il gruppo esperto mostrava un ritmo SMR più elevato prima del colpo rispetto all'altro gruppo, dimostrando una coerenza Fz-T3 ridotta nei tiri condotti al centro del bersaglio rispetto ai tiri mancati. I ricercatori suggeriscono che i tiratori esperti hanno un atteggiamento meno faticoso nelle fasi che precedono il compito e una minore interferenza delle regioni corticali non essenziali rispetto ai tiratori meno esperti (Cheng et al., 2023).

È ragionevole pensare che ai tiratori sia richiesto di concentrarsi sulla precisione durante le gare e questa ricerca della precisione tende ad essere raggiunta da un ritmo motorio sensoriale di picco. Per questa ragione gli studi che hanno utilizzato il Neurofeedback negli sport di tiro hanno continuato seguendo questa linea. Nel 2012 Paul ha condotto uno studio su un gruppo sperimentale di 28 arcieri universitari, i quali sono stati chiamati a sostenere un protocollo NFT deputato ad amplificare il ritmo SMR e inibire il ritmo theta per quattro settimane. Dopo dodici

sessioni di allenamento gli arcieri del gruppo sperimentale sono stati in grado di regolare lo stato psicologico e le componenti EEG durante le prestazioni di tiro con l'arco, dimostrando che un NFT deputato a ridurre theta migliora la regolarità dei punteggi e la precisione (Paul et al 2012).

Effetti analoghi sono emersi nei tiratori esperti con la pistola ad aria compressa grazie a un intervento di Bio/Neurofeedback con compiti visi e uditivi. Gli autori sono giunti alla conclusione che una diminuzione dell'onda theta e della frequenza cardiaca conduce a miglioramenti nell'attenzione e nella concentrazione. Inoltre, con un potenziamento delle onde nelle regioni frontali e nel giro cingolato anteriore si possono ridurre gli effetti che causano momenti distraenti (Kakhaki & Taheri, 2017).

La pratica dell'imaging, nota anche come visualizzazione, può migliorare la fiducia, la motivazione, l'apprendimento delle abilità e il controllo negli atleti di tiro con l'arco (Chang et al 2011).

Il flusso immaginario può aiutare gli atleti di tiro a fissare obiettivi tecnici che sono necessari per una crescita ulteriore. Questa tecnica, viene spesso utilizzata dall'arciere per familiarizzare le movenze da apprendere (Debnath & Debnath 2016). Questi stati sono associati ad un'alta attività di theta nelle aree frontali e a una ridotta attività di alpha nelle aree frontali e centrali (Katahira et al., 2018). Salehi nel 2019 ha potuto constatare che per l'allenamento fisico sono validi sia interventi di Neurofeedback che di immaginazione motoria. Lo studio è stato condotto con 32 tiratrici di freccette, l'intero gruppo è stato randomizzato in 3 gruppi di intervento: 1) intervento NFT con protocollo deputato a potenziare i ritmi Theta e i ritmi sensomotori (SMR); 2) Imaging motoria, tramite un'immaginazione interna (in prima persona), in cui le partecipanti dovevano immaginare di lanciare le freccette; 3) intervento fisico, in cui le partecipanti si esercitavano fisicamente al lancio delle freccette.

Le misurazioni dei 3 gruppi sono state registrate prima e dopo l'intervento sperimentale e confrontati con un gruppo di controllo. Le risultanze hanno evidenziato che tutti e tre gli interventi hanno aumentato significativamente le prestazioni nel lancio delle freccette rispetto al gruppo di controllo, dimostrando che oltre alla pratica fisica sia l'immaginazione motoria sia il Neurofeedback sono risultati efficaci per migliorare le prestazioni in compiti di visualizzazione fine (Salehi et al.2019).

## **Conclusioni**

La seguente revisione va a confermare l'importanza della neuromodulazione indotta anche in contesti sportivi, con particolare attenzione agli sport di mira.

Cresce sempre di più l'attenzione e la cura dei particolari prestativi negli Atleti di tiro. La conferma è data dalla comunità scientifica che ha consolidato da tempo le basi teoriche e pratiche su aspetti fisici e mentali, grazie a training mirati alla crescita degli atleti meno esperti.

Studiare nel dettaglio come si comporta un atleta esperto dal punto di vista mentale, ha permesso ai ricercatori di capire quale direzione seguire per poter intervenire sul miglioramento delle abilità mentali.

La ricerca sui processi di Neuromodulazione ha trovato campo fertile sul miglioramento di queste qualità e si identifica come un supporto efficace da adottare nelle fasi di crescita dell'atleta.

La logica di questo processo è rivolta a incrementare la performance, la quale si basa sull'identificazione di attività corticali e specifici stati o aspetti comportamentali ritenuti ottimali.

In letteratura è stato dimostrato più volte che un training di Neuromodulazione strutturato in microcicli di intervento con una durata variabile, può indurre cambiamenti momentanei o permanenti sul tracciato elettroencefalografico, con conseguente miglioramento di aspetti di natura intellettuale, cognitiva, emotiva e fisica, la combinazione dinamica di questi fattori gioca un ruolo concreto sul miglioramento della performance e delle abilità richieste.

La ricerca è iniziata con questi presupposti 30 anni fa con il contributo di Landers il quale, non a caso, ha proposto un intervento con gli arcieri utilizzando aspetti di Neurofeedback/Biofeedback.

Negli ultimi anni sono stati fatti passi in avanti con risultanze che hanno visto un concreto ed efficace miglioramento delle capacità prestativa, curando perlopiù aspetti fisiologici (Pusenjak et al., 2015). Per questo motivo molti studi si sono concentrati sulla modulazione fisiologica riscontrando associazioni positive tra le variabili fisiologiche e gli aspetti mentali e di performance dei tiratori (Guru et al 2020 ;Maleki Nezamabad et al., 2022;Göçmen et al., 2023).

per quanto riguarda la Neuromodulazione pochi sono gli studi presentati e messi a confronto.

In merito a questo, i risultati hanno mostrato rilevanti incongruenze a causa dei limiti riguardanti il campione, la metodologia di intervento e la disciplina sportiva (Rydzik, et al., 2023).

Per questa ragione riteniamo che la ricerca deve evolversi differenziandosi con protocolli integrati sia di Neurofeedback che di Biofeedback (Cheng et al., 2020).

Un approccio integrato permetterebbe di completare il quadro di intervento, facendo chiarezza sui dubbi irrisolti e avviando la procedura a nuovi training. Per questo approccio la ricerca ha trovato spunti interessanti sul gesto tecnico del tiro mostrando risultati più che soddisfacenti (Wilson et al., 2006; Christie et al., 2020) l'idea è quella di replicare questo approccio in maniera sistematica anche negli sport di tiro a segno.



## **Capitolo quinto**

### **Studio sperimentale**

# **Training di Neurofeedback per il miglioramento della memoria di lavoro e per la riduzione dell'ansia in un campione di studenti universitari**

## **Introduzione**

Il Neurofeedback (o EEG-Biofeedback) è una tecnica psicofisiologica non invasiva basata sul principio del condizionamento operante (Alatorre-Cruz et al., 2022). Questa tecnica utilizza i cambiamenti nell'attività elettrica cerebrale per aiutare i soggetti a regolare l'attività o la potenza di determinate bande di frequenza EEG attraverso l'accesso in tempo reale alle informazioni relative alla loro attività elettrica cerebrale (Hammond, D.C., 2011). Si tratta quindi di un vero e proprio allenamento neuro-cognitivo mediante il quale l'individuo, grazie al feedback che viene fornito immediatamente in forma visiva/grafica e/o uditiva, impara a controllare, regolare e modificare volontariamente la propria attività elettrica cerebrale e a correggere le alterazioni EEG e gli stati patologici ad esse associati (Marzani et al., 2016). Generalmente, l'attività del cervello può essere misurata utilizzando diversi segnali che possono fungere da feedback, come il flusso sanguigno, il consumo di ossigeno e l'attività elettrica (Fleury et al., 2023). Quest'ultima, attraverso l'uso dell'EEG, costituisce la più comune e utilizzata forma di Neurofeedback (Dessy et al., 2020).

L'EEG viene registrato dalla superficie dello scalpo e, quando i neuroni piramidali si attivano, esso capta le correnti ioniche nella corteccia cerebrale dovute all'eccitazione sinaptica dei dendriti di questi neuroni. Il tracciato EEG è il risultato dell'alternanza tra i potenziali postsinaptici eccitatori e inibitori in queste sinapsi e mostra attività spontanee che variano in frequenza. Classicamente, queste frequenze sono suddivise in 5 bande, ognuna con un proprio range, e corrispondenti a diversi stati cerebrali (Soufneyestani et al., 2020).

L'obiettivo del Neurofeedback è quindi quello di insegnare ai soggetti a regolare la loro attività cerebrale all'interno di una determinata banda di frequenza per potenziare il comportamento o lo stato mentale associato (Hammond, D. C.2007). Storicamente, dalla sua nascita negli anni '60, il Neurofeedback è stato utilizzato in diversi ambiti e per diversi scopi: ad esempio, come alternativa al trattamento farmacologico in soggetti che soffrivano di mal di testa, nausea e crisi epilettiche e come aiuto nei bambini affetti da ADHD, che presentavano un pattern sbilanciato delle onde cerebrali (Walker, J. E., 2011; Niv, s., 2013; Turner et al., 2023; Louthrenoo et al., 2022).

A causa dei suoi effetti positivi nella pratica clinica, c'è stato un crescente interesse nella ricerca per verificare se il training di Neurofeedback (NFT) potesse influenzare positivamente anche le capacità cognitive di individui sani (Da Silva & De Souza 2021). Alcuni studi sembrano supportare questa ipotesi (Matsuzaki et al., 2023). Secondo Klimesch (1999), la banda alpha superiore individuale è di grande importanza per le prestazioni cognitive.

Sulla base di diversi studi alcuni ricercatori hanno esaminato la connessione tra l'ampiezza individuale dell'onda alpha (IUA), l'ansia e le prestazioni cognitive (Moradi et al.,2011; Chen & Sui, 2023). In questi studi, diversi aspetti prestativi di memoria a breve termine e memoria di lavoro sono stati valutati con test specifici come il digit span, l'N-back e l'Oddball task (Domingos et al., 2021) e il mental rotation task (Hanslmayr et al., 2005), la flessibilità mentale e le funzioni esecutive sono state indagate tramite il trail Making test (Viviani & Vallesi, 2021) e lo stato d'ansia attraverso questionari come lo STAI (State-Trait Anxiety Inventory; Renzi, D.1985). In tutti questi studi sono emersi risultati incoraggianti sull'efficacia del neurofeedback per il miglioramento delle funzioni cognitive ed emotive.

### **Obiettivi dello studio**

Lo studio proposto si è occupato di testare un protocollo di NFT tramite l'utilizzo del caschetto Emotiv Epoc X a 14 canali (Emotiv, San Francisco, USA; TajDini et al., 2020) e del software Brainviz associato (<https://www.emotiv.com/epoc/>) con un campione di 40 studenti sani randomizzati in due gruppi (uno sperimentale e uno di controllo).

Lo scopo era quello di osservare se in seguito al training di Neurofeedback vi fosse un potenziamento della banda di frequenza alpha correlato ad un miglioramento delle funzioni di memoria di lavoro e alla riduzione dell'ansia, come sostenuto in diversi recenti studi (Naas et

al., 2019; Wang J.R. & Hsieh, 2013; Nawaz et al., 2023; Tolin et al., 2020; Hou et al., 2021; Russo et al., 2022).

### **Campione**

Per verificare le ipotesi di questo studio, è stata eseguita un'analisi statistica della potenza per stimare la dimensione del campione. L'effect size (ES) è stato fissato a 0,30, considerato medio, secondo i criteri di Cohen. Utilizzando il software G\*Power 3.1 (Heinrich Heine Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Germania), tenendo conto della dimensione dell'effetto e di ciò che è considerato appropriato per eseguire un confronto intergruppi tenendo conto del Gruppo (sperimentale e di controllo) e del Tempo (pre-post), il numero minimo di partecipanti è stato fissato in via preliminare a 26. Il reclutamento è stato effettuato inoltrando una richiesta di partecipazione su base volontaria agli studenti dell'Università di Cassino, utilizzando i canali informativi dell'ufficio tirocini interno, attraverso i quali è possibile partecipare alla ricerca scientifica. Il reclutamento ha seguito i seguenti criteri di inclusione: non avere patologie specifiche, non essere sottoposti ad alcun trattamento farmacologico e non avere problematiche legate alla vista. Hanno aderito allo studio complessivamente 40 studenti, di età compresa tra i 19 e i 26 anni e bilanciati per genere, dunque in numero superiore a quello minimo indicato dal calcolo effettuato con G\*Power. Tutti i partecipanti sono stati informati sulle condizioni di partecipazione, sugli obiettivi dello studio e sui metodi di intervento, in conformità con la Dichiarazione di Helsinki. È stato garantito l'anonimato e che i dati fossero raccolti esclusivamente per scopi scientifici. Il consenso informato è stato distribuito e raccolto prima dell'inizio delle attività. I partecipanti sono stati informati del loro diritto di ritirare il proprio consenso a partecipare in qualsiasi momento senza alcuna conseguenza e inoltre di potere essere informati sugli esiti generali e sui risultati dello studio.

### **Dichiarazione etica**

Il protocollo dello studio è stato esaminato e approvato dal Comitato Etico dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale con prot. n°0015534. I partecipanti hanno fornito il loro consenso informato per iscritto a partecipare a questo studio.

## Materiali e metodi

### Strumenti

1) Per gli interventi di NFT sono stati utilizzati:

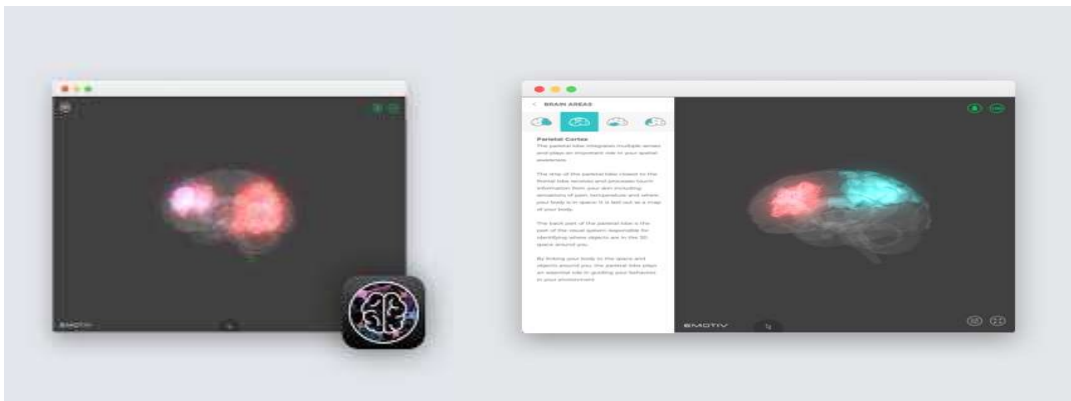
A) Dispositivo EMOTIV EPOC X (<https://www.emotiv.com/epoc/>). Questo strumento risulta essere non invasivo in quanto non emette nessun segnale nocivo per la salute, ma grazie all'utilizzo di sensori salini passivi riesce a rilevare sulla superficie dello scalpo il segnale EEG. Il dispositivo è di facile utilizzo e non ha finora mostrato effetti nocivi per la salute delle persone, come supportato da recenti studi, mostrando una buona qualità di registrazione del segnale elettroencefalografico (Eroğlu et al., 2018; Zabcikova et al., 2019; Williams et al., 2020; Alaros et al., 2021). Il dispositivo è conforme ai requisiti della Direttiva sulla Bassa Tensione 2006/95/CE, della Direttiva EMC 2004/108/CE, della Direttiva R&TTE 1999/5/CE ed ha i marchi di conformità CE e C-Tick (<https://www.emotiv.com/knowledge-base/are-emotiv-products-medical-devices/>). L'Emotiv Epoc X (Figura 1) raccoglie il segnale EEG da 14 canali diversi (AF3, AF4, F7, F3, F4, F8, FC5, FC6, T7, T8, P7, P8, O1 e O2) sulla superficie del cuoio capelluto. Il dispositivo è wireless e trasmette i dati via Bluetooth attraverso una banda di 2,4 Ghz con una frequenza di campionamento di 128 bit al secondo e una larghezza di banda che va da 0 a 64 Hz. Il software Emotiv Pro Lab, associato al dispositivo, consente l'elaborazione e la codifica del segnale EEG in uscita. Questo strumento non è invasivo, come dimostrato anche da studi recenti (Eroğlu et al., 2018; Zabcikova et al., 2019; Williams et al., 2020; Alaros et al., 2021).

Figura 1



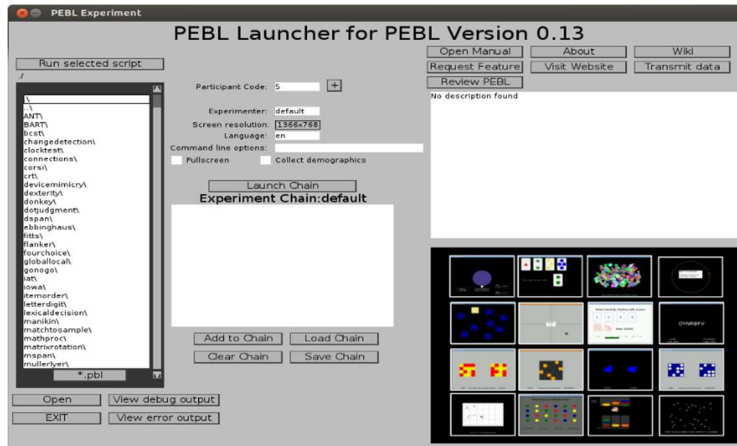
B) Il software Emotiv Brain Viz (Figura 2). Il software è stato utilizzato per ottenere un feedback visivo per il partecipante. Esso fornisce una visualizzazione 3D in tempo reale dell'attività elettrica registrata dal dispositivo Epoc x. Nella visualizzazione, le 4 bande di frequenza (theta, alpha, beta, gamma) sono codificate a colori, rendendo possibile la visualizzazione della loro localizzazione sulla superficie dello scalpo in tempo reale. Questa visualizzazione permette quindi di vedere sia le proprietà spaziali (le aree in cui avviene l'attività cerebrale) sia le proprietà temporali (il tipo di attività) allo stesso tempo (Blanco-Mazagatos et al., 2020).

Figura 2



2) Per quanto riguarda i test cognitivi, le valutazioni sono state effettuate tramite somministrazione informatica attraverso la piattaforma PEBL (The PEBL Project, 2019. PEBL. Retrieved from <https://pebl.sourceforge.net>) (Figura 3). La Piattaforma di riferimento è un sito di raccolta di vari test psicometrici progettati per essere facilmente utilizzati su più sistemi operativi (Mueller & Piper 2014). La versione corrente della piattaforma è progettata per funzionare con PEBL versione 0.13 ed è stata rilasciata nel 2012. È distribuita con PEBL 0.13 e viene installata automaticamente in Documenti\pebl.0.13\batteria su Windows.

Figura 3



I test utilizzati per la valutazione sono stati i seguenti:

A) Il Memory span, un semplice test per valutare la memoria a breve termine che consiste in 9 stimoli (parole e immagini) presentati a rotazione. Il numero di stimoli presentati al soggetto è progressivo e il compito è quello di ricordarne il maggior numero possibile. Si inizia con una lista di 3 stimoli e ogni volta che il soggetto indovina tutti gli stimoli di una lista, la lista aumenta di uno finché il soggetto non riesce più a ricordare tutti gli stimoli dell'ultima lista presentata.

B) Il test di Corsi Block, un test utilizzato per valutare la memoria di lavoro visuo-spaziale. Sullo schermo del computer appaiono nove quadrati blu che si illuminano in quantità numericamente progressive e il partecipante deve riprodurre l'esatta sequenza secondo cui si sono illuminati, cliccando su ogni quadrato con il mouse. Si inizia con una sequenza di 2 quadrati e si continua fino a quando il soggetto non ricorda più esattamente l'ultima sequenza osservata.

3) Per valutare l'ansia è stato utilizzato il seguente questionario:

Lo State-Trait Anxiety Inventory-2 (STAI-2; Spielberger, Gorsuch, Lushene, Vagg e Jacobs, 1983), un questionario di autovalutazione in cui il partecipante valuta, su una scala Likert a 4 punti (dove 1 = per niente e 4 = molto), quanto le diverse affermazioni riflettono il suo comportamento. Questa scala è composta da un totale di 40 domande, 20 per l'ansia di stato (Y1) e 20 per l'ansia di tratto (Y2). Lo STAI può essere somministrato sia a singoli che a gruppi

e richiede 8 minuti per completare una scala e circa 15 minuti per completarle entrambe, quindi è possibile estrarre due punteggi distinti a seconda dell'aspetto che si desidera indagare. I punteggi STAI sono comunemente classificati come "ansia nulla o bassa" (20-37), "ansia moderata" (38-44) e "ansia elevata" (45-80).

## **Procedura**

I 40 partecipanti allo studio sperimentale sono stati preliminarmente randomizzati in 2 gruppi (sperimentale e di controllo) di 20 individui ciascuno.

Ai 20 partecipanti che sono rientrati nel gruppo sperimentale è stato somministrato individualmente un training di neurofeedback della durata di 15 minuti, suddiviso in 5 sessioni di 3 minuti ciascuna intervallate da 1 minuto di recupero per 8 giorni consecutivi. È stato chiesto loro di potenziare le onde alpha nelle aree parietali P7 e P8 e occipitali O1 e O2 scegliendo la strategia di pensiero che ritenevano più efficace tra le seguenti: 1. Pensare a esperienze passate positive, 2. Pensare a qualcosa che evoca emozioni, positive o negative, 3. Visualizzare sé stessi durante un'attività sportiva, 4. Pensare a una persona cara, a un amore, a un sentimento forte, 5. Pensare a un momento di relax come in spiaggia o sdraiati sul divano.

Queste strategie sono state proposte ai soggetti durante il training della prima sessione sperimentale. Grazie al feedback visivo dell'attivazione delle onde alpha, impostato sulla frequenza di 7,5-12,5 Hz dal programma Emotiv Brainviz (Emotiv, San Francisco, USA), i soggetti potevano osservare l'andamento progressivo della loro attività cerebrale di tipo alpha. I test di Corsi e la STAI-2 per la valutazione della memoria e dell'ansia sono stati somministrati prima e dopo il training NFT, il primo e l'ottavo giorno dell'esperimento, mentre il test Memory span è stato somministrato all'inizio e alla fine di ogni sessione per tutta la durata dell'intervento, ovvero per tutte e otto le sessioni.

Gli altri 20 partecipanti che facevano parte del gruppo di controllo, non sono stati esposti al feedback visivo ma hanno eseguito soltanto la registrazione di un tracciato EEG di 15 minuti, suddiviso nuovamente da 5 sessioni di 3 minuti ciascuna, intervallate da 1 minuto di recupero. In questo caso, la procedura era concentrata solo sulla visualizzazione di una rappresentazione grafica di un'immagine rilassante che raffigurava una spiaggia soleggiata con un mare calmo, proiettata sullo schermo del PC che era collocato di fronte ai partecipanti. Anche in questo

gruppo sono stati somministrati i test di Corsi e la STAI-2 per la valutazione della memoria e dell'ansia prima e dopo il tracciato EEG di 15 minuti, il primo e l'ottavo giorno, mentre il test Memory span è stato somministrato all'inizio e alla fine di ogni sessione per tutta la durata del programma, ovvero per tutte e otto le sessioni.

### **Descrizione della sequenza di azioni della procedura generale**

I partecipanti sono stati convocati individualmente (previo appuntamento) nello spazio dedicato alla sperimentazione presso l'Università di Cassino nel Campus Folcara. Sono stati accolti da un primo operatore in uno spazio tranquillo, privo di rumori e distrazioni, per non compromettere la validità dello studio. Dopo aver raccolto il consenso informato dei partecipanti, spiegato loro la procedura di sperimentazione e dopo aver preso confidenza con l'ambiente, si è proceduto alla fase di pre-valutazione.

Ai partecipanti è stato chiesto di sedersi su una sedia comoda davanti a un computer per eseguire, con il supporto di un secondo operatore, i pre-test computerizzati previsti per lo studio (assessment della memoria di lavoro e dell'ansia).

Al termine della procedura di pre-valutazione, i partecipanti ai gruppi sperimentali sono stati fatti accomodare in una seconda postazione, posti davanti a un PC (la cui luminosità era impostata entro parametri di sicurezza per la vista) e dove un secondo operatore spiegava il funzionamento del dispositivo Emotiv Epoc X e ne predisponeva il posizionamento sulla testa del partecipante, assicurandosi che la testa non fosse bagnata, che il soggetto non indossasse oggetti metallici e che non compisse movimenti eccessivi che avrebbero potuto interferire con la rilevazione del segnale elettroencefalografico, che i sensori fossero adeguatamente imbevuti di soluzione salina per garantire la conduttività del segnale.

Al partecipante venivano quindi fornite istruzioni su come eseguire il training di neurofeedback con le relative registrazioni EEG.

Una volta completata la fase di registrazione con NFT (della durata di 20 minuti), uno dei ricercatori rimuoveva il dispositivo dalla testa del partecipante e disinfettava i sensori e il dispositivo per la misurazione con il partecipante successivo.



La stessa procedura è stata eseguita per i partecipanti del gruppo di controllo, con la differenza che non erano sottoposti al training di neurofeedback ma istruiti a osservare un'immagine rilassante sullo schermo (ugualmente per una durata di 20 minuti).

Successivamente, uno degli operatori faceva sedere il partecipante alla postazione di partenza per sottoporlo nuovamente (laddove previsto) ai test cognitivi e di ansia. Al termine della sessione, al partecipante veniva chiesto un feedback sulla sessione e raccolte eventuali osservazioni sull'esperienza. Il partecipante veniva quindi congedato e ricordatogli/le il successivo appuntamento.

### **Analisi statistiche**

Per effettuare la pulizia degli artefatti EEG, il calcolo della trasformata di Fourier e per ottenere una prima matrice di ogni singola registrazione effettuata si è utilizzato il software proprietario di Emotiv denominato Analyzer.

Il software di calcolo MATLAB è stato utilizzato per separare la baseline dal tracciato di registrazione e per la costruzione di matrici di calcolo delle medie in riferimento all'alpha relativo normalizzato al campione di riferimento. Tutte le altre analisi sono state effettuate con il Software IBM Statistical Package for Social Sciences (SPSS versione 26) per le analisi multivariate e di regressione.

Per valutare se il programma di NFT avesse effetti significativi sulle variabili dell'onda alpha, sulla memoria di lavoro e sull'ansia, è stata effettuata un'analisi della varianza con un modello fattoriale misto, che includeva la variabile tempo (pre-training-post-training) come fattore all'interno dei partecipanti e la variabile gruppo come fattore tra i soggetti. Pertanto, per ogni variabile dipendente considerata, sono state eseguite corrispondenti ANOVA miste a due vie ( $2 \times 2$ ). Seguendo Cohen (1988), l'Eta quadrato parziale è stata la misura utilizzata per valutare la dimensione dell'effetto (0,01 = piccolo, 0,06 = medio, 0,13 = grande). Il livello di significatività è stato fissato a  $p < 0,05$ , mentre per la verifica degli effetti di interazione multipli univariati è stato introdotto un aggiustamento di Bonferroni dividendo il livello dichiarato di significatività statistica per il numero di variabili dipendenti:  $p < 0.025$  (cioè,  $p < 0.05 \div 2$ ).

## **Risultati**

### ***Elaborazioni preliminari***

I dati EEG registrati sono stati pre-elaborati utilizzando i software Emotiv Analyzer e MATLAB al fine di effettuare la rimozione automatica degli artefatti, la separazione del segnale EEG nelle varie bande attraverso la trasformata di Fourier, il calcolo dell'alpha relativa sia per il gruppo sperimentale che per il gruppo di controllo. Seguendo Rodrigues et al. (2010), i valori alpha relativi per entrambi, NFT e control, sono stati calcolati dall'EEG pre-elaborato, dividendo l'ampiezza media della banda alpha per l'ampiezza media dell'intera banda EEG.

### **Analisi multivariate**

È stata eseguita un'ANOVA a due vie a misure ripetute per determinare l'effetto del trattamento NFT nel tempo sulla ampiezza dell'onda alpha e ulteriori due Anova a due vie per valutare i cambiamenti nei punteggi dei test di memoria e di ansia.

Per quanto riguarda i dati dell'alpha relativa, l'analisi dei residui studentizzati ha dimostrato la normalità nella distribuzione, valutata dal test di Shapiro-Wilk, e l'assenza di outliers, valutati da residui studentizzati non superiori a  $\pm 3$  deviazioni standard. È stata riscontrata la sfericità del termine di interazione, come valutato dal test di Mauchly sulla sfericità ( $p > 0,05$ ).

Considerando la variabile di ampiezza dell'onda alpha, non è emersa un'interazione statisticamente significativa tra Gruppo e Tempo,  $F(7, 133) = 1.02$ ,  $p > 0.05$ ,  $\eta^2$  parziale = 0.051. Pertanto, sono stati valutati gli effetti principali semplici.

E' stata rilevata significatività per la sola variabile di Gruppo:  $F(1, 19) = 6.05$ ,  $p < 0.05$ ,  $\eta^2$  parziale = 0.242.

La tabella 1 mostra i valori registrati dell'alpha (indicati in media, errore standard e intervallo di confidenza) ottenuti nei due gruppi durante le otto giornate che componevano il training.

## Tabella 1

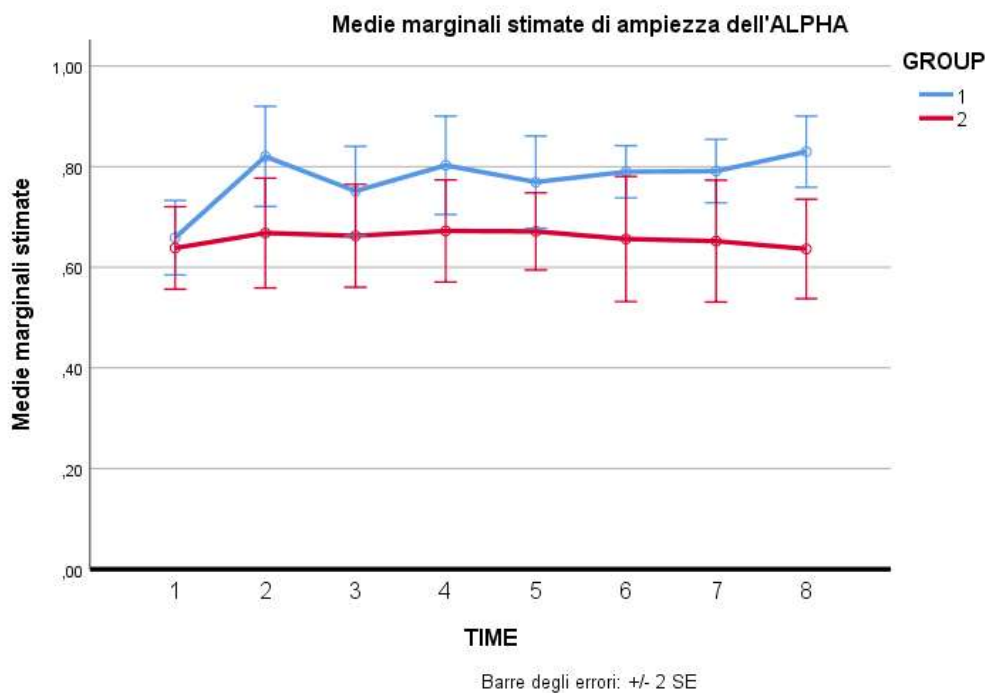
Misura: Ampiezza dell'onda ALPHA

| P | GROU<br>E | TIM | Media | Errore<br>std. | Intervallo di confidenza 95% |                     |
|---|-----------|-----|-------|----------------|------------------------------|---------------------|
|   |           |     |       |                | Limite<br>inferiore          | Limite<br>superiore |
| 1 |           | 1   | ,659  | ,037           | ,581                         | ,736                |
|   |           | 2   | ,820  | ,050           | ,716                         | ,924                |
|   |           | 3   | ,751  | ,044           | ,658                         | ,844                |
|   |           | 4   | ,803  | ,049           | ,700                         | ,905                |
|   |           | 5   | ,769  | ,046           | ,674                         | ,865                |
|   |           | 6   | ,790  | ,026           | ,736                         | ,844                |
|   |           | 7   | ,791  | ,032           | ,725                         | ,857                |
|   |           | 8   | ,830  | ,035           | ,756                         | ,904                |
| 2 |           | 1   | ,638  | ,041           | ,553                         | ,724                |
|   |           | 2   | ,668  | ,055           | ,554                         | ,782                |
|   |           | 3   | ,663  | ,051           | ,556                         | ,770                |
|   |           | 4   | ,672  | ,051           | ,566                         | ,778                |
|   |           | 5   | ,671  | ,038           | ,591                         | ,751                |
|   |           | 6   | ,656  | ,062           | ,526                         | ,786                |
|   |           | 7   | ,652  | ,061           | ,525                         | ,779                |
|   |           | 8   | ,637  | ,049           | ,533                         | ,740                |

Nella figura sottostante (Figura 4) si può notare con maggiore chiarezza la variazione dell'ampiezza dell'onda alpha registrata nei due gruppi durante le otto sessioni. È stata calcolata per ogni sessione la media degli intervalli che componevano ciascuna sessione di training giornaliero. Dopo la registrazione di base del primo giorno, che ha visto i due gruppi partire da un livello sostanzialmente omogeneo, con il training sono emerse differenze già dal secondo giorno, dove il gruppo sperimentale ha fatto registrare livelli medi di ampiezza dell'alpha superiori a quelli del gruppo di controllo. Questa differenza è rimasta evidente per tutti e sette i giorni seguenti la prima sessione, con ampiezza maggiore rilevabile nel secondo, quarto e ottavo giorno, anche se tali picchi specifici in verità non hanno determinato una differenza statisticamente significativa tra le sessioni, configurando un sostanziale “effetto plateau” del training a partire dal secondo giorno. Tale effetto è stato comunque già documentato in letteratura (Gruzelier, 2014; Naas et al., 2019; Dekker et al., 2014), per cui l'innalzamento

dell'alpha non risulta incrementale ma tende a mantenere un livello stabile dopo l'inizio del trattamento.

Figura 4



Possiamo, dunque, affermare che alla luce dei risultati ottenuti, l'obiettivo primo dell'innalzamento del livello medio dell'ampiezza dell'alpha mediante il protocollo di neurofeedback visuale è stato raggiunto. Per la valutazione dell'effetto sulla memoria a breve termine del trattamento sono state comparate le misure del test di Corsi e del Memory Span nei due gruppi, prima e dopo l'intervento. Per il Memory span l'Anova a misure ripetute ha evidenziato significatività per la variabile di tempo ma non di gruppo:  $F(1, 19) = 85.67, p < 0.001, \eta^2 \text{ parziale} = 0.811$

La tabella 2 riporta le medie, errore standard e intervallo di confidenza registrati nei due gruppi durante le otto giornate.

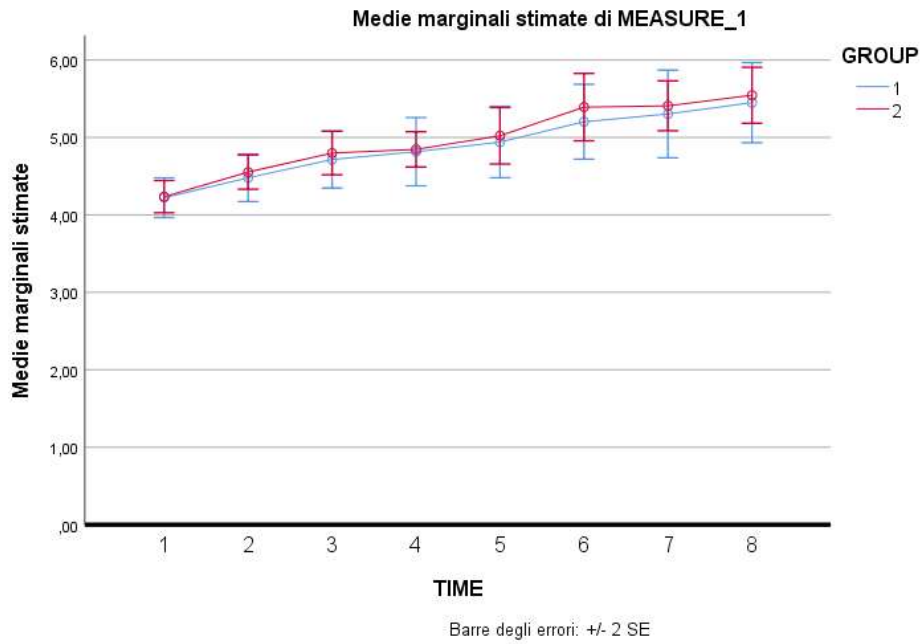
## Tabella 2

Misura: Memory Span

| P | GROU<br>E | TIM | Media | Errore<br>std. | Intervallo di confidenza 95% |                     |
|---|-----------|-----|-------|----------------|------------------------------|---------------------|
|   |           |     |       |                | Limite<br>inferiore          | Limite<br>superiore |
| 1 | 1         | 1   | 4,222 | ,128           | 3,954                        | 4,490               |
|   | 2         | 2   | 4,479 | ,154           | 4,157                        | 4,801               |
|   | 3         | 3   | 4,716 | ,185           | 4,329                        | 5,102               |
|   | 4         | 4   | 4,816 | ,220           | 4,355                        | 5,277               |
|   | 5         | 5   | 4,940 | ,230           | 4,459                        | 5,422               |
|   | 6         | 6   | 5,203 | ,242           | 4,697                        | 5,709               |
|   | 7         | 7   | 5,304 | ,283           | 4,711                        | 5,896               |
|   | 8         | 8   | 5,449 | ,258           | 4,908                        | 5,990               |
| 2 | 1         | 1   | 4,236 | ,104           | 4,017                        | 4,454               |
|   | 2         | 2   | 4,553 | ,111           | 4,321                        | 4,784               |
|   | 3         | 3   | 4,799 | ,140           | 4,505                        | 5,092               |
|   | 4         | 4   | 4,846 | ,114           | 4,608                        | 5,084               |
|   | 5         | 5   | 5,022 | ,182           | 4,640                        | 5,404               |
|   | 6         | 6   | 5,392 | ,218           | 4,936                        | 5,848               |
|   | 7         | 7   | 5,409 | ,161           | 5,071                        | 5,746               |
|   | 8         | 8   | 5,545 | ,181           | 5,167                        | 5,923               |

L'immagine sottostante (Figura 5) illustra con maggiore chiarezza le variazioni nei due gruppi. Come si può osservare, è stato riportato un incremento progressivo sul piano mnestico ma l'andamento è sostanzialmente omogeneo tra i due gruppi, quindi non è associabile alcun effetto diretto del training di neurofeedback impiegato sulla memoria di lavoro dei partecipanti componenti il gruppo sperimentale.

Figura 5



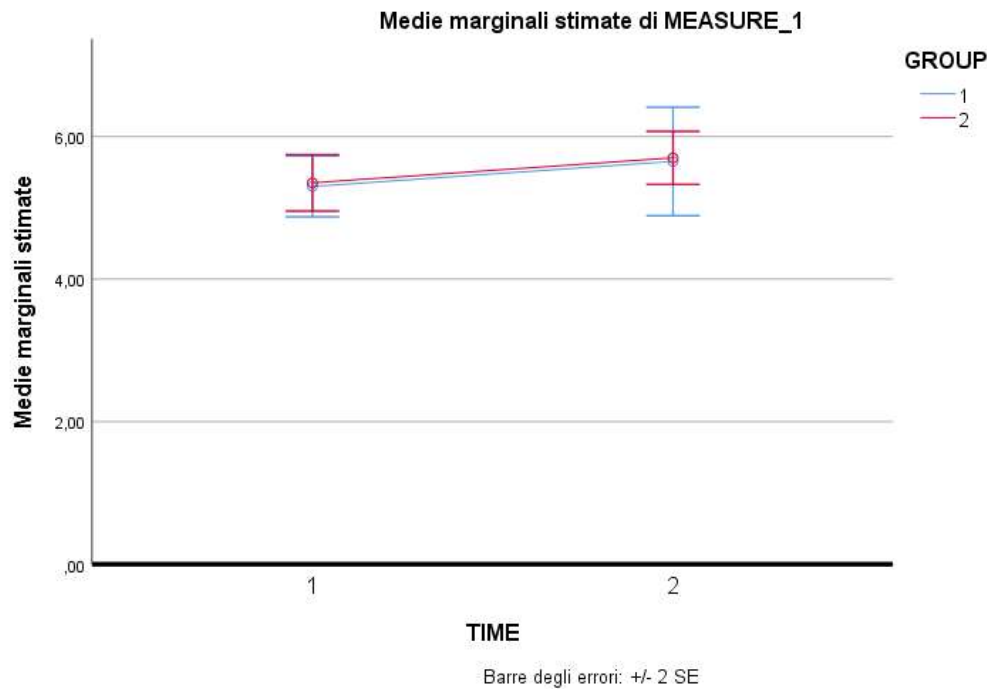
Anche il test di Corsi, somministrato nella prima e nell'ultima sessione di training, non ha confermato l'ipotesi di un cambiamento significativo e positivo delle prestazioni mnestiche in favore del gruppo sperimentale (Tabella 3).

**Tabella 3**

Misura: Test di Corsi

| P | GROU<br>E | TIM<br>Media | Errore<br>std. | Intervallo di confidenza 95% |                     |
|---|-----------|--------------|----------------|------------------------------|---------------------|
|   |           |              |                | Limite<br>inferiore          | Limite<br>superiore |
| 1 | 1         | 5,300        | ,213           | 4,817                        | 5,783               |
|   | 2         | 5,650        | ,380           | 4,789                        | 6,511               |
| 2 | 1         | 5,350        | ,198           | 4,902                        | 5,798               |
|   | 2         | 5,700        | ,186           | 5,280                        | 6,120               |

Figura 6



La figura 6 mostra chiaramente che non si è verificata differenza tra i due gruppi. La pendenza con incremento nella misura effettuata nella sessione finale, anche se meno pronunciata di quanto registrato per la valutazione del memory span, richiama un leggero effetto apprendimento del test. Tale effetto risultava molto pronunciato nel trend dei punteggi del memory span, anche perché in quel caso le somministrazioni sono state effettuate in tutte otto le giornate in cui si è svolto il programma e questo ha probabilmente facilitato l'apprendimento della prova, condizionando i valori di richiamo mnestico.

In conclusione lo studio ha mostrato un effetto significativo del programma di Neurofeedback sull'ampiezza dell'alpha già dopo il secondo giorno, mentre, a differenza di altri studi in letteratura (Nan et al., 2012; Naas et al. 2019), non è stata confermata l'ipotesi di un concomitante effetto positivo sulla memoria di lavoro.

All'interno del protocollo è stata inserita la misura dell'ansia generale di stato e di tratto nei partecipanti. L'ipotesi era di ottenere come effetto concomitante dell'intervento di neurofeedback sull'onda alpha una riduzione dei livelli di ansia generale nei partecipanti. Questo effetto è ben evidenziato in numerosi lavori in letteratura (Blaskovits, et al., 2017;

Mennella et al., 2017; Abdian et al., 2021). La valutazione è stata effettuata nella prima e nell'ultima sessione di training.

Il confronto pre-post tra gruppo sperimentale e gruppo di controllo ha fatto registrare una significativa riduzione dei livelli ansia di stato nei partecipanti del gruppo sperimentale.

La tabella 4 riporta i valori di ansia di stato pre-post registrati nei due gruppi. Vengono indicate le medie, l'errore standard e l'intervallo di confidenza.

**Tabella 4**

Misura: Ansia di stato

| P | GROU<br>E | TIM | Media  | Errore<br>std. | Intervallo di confidenza 95% |                     |
|---|-----------|-----|--------|----------------|------------------------------|---------------------|
|   |           |     |        |                | Limite<br>inferiore          | Limite<br>superiore |
| 1 | 1         | 1   | 30,350 | 1,221          | 27,794                       | 32,906              |
|   |           | 2   | 24,450 | 1,025          | 22,305                       | 26,595              |
| 2 | 1         | 1   | 29,350 | 1,094          | 27,061                       | 31,639              |
|   |           | 2   | 28,900 | 1,005          | 26,797                       | 31,003              |

L'analisi dei contrasti (Tabella 5) mostra un effetto interattivo significativo tra la durata del trattamento e il gruppo di appartenenza, con misure di effetto rispettivamente di .250 (Eta quadrato parziale) per il gruppo e .772 per la durata del trattamento.

**Tabella 5 - Test di contrasti entro soggetti**

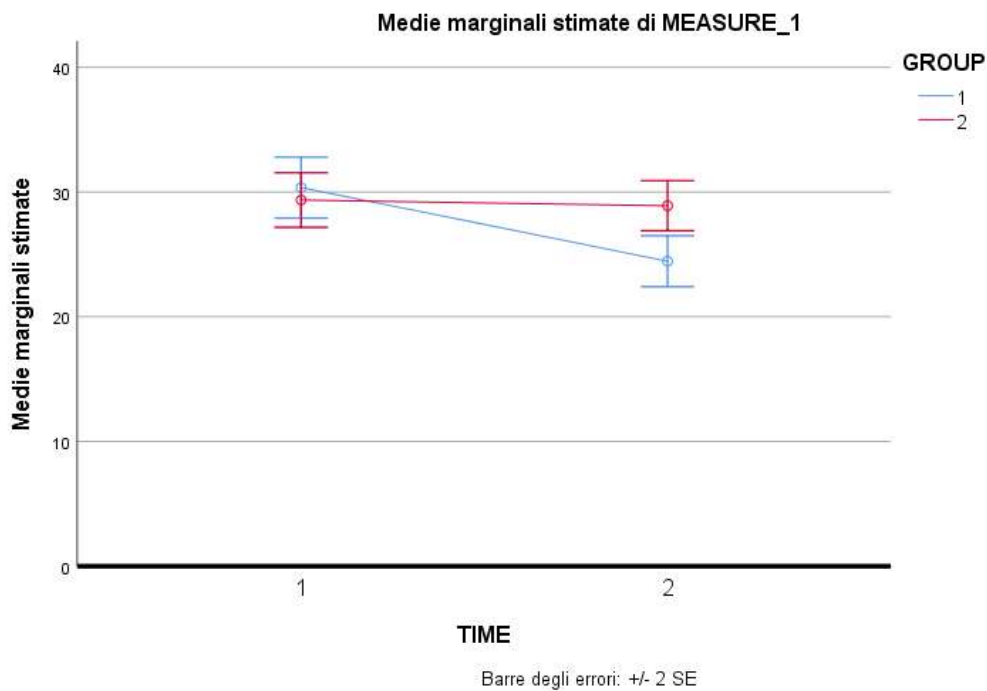
Misura: Ansia di stato

| Origine                | GROUP   | TIME    | Somma<br>dei quadrati di<br>tipo III | gl | Media<br>quadratica | F      | Sign. | Eta<br>quadrato<br>parziale |
|------------------------|---------|---------|--------------------------------------|----|---------------------|--------|-------|-----------------------------|
| GROUP                  | Lineare |         | 59,513                               | 1  | 59,513              | 6,326  | ,021  | ,250                        |
| Errore(GROUP)          | Lineare |         | 178,737                              | 19 | 9,407               |        |       |                             |
| TIME                   |         | Lineare | 201,612                              | 1  | 201,612             | 64,232 | ,000  | ,772                        |
| Errore(TIME)           |         | Lineare | 59,637                               | 19 | 3,139               |        |       |                             |
| GROUP*TIME             | Lineare | Lineare | 148,513                              | 1  | 148,513             | 69,266 | ,000  | ,785                        |
| Errore(GR<br>OUP*TIME) | Lineare | Lineare | 40,738                               | 19 | 2,144               |        |       |                             |



La figura 7 illustra chiaramente la positiva variazione nel gruppo sperimentale, il quale ha fatto registrare una significativa riduzione dell'ansia di stato dopo gli otto giorni.

Figura 7



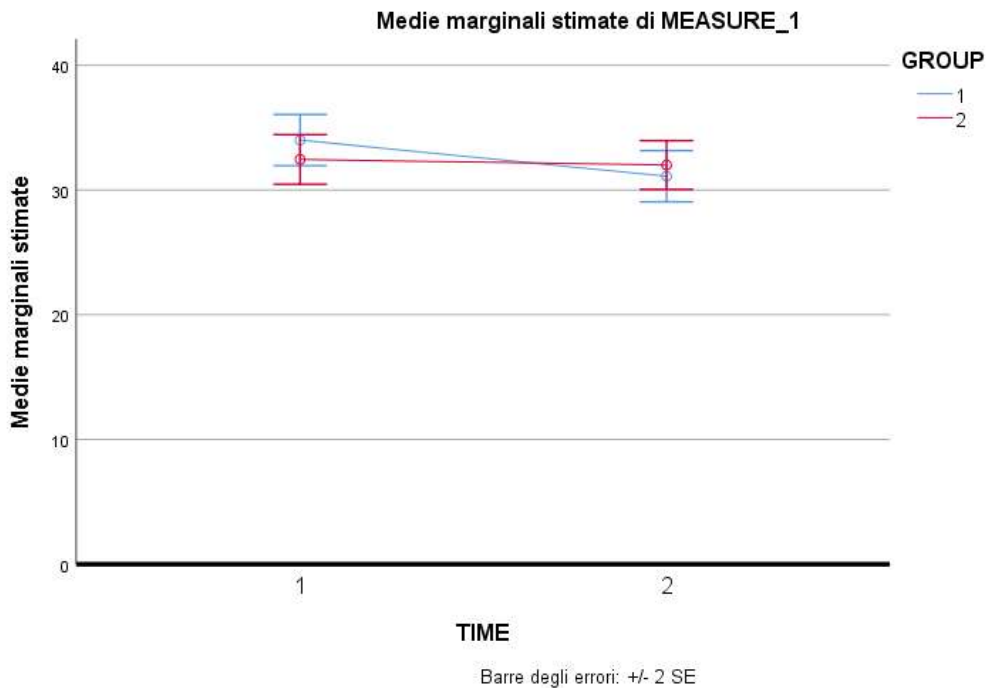
Per l'ansia di tratto non è stata rilevata una riduzione dei livelli di ansia ascrivibile al trattamento di neurofeedback. Infatti, non è emersa significatività di variazione in relazione alla variabile di gruppo ma al solo effetto del tempo, come si può notare nella tabella e nella figura sottostante (Tabella 6 – Figura 8).

## Tabella 6 - Test di contrasti entro soggetti

Misura: Ansia di tratto

| Origine            | GROUP   | TIME    | Somma dei quadrati di tipo III | gl | Media quadratica | F      | Sign. | Eta quadrato parziale |
|--------------------|---------|---------|--------------------------------|----|------------------|--------|-------|-----------------------|
| GROUP              | Lineare |         | 2,112                          | 1  | 2,112            | ,046   | ,832  | ,002                  |
| Errore(GROUP)      | Lineare |         | 871,637                        | 19 | 45,876           |        |       |                       |
| TIME               |         | Lineare | 56,113                         | 1  | 56,113           | 28,326 | ,000  | ,599                  |
| Errore(TIME)       |         | Lineare | 37,637                         | 19 | 1,981            |        |       |                       |
| GROUP * TIME       | Lineare | Lineare | 30,013                         | 1  | 30,013           | 9,876  | ,005  | ,342                  |
| Errore(GROUP*TIME) | Lineare | Lineare | 57,737                         | 19 | 3,039            |        |       |                       |

Figura 8



In conclusione lo studio ha mostrato un concomitante effetto di incremento dell'ampiezza dell'alpha e di riduzione significativa dell'ansia di stato nel gruppo che ha ricevuto l'intervento di neurofeedback.

## **Discussione**

Lo studio qui presentato ha utilizzato un dispositivo Brain Computer Interface di tipo economico disponibile in commercio (Emotiv Epoc-x) come dispositivo NFT per controllare volontariamente e migliorare l'attività EEG del ritmo alpha relativo (8-12 Hz) e conseguentemente indurre un miglioramento nelle prestazioni di memoria a breve termine e una riduzione dell'ansia in un design single-blind. In linea con i risultati precedenti (Nan et al., 2012; Naas et al. 2019) si attendeva un effetto potenziante dell'allenamento sull'alpha relativa e sulle prestazioni della memoria a breve termine (misurata con Memory Span e Test di Corsi), oltretutto una riduzione dei livelli di ansia di stato e di tratto (misurate con STAI-Y).

I risultati hanno evidenziato un incremento significativo dell'alpha relativo nel gruppo sperimentale di neurofeedback tra la prima sessione di registrazione e l'ultima; tale miglioramento non è stato osservato nel gruppo di controllo. Inoltre, l'analisi dei contrasti ha mostrato che l'aumento dell'alpha è stato ottenuto molto prima (a partire dalla seconda sessione) per i partecipanti che hanno osservato la loro attività cerebrale in tempo reale rispetto ai partecipanti che hanno osservato un'immagine neutra. È interessante notare che, dalle analisi, l'aumento significativo del ritmo alpha relativo, risultato nel gruppo sperimentale sin dalla seconda sessione, successivamente è rimasto abbastanza stabile o in lieve aumento. Questo risultato può essere indicatore di un effetto plateau del training di neurofeedback, in quanto, ad un iniziale aumento del ritmo alpha relativo dopo la prima sessione, seguiva un adattamento che portava a stabilizzare il nuovo ritmo e non ad incrementare esponenzialmente. Tale effetto è stato riscontrato anche in precedenti studi presenti in letteratura (Gruzelier, 2014; Naas et al., 2019; Dekker et al., 2014). In diversi studi condotti su partecipanti sani, è stato riportato che la curva incrementale dell'NFT raggiunge un plateau dopo 4-6 sessioni con una successiva stagnazione (numero totale di sessioni 8-10) (Ros et al., 2009; Gruzelier et al., 2010; Keizer et al., 2010; Dekker et al., 2014; Enriquez-Geppert et al., 2014). Si è ipotizzato che questi plateau riflettano la fatica del training o il sovra-apprendimento. Inoltre, i modelli di curva di apprendimento di un campione clinico potrebbero differire da quelli dei soggetti sani. Ad esempio, Kübler et al. (2004) hanno riscontrato che i soggetti sani hanno raggiunto un plateau di apprendimento dopo 3 sessioni, mentre nei pazienti con SLA non è stato raggiunto alcun plateau di apprendimento dopo 12 sessioni. In uno studio di neurofeedback su pazienti affetti da insonnia primaria, i partecipanti hanno mostrato un apprendimento fluttuante, che, interrotto

da sessioni di stagnazione, è aumentato nel corso delle sessioni (Schabus et al., 2014). Nei pazienti ansiosi, Hardt e Kamiya (1978) hanno ipotizzato una curva di apprendimento di quinto ordine, che inizia con un incremento iniziale, seguito da un calo, un secondo aumento e un aumento esponenziale finale per l'apprendimento dell'alpha-Neurofeedback.

In generale, i risultati riguardanti l'alpha relativa hanno evidenziato che il training del ritmo alpha con una procedura NFT in tempo reale facilita il processo di potenziamento dell'attività alpha. Pertanto, i risultati del presente studio confermano la prima ipotesi presentata e sono in accordo con alcuni tra i più recenti studi presenti in letteratura (Chen & Sui, 2023; Naas et al., 2019; Gökşin, Yılmaz & İçöz, 2019), in cui si evidenzia che il training di neurofeedback sul ritmo alpha, ripetuto per diversi giorni, produce un aumento dell'attività alpha relativa. Anche la seconda ipotesi, che prevedeva nel gruppo di controllo un andamento lineare dell'alpha nelle otto sessioni di registrazione, è stata confermata.

La terza ipotesi, che prevedeva un miglioramento dei livelli di ansia in seguito al NFT sul ritmo alpha in confronto al gruppo di controllo, è stata confermata. Anche in questo caso, i risultati sono in linea con alcuni tra i più recenti studi in materia (Blaskovits, et al., 2017; Mennella et al., 2017; Abdian et al., 2021). Il training di neurofeedback sulle onde cerebrali a bassa frequenza (alpha-theta) consente di ridurre l'ansia e di inibire l'attività di regioni specifiche del cervello, che sono determinanti nell'induzione dell'iper-arousal (Caria et al., 2007).

Un aspetto da sottolineare nel presente studio è quello delle strategie utilizzate per l'incremento del ritmo alpha relativo. Dall'analisi descrittiva è emerso che le strategie più utilizzate per ottenere l'attivazione del feedback sullo schermo erano relative al pensare a qualcosa che evocasse emozioni sia positive che negative, visualizzare sé stessi in una attività sportiva oppure pensare a una persona cara, un amore, un sentimento forte. Le analisi di queste tre strategie sul ritmo alpha, pre-post training, hanno evidenziato due andamenti contrastanti: pensare ad emozioni positive o negative non produceva un incremento positivo del ritmo alpha, mentre le strategie concernenti il pensare ad una situazione legata ad attività sportiva o ad un sentimento sono risultate correlate ad un andamento incrementale del ritmo alpha relativo. Ciò potrebbe implicare che sia possibile dedurre strategie mentali appropriate all'interno di una sessione e che un feedback visivo coerente potrebbe non essere necessario per le sessioni successive per sovraregolare l'alpha in una certa misura, a condizione che venga utilizzata la

strategia mentale adeguata. Questa interpretazione sembra essere in linea con gli studi che mostrano un effetto di miglioramento dell'alpha di alcuni tipi di meditazione (id es. Reis et al., 2015; Guez et al., 2015). Uno studio di replica con un ulteriore gruppo di controllo aggiuntivo, non informato su quali strategie siano generalmente collegate al miglioramento del ritmo alpha, potrebbe contribuire ad approfondire questa tematica. Un'altra possibile spiegazione al miglioramento dell'alpha con le strategie sopraelencate, può essere ritrovata nell'ambito dei processi psico-fisiologici. È stato riportato in letteratura che il ritmo Alpha è favorito da uno stato rilassato e, nel corso dello studio qui presentato, i partecipanti hanno acquisito sempre più familiarità con l'ambiente sperimentale, così come con gli sperimentatori. È possibile che i partecipanti siano diventati sempre più rilassati, a proprio agio e calmi durante le sessioni successive di neurofeedback, il che potrebbe aver favorito il miglioramento del ritmo alpha nel gruppo sperimentale. In linea con Thibault et al. (2015), potrebbe essere importante inserire, in un prossimo studio, nel design sperimentale, un gruppo di controllo che lavora con un programma di neurofeedback inverso (finalizzato a ridurre la frequenza dell'alpha).

Un ulteriore risultato osservato nello studio condotto è un netto miglioramento nelle prove di Memory span durante le varie sessioni. L'aumento incrementale significativo, però, è risultato in entrambi i gruppi (sperimentale e controllo). Probabilmente i risultati del test memory span sono stati influenzati da un effetto apprendimento delle prove. Ripetere le prove del memory span pre e post registrazione ad ogni sessione ha favorito l'apprendimento della prova e l'adozione di strategie per il miglioramento del punteggio. Per quanto riguarda l'altro test di memoria impiegato, dalle analisi dei punteggi del test di Corsi è risultata, invece, una linearità tra il Pre ed il Post NFT. In questo caso l'effetto apprendimento non si è verificato, in quanto i punteggi non si sono discostati significativamente rispetto ai punteggi iniziali. Tale risultato è stato ottenuto anche perché il Test di Corsi, a differenza del memory span, è stato somministrato solamente in due occasioni, all'inizio del programma ed alla fine. Tali risultati sono stati osservati in entrambi i gruppi e non hanno confermato le nostre ipotesi iniziali. Per poterli giustificare, possono essere avanzate diverse spiegazioni. Per prima cosa, il rapido miglioramento nel compito memory-span osservato nella maggior parte dei partecipanti è molto probabilmente dovuto alla pratica e risultava essere più forte rispetto all'incremento della frequenza alpha nelle varie sessioni.

Anche il posizionamento degli elettrodi potrebbe essere stato responsabile della mancanza di effetto di NFT sulle prestazioni di memoria di lavoro. I segnali di feedback sono stati acquisiti da P7, O1, O2 e P8 poiché la corteccia occipitale è coinvolta in ogni processo visivo e i siti parietali sono collegati all'attenzione (Gruzelier et al., 2014; Chen et al., 2023). È possibile che la scelta degli elettrodi abbia potuto influenzare o compromettere l'effetto dell'NFT sulle prestazioni di memoria. Molti autori hanno utilizzato elettrodi in altri siti come Cz, Pz, Fz e C3 che differiscono dai siti utilizzati nel presente studio (Egner et al., 2002; Jeddi & Nazari., 2013; Escolano et al., 2011).

Lo studio ha avuto alcune limitazioni che potrebbero aver ridotto l'efficacia sull'intervento programmato. Sebbene utilizzato in varie batterie di test clinici e generalmente sia considerato un indicatore utile per le prestazioni cognitive, il compito memory-span somministrato in questo studio ha mostrato una variazione intra-individuale piuttosto bassa e forti effetti di apprendimento nel grafico a misure ripetute. È anche possibile che il programma di condizionamento non fosse abbastanza efficiente a causa dell'utilizzo di un codice-colore dimensionale come segnale di feedback. Altri autori hanno lavorato con simboli e suoni di ricompensa molto specifici (ad esempio segnali acustici, contatori, suoni piacevoli (Bazanova & Shtark, 2007; Escolano et al., 2014). Un'altra limitazione dello studio è da riferire al software utilizzato per l'NFT, il quale non permetteva di selezionare delle bande specifiche di frequenza. Considerando che molti studi sul miglioramento della memoria di lavoro si sono incentrati sul training dell'individual upper alpha (IUA) (Bobby & Prakash., 2017; Gordon et al., 2020; Israsena et al., 2021), non poter settare il programma su tale frequenza può aver ridotto l'efficacia del training stesso. Un ulteriore limite dello studio può essere stato quello di aver impiegato con il gruppo di controllo la sola immagine rilassante del mare, sulla quale focalizzarsi. Si potrebbe osservare che ad alcuni soggetti quell'immagine poteva suscitare sensazioni rilassanti mentre ad altri poteva attivare sensazioni opposte. Dunque, in vista di un prossimo studio potrebbe essere preferibile inserire diverse opportunità di scelta tra immagini rilassanti (mare, montagna, ecc.) in modo che ciascuno possa orientarsi verso quella più congeniale alle proprie preferenze.

Lo studio ha utilizzato un design a singolo cieco in quanto gli sperimentatori conoscevano a quale tipo di gruppo (sperimentale o di controllo) fossero stati assegnati i soggetti partecipanti. In un prossimo studio bisognerebbe considerare l'ipotesi che anche gli sperimentatori siano

all'oscuro della suddivisione dei gruppi (studio a doppio cieco), in modo da non influire, anche inconsapevolmente, sui risultati. Inoltre negli studi di NFT sono spesso impiegati gruppi di controllo con Sham feedback, in cui ai soggetti del gruppo di controllo vengono posti dei falsi feedback anziché stimoli neutri/piacevoli. Prevedere un gruppo di controllo Sham viene considerato in letteratura il disegno di ricerca più appropriato per studiare un intervento NFT, in quanto fornisce un metodo di controllo per diverse componenti che sono fundamentalmente non correlate alla regolazione EEG, ma che possono comunque influenzare l'EEG (Schabus et al., 2017; Roy et al., 2020), compresi gli effetti di attenzione e dell'aspettativa (Loo e Barkley, 2005, Thompson et al., 2011).

Il progetto di ricerca ha previsto ed effettuato otto sessioni di registrazione a cadenza giornaliera, cinque consecutive in una settimana ed ulteriori tre consecutive nella settimana successiva. Questa modalità di somministrazione può essere stata un limite, in quanto ha probabilmente esposto i soggetti ad affaticamento ed all'effetto plateau in maniera consistente. In un prossimo lavoro bisognerebbe considerare l'idea di programmare interventi con pause di più giorni tra una sessione di training e l'altra, in modo da favorire la motivazione e la concentrazione dei partecipanti ed allo stesso tempo ridurre l'affaticamento.

In ottica di una revisione dello studio sarebbe opportuno, inoltre, concentrarsi anche su altre funzioni cognitive quali il controllo inibitorio, l'attenzione, il focus attentivo, le funzioni esecutive oltreché la memoria. Potrebbe anche essere utile utilizzare altri sensori (ad es. zona frontale, fronto-temporale) che riguardano le funzioni esecutive frontali, ampiamente coinvolte nei processi di memoria (Prabhakaran et al., 2000; Rene et al., 2019; Angelopoulou & Drigas., 2021).

Un'ulteriore indagine dovrebbe verificare la natura momentanea o durevole e stabile dei risultati dei training di neurofeedback sulle funzioni cognitive. Un modo per esplorare questo quesito è quello di condurre studi follow-up a lungo termine. Sul tema, una delle più complete analisi di follow-up sul neurofeedback è stata condotta da Tansey et al. (1993). In questo studio i ricercatori si sono occupati di effettuare un protocollo di NFT del ritmo SRM di un adolescente con ADHD. Dopo 20 sedute di neurofeedback mirate all'aumento dell'attività SRM, il ragazzo ha mostrato un miglioramento specifico nella lettura e nella comprensione, ed una riduzione del suo comportamento iperattivo. Un iniziale follow-up svolto a distanza di 24 mesi dal trattamento ha rivelato che il ragazzo aveva mantenuto i suoi progressi comportamentali,

attentivi ed accademici. Dopo 10 anni un ulteriore follow-up ha evidenziato che l'individuo continuava a mostrare sia i successi accademici e personali che un profilo EEG normalizzato. Ulteriori studi su un più ampio campione dovrebbero essere programmati per verificare l'efficacia a lungo termine degli interventi NFT.

Dai risultati del nostro studio è emerso che tutti i partecipanti (gruppo sperimentale e gruppo di controllo) erano migliorati nel test Memory span (eseguito pre-post per 8 giorni consecutivi) a prescindere dal trattamento con NFT. Questo risultato pone un interrogativo su quale sia il metodo di intervento più adatto a migliorare il livello di working memory tra il training cognitivo (attraverso esercizi cognitivi) oppure l'NFT. Uno studio di Steiner et al. (2014) su un campione di 104 bambini con diagnosi di ADHD ha confrontato i due metodi di intervento utilizzando anche un gruppo di controllo. Dai risultati è emerso che i bambini che avevano effettuato il training di Neurofeedback avevano mostrato miglioramenti significativi rispetto a quelli nella condizione di training cognitivo sulle scale Conners 3-P Executive Functioning, su tutti gli indici sintetici BRIEF, SKAMP Attention e Conners 3-T Inattention. Tali risultati confermano l'efficacia dei protocolli di NFT rispetto a training cognitivi, ma bisognerebbe approfondire la tematica con ulteriori studi che possano indagare anche l'efficacia dell'interazione delle due tecniche di intervento.

Concludendo, una delle principali motivazioni di questo studio era valutare se un dispositivo EEG disponibile in commercio potesse offrire i mezzi necessari per raggiungere l'autoregolazione EEG e, a sua volta, raccogliere i suoi benefici sul miglioramento cognitivo ed affettivo. Considerati i promettenti benefici dell'NFT sulla salute e sul benessere mentale, la non invasività e la crescente convenienza dei dispositivi EEG commerciali, è sicuramente importante proseguire gli studi su tale modalità di intervento. Il NFT non importante soltanto in ambito clinico, ma anche in campi come quelli dello sport e in contesti di vita quotidiana. Sebbene le nostre ipotesi di miglioramento cognitivo della working memory non siano state pienamente confermate, abbiamo osservato trend promettenti nel nostro gruppo NFT riguardo alla sovra-regolazione alpha. Ci aspettiamo che questo studio sia il primo in una raccolta più ampia di lavori che mirano alla sperimentazione ed alla validazione di training specifici applicati al contesto clinico, della salute e del benessere soggettivo.





## **Conclusioni generali**

Il lavoro effettuato in questi tre anni di dottorato mi ha permesso di esplorare ed approfondire una tecnica di intervento sperimentale che ha ricevuto ampia attenzione e discussione in letteratura negli ultimi anni. (Niv, 2013; Begemann et al., 2016; Kimura et al., 2023; Jackson et al., 2023; Patil et al., 2023; Torres et al., 2023).

Il neurofeedback rappresenta un approccio innovativo sia nel contesto della ricerca che in quello clinico. Uno degli aspetti più rilevanti è il suo impatto nel trattamento dell'ansia (Micoulaud-Franchi et al., 2021; Hou et al., 2021), dove il training sul ritmo alfa (8-12 Hz) ha dimostrato risultati promettenti (Demos, 2005; Chen et al., 2021; Tolin et al., 2020; Sultanov & Ismayilova, 2023). Questo particolare ritmo cerebrale è associato a stati di rilassamento e calma mentale. Gli studi che hanno testato l'incremento del ritmo alpha hanno evidenziato un miglioramento dell'ansia sia di stato che di tratto. L'aumento dell'attività alfa tramite NFT è stato, inoltre, collegato a una riduzione dell'ipersensibilità emotiva e a una maggiore resilienza allo stress (Abdian et al., 2021). La capacità di autoregolare questo specifico ritmo cerebrale ha mostrato un potenziale nell'affrontare l'ansia e può fornire un metodo non invasivo ed efficace per promuovere stati di calma e rilassamento mentale (Engelbregt et al., 2022).

Lo studio presentato nel quinto capitolo ha confermato l'efficacia del neurofeedback nel potenziare l'attività dell'alpha relativo nell'EEG, coerentemente con la letteratura esistente (Nicholson et al., 2020; Naas et al., 2019). Nel gruppo sperimentale, si è notato un aumento nell'attività alpha, suggerendo che il feedback in tempo reale ha contribuito efficacemente a favorire questa crescita.

I risultati confermano, inoltre, la capacità del training di neurofeedback sulle onde cerebrali a bassa frequenza nel ridurre i livelli di ansia, un risultato in linea con altri studi (Blaskovits et al., 2017; Gruzelier et al., 2014; Hou et al., 2021). Questo suggerisce che il neurofeedback potrebbe essere un'opzione promettente per intervenire sull'ansia.

Nonostante i risultati positivi sull'attività alpha e sull'ansia, non sono stati osservati miglioramenti significativi nelle prestazioni di memoria di lavoro. Questo risultato potrebbe indicare che l'effetto del training di neurofeedback su specifiche funzioni cognitive può essere influenzato da variabili quali l'effetto apprendimento delle prove o il posizionamento degli elettrodi.

Le strategie mentali utilizzate per aumentare l'attività alpha hanno mostrato risultati differenziati, indicando che specifici approcci mentali potrebbero essere più efficaci nel modulare l'attività cerebrale.

Ulteriori ricerche dovrebbero valutare l'efficacia a lungo termine del neurofeedback, confrontandolo con altre metodologie di miglioramento cognitivo e considerando l'integrazione del neurofeedback in terapie esistenti.

La psicoterapia, negli anni, si è sviluppata secondo diversi approcci, in alcuni casi provando ad integrare concetti e tecniche di intervento. Il neurofeedback si pone come strumento capace di essere integrato in diversi approcci terapeutici, ma tali implicazioni dovrebbero essere studiate e sperimentate più a fondo. Una prospettiva interessante sarebbe quella di verificare se, in campo clinico, una integrazione del Neurofeedback nei percorsi di psicoterapia classici possa produrre una maggiore capacità di intervento sulle sintomatologie e disturbi presentati dai pazienti. In quest'ottica, poter utilizzare dispositivi di ultima generazione con costi ridotti sembra essere la strada più adeguata ad ottenere maggiori risultati anche in campo clinico.

Nonostante le sfide riscontrate nel nostro lavoro di ricerca, il neurofeedback costituisce uno strumento interessante per la regolazione dell'attività cerebrale e per tale motivo andrebbe ulteriormente sperimentato per costruire modelli di intervento sempre più efficaci. L'integrazione di questa tecnica in terapie psicologiche va ulteriormente esplorata per valutare il suo impatto specifico sui sintomi e sui disturbi. In conclusione, mentre lo studio ha confermato alcuni aspetti positivi del training di neurofeedback, ha anche evidenziato alcune limitazioni e variabili da considerare per future ricerche. Ulteriori indagini e sviluppi sono necessari per comprendere appieno il suo potenziale e le sue applicazioni nel miglioramento delle funzioni cognitive e nell'affrontare diversi disturbi psicopatologici.



## Bibliografia

- Abdian, H., Rezaei, M., Eskandari, Z., Ramezani, S., Pirzeh, R., & Dadashi, M. (2021). The effect of quantitative electroencephalography-based neurofeedback therapy on anxiety, depression, and emotion regulation in people with generalized anxiety disorder. *Basic and Clinical Neuroscience*, 12(2), 281.
- Adams, A. M., & Gathercole, S. E. (2000). Limitations in working memory: Implications for language development. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 35(1), 95-116.
- Alexeeva, M. V., Balios, N. V., Muravlyova, K. B., Sapina, E. V., Bazanova, O. M. (2012). Training for voluntarily increasing individual upper  $\alpha$  power as a method for cognitive enhancement. *Hum. Physiol.*, 38, 40–48.
- Alhussein, M., Muhammad, G., & Hossain, M. S. (2019). EEG pathology detection based on deep learning. *IEEE Access*, 7, 27781-27788.
- American Statistical Association. (2016). P-Value Statement. <https://www.amstat.org/newsroom/pressreleases/P-ValueStatement.pdf>
- Amrhein, V., Greenland, S., & McShane, B. Scientists rise up against statistical significance. *Nature* [Internet].
- Angelakis, E., Stathopoulou, S., Frymiare, J. L., Green, D. L., Lubar, J. F., & Kounios, J. (2007). EEG neurofeedback: A brief overview and an example of peak alpha frequency training for cognitive enhancement in the elderly. *The Clin Neuropsychologist*, 21(1), 110–129. doi: 10.1080/13854040600744839.
- Angelidis, A., van der Does, W., Schakel, L., Putman, P. (2016). Frontal EEG theta/beta ratio as an electrophysiological marker for attentional control and its test-retest reliability. *Biological Psychology*, 121:49–52.
- Angelopoulou, E., & Drigas, A. (2021). Working memory, attention and their relationship: A theoretical overview. *Research, Society and Development*, 10(5).

- Aoki, M. S., Arruda, A. F., Freitas, C. G., Miloski, B., Marcelino, P. R., Drago, G., ... & Moreira, A. (2017). Monitoring training loads, mood states, and jump performance over two periodized training mesocycles in elite young volleyball players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 12(1), 130-137.
- Arns, M., de Ridder, S., Strehl, U., Breteler, M., & Coenen, A. (2009). Efficacy of neurofeedback treatment in ADHD: The effects on inattention, impulsivity and hyperactivity: A meta-analysis. *Clinical EEG and Neuroscience*, 40(3), 180–189. doi: 10.1177/155005940904000311.
- Arns, M., Kleinnijenhuis, M., Fallahpour, K., Breteler, R. (2008). Golf performance enhancement and real-life neurofeedback training using personalized event-locked EEG profiles. *J. Neurother.*, 11(4):11-18.
- Asif, S., Mudassar, A., Shahzad, T. Z., Raouf, M., & Pervaiz, T. (2020). Frequency of depression, anxiety and stress among university students. *Pakistan journal of medical sciences*, 36(5), 971.
- Aydin, S., Akkaş, F. D., Türnük, T., Beydilli, A. B., & Saydam, İ. (2020). Test Anxiety among Foreign Language Learners: A Qualitative Study. *Qualitative Report*, 25(12).
- Azarpaikan, A., Torbati, H. T., Sohrabi, M. (2014). Neurofeedback and physical balance in Parkinson's patients. *Gait & posture*, 40(1):177-81.
- Babiloni, C., Del Percio, C., Iacoboni, M., Infarinato, F., Lizio, R., Marzano, N., Crespi, G., Dassu, F., Pirritano, M., Gallamini, M., & Eusebi, F. (2008). Golf putt outcomes are predicted by sensorimotor cerebral EEG rhythms. *The Journal of Physiology*, 586(1), 131–139. doi: 10.1113/jphysiol.2007.141630.
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.
- Baddeley, A. (2003). Working memory and language: An overview. *Journal of communication disorders*, 36(3), 189-208
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, 4(10), 829-839.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 8, pp. 47-89). Academic press.

- Baddeley, A., Papagno, C., & Vallar, G. (1988). When long-term learning depends on short-term storage. *Journal of memory and language*, 27(5), 586-595.
- Bagherzadeh, Y., Baldauf, D., Pantazis, D., & Desimone, R. (2020). Alfa synchrony and the neurofeedback control of spatial attention. *Neuron*, 105(3), 577-587.
- Bandura, A. (1986). Social foundations of thought and action. Englewood Cliffs, NJ, 1986(23-28).
- Bandura, A., Freeman, W. H., & Lightsey, R. (1999). Self-efficacy: The exercise of control.
- Barlow, D. H., Raffa, S. D., & Cohen, E. M. (2002). Psychosocial treatments for panic disorders, phobias, and generalized anxiety disorder.
- Baumeister, J., Reinecke, K., Liesen, H., & Weiss, M. (2008). Cortical activity of skilled performance in a complex sports related motor task. *European Journal of Applied Physiology*, 104, 625–631. doi: 10.1007/s00421-008-0811-x.
- Bazanova, O. M., & Aftanas, L. I. (2010). Individual EEG alfa activity analysis for enhancement neurofeedback efficiency: two case studies. *Journal of Neurotherapy*, 14(3), 244-253.
- Bazanova, O. M., & Shtark, M. B. (2007). Biofeedback in optimizing psychomotor reactivity: I. Comparison of biofeedback and common performance practice. *Human Physiology*, 33, 400-408.
- Bazanova, O. M., Auer, T., & Sapina, E. A. (2018). On the efficiency of individualized theta/beta ratio neurofeedback combined with forehead EMG training in ADHD children. *Frontiers in human neuroscience*, 12, 3.
- Beatty, J., Greenberg, A., Deibler, W.P., O'Hanlon, J.F., 1974. Operant control of occipital theta rhythm affects performance in a radar monitoring task. *Science* 183, 871-873.
- Becerra, J., Fernandez, T., Harmony, T., Caballero, M. I., Garcia, F., Fernandez-Bouzas, A., ... & Prado-Alcalá, R. A. (2006). Follow-up study of learning-disabled children treated with neurofeedback or placebo. *Clinical EEG and neuroscience*, 37(3), 198-203.
- Beck, A. T. (1976) *Cognitive Therapy and the Emotional Disorders* (International Universities Press.

- Beck, A. T., Epstein, N., Brown, G., & Steer, R. (1993). Beck anxiety inventory. *Journal of consulting and clinical psychology*.
- Begemann, M. J., Florisse, E. J., van Lutterveld, R., Kooyman, M., & Sommer, I. E. (2016). Efficacy of EEG neurofeedback in psychiatry: A comprehensive overview and meta-analysis. *Translational Brain Rhythmicity*, 1(1), 19-29.
- Benatti, B., Girone, N., Conti, D., Celebre, L., Macellaro, M., Molteni, L., ... & Dell'Osso, B. (2023). Intensive Neurofeedback Protocol: An Alpha Training to Improve Sleep Quality and Stress Modulation in Health Care Professionals During The COVID-19 Pandemic. A Pilot Study. *Clinical Neuropsychiatry*, 20(1), 61.
- Berger, H. (1929). Über das elektroenkephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*, 87(1), 527-570.
- Berger, H. (1933). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. Sechste Mitteilung. *Arch Psychiat Nervenkr*, 99, 555-574.
- Bergua, V., Meillon, C., Potvin, O., Ritchie, K., Tzourio, C., Bouisson, J., ... & Amieva, H. (2016). Short STAI-Y anxiety scales: validation and normative data for elderly subjects. *Aging & mental health*, 20(9), 987-995.
- Berman, M. H., & Nichols, T. W. (2019). Treatment of neurodegeneration: integrating Photobiomodulation and neurofeedback in Alzheimer's dementia and Parkinson's: a review. *Photobiomodulation, photomedicine, and laser surgery*, 37(10), 623-634.
- Besharat, M. A., & Pourbohloul, S. (2011). Moderating effects of self-confidence and sport self-efficacy on the relationship between competitive anxiety and sport performance. *Psychology*, 2(07), 760.
- Binder, E. B., & Nemeroff, C. B. (2010). The CRF system, stress, depression and anxiety—insights from human genetic studies. *Molecular psychiatry*, 15(6), 574-588.
- Bisaz, R., Conboy, L., & Sandi, C. (2009). Learning under stress: a role for the neural cell adhesion molecule NCAM. *Neurobiology of learning and memory*, 91(4), 333-342.
- Blaskovits, F., Tyerman, J., & Luctkar-Flude, M. (2017). Effectiveness of neurofeedback therapy for anxiety and stress in adults living with a chronic illness: a systematic review protocol. *JBIC Evidence Synthesis*, 15(7), 1765-1769.



- Bobby, J. S., & Prakash, S. (2017). Upper alfa neurofeedback training enhances working memory performance using LabVIEW. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 25(2-4), 120-132.
- Boggio, P. S., Ferrucci, R., Rigonatti, S. P., Covre, P., Nitsche, M., Pascual-Leone, A., Fregni, F. (2006). Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease. *Journal of the neurological sciences*, 249(1):31-8.
- Borhani, S., Zhao, X., Kelly, M. R., Gottschalk, K. E., Yuan, F., Jicha, G. A., & Jiang, Y. (2021). Gauging working memory capacity from differential resting brain oscillations in older individuals with a wearable device. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 13, 625006.
- Boris, B., Iris, O., 2014. Biofeedback for Sport and Performance Enhancement. 'Oxford University Press'.
- Borkovec, T. D., Alcaine, O. M., & Behar, E. (2004). Avoidance theory of worry and generalized anxiety disorder.
- Borkovec, T. D., Hazlett-Stevens, H., & Diaz, M. L. (1999). The role of positive beliefs about worry in generalized anxiety disorder and its treatment. *Clinical Psychology & Psychotherapy: An International Journal of Theory & Practice*, 6(2), 126-138.
- Bouton, M. E., Mineka, S., & Barlow, D. H. (2001). A modern learning theory perspective on the etiology of panic disorder. *Psychological review*, 108(1), 4.
- Brandmeyer, T., & Delorme, A. (2020). Closed-loop frontal midline  $\theta$  neurofeedback: A novel approach for training focused-attention meditation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 246.
- Brandt, R., Bevilacqua, G. G., & Andrade, A. (2017). Perceived sleep quality, mood states, and their relationship with performance among Brazilian elite athletes during a competitive period. *Journal of strength and conditioning research*, 31(4), 1033-1039.
- Brown, D. J., & Fletcher, D. (2017). Effects of psychological and psychosocial interventions on sport performance: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 47, 77-99.
- Brunton, R. J., Dryer, R., Saliba, A., & Kohlhoff, J. (2019). The initial development of the Pregnancy-related Anxiety Scale. *Women and Birth*, 32(1), e118-e130.

- Buckley, J., Cohen, J. D., Kramer, A. F., McAuley, E., & Mullen, S. P. (2014). Cognitive control in the self-regulation of physical activity and sedentary behavior. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 747.
- Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2007). Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. *Science*, 315, 1860–1862. doi: 10.1126/science.1138071.
- Callan, D. E., & Naito, E. (2014). Neural processes distinguishing elite from expert and novice athletes. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 27(4), 183-188.
- Cannon, E. N., Yoo, K. H., Vanderwert, R. E., Ferrari, P. F., Woodward, A. L., & Fox, N. A. (2014). Action experience, more than observation, influences Mu rhythm desynchronization. *PLoS ONE*, 9(3), e92002. doi: 10.1371/journal.pone.0092002.
- Cannon, W. B. (1920). *A laboratory course in physiology*. Harvard University Press.
- Cao, L., Zhang, Y., Huang, R., Li, L., Xia, F., Zou, L., et al. (2021). Structural and functional brain signatures of endurance runners. *Brain structure & Function*, 226(1), 93–103.
- Caria, A., Veit, R., Sitaram, R., Lotze, M., Weiskopf, N., Grodd, W., & Birbaumer, N. (2007). Regulation of anterior insular cortex activity using real-time fMRI. *Neuroimage*, 35(3), 1238-1246.
- Cassady, J. C., & Johnson, R. E. (2002). Cognitive test anxiety and academic performance. *Contemporary educational psychology*, 27(2), 270-295.
- Cassady, J. C. (2022). Anxiety in the schools: Causes, consequences, and solutions for academic anxieties. In *Handbook of Stress and Academic Anxiety: Psychological Processes and Interventions with Students and Teachers* (pp. 13-30). Cham: Springer International Publishing.
- Caton, R. (1875). The Electric currents of the brain. *Brit. med. J*, 2, 278.
- Chan, M. M., Yau, S. S., & Han, Y. M. (2021). The neurobiology of prefrontal transcranial direct current stimulation (tDCS) in promoting brain plasticity: A systematic review and meta-analyses of human and rodent studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 125, 392-416.
- Chang, C. Y., & Hung, T. M. (2020). Understanding and controlling cortical activity for superior performance. *Kinesiology Review*, 9(1), 41-50.

- Chang, Y., Lee, J. J., Seo, J. H., Song, H. J., Kim, Y. T., Lee, H. J., ... & Kim, J. G. (2011). Neural correlates of motor imagery for elite archers. *NMR in Biomedicine*, 24(4), 366-372.
- Chen, J. M., & Morrison, A. B. (2010). Expanding the mind's workspace: Training and transfer effects with a complex working memory span task. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 193–199.
- Chen, C., Xiao, X., Belkacem, A. N., Lu, L., Wang, X., Yi, W., ... & Ming, D. (2021). Efficacy evaluation of neurofeedback-based anxiety relief. *Frontiers in neuroscience*, 15, 758068.
- Chen, T. T., Wang, K. P., Chang, W. H., Kao, C. W., & Hung, T. M. (2022). Effects of the function-specific instruction approach to neurofeedback training on frontal midline theta waves and golf putting performance. *Psychology of Sport and Exercise*, 61, 102211.
- Chen, X., & Sui, L. (2023). Alfa band neurofeedback training based on a portable device improves working memory performance of young people. *Biomedical Signal Processing and Control*, 80, 104308.
- Chen, Y., Xu, H., Liu, C., Zhang, J., & Guo, C. (2021). Association between future orientation and anxiety in university students during COVID-19 outbreak: the chain mediating role of optimization in primary-secondary control and resilience. *Frontiers in Psychiatry*, 12, 699388.
- Cheng, M. Y., & Hung, T. M. (2020). Biofeedback and neurofeedback for mental skills training in sports. In *Advancements in mental skills training* (pp. 149-163). Routledge.
- Cheng, M. Y., Huang, C. J., Chang, Y. K., Koester, D., Schack, T., & Hung, T. M. (2015). Sensorimotor rhythm neurofeedback enhances golf putting performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 37(6), 626–636. doi: 10.1123/jsep.2015- 0166.
- Cheng, M. Y., Hung, C. L., Huang, C. J., Chang, Y. K., Lo, L. C., Shen, C., & Hung, T. M. (2015). Expert-novice differences in SMR activity during dart throwing. *Biological Psychology*, 110, 212–218. doi: 10.1016/j.biopsycho.2015.08.003.
- Cheng, M. Y., Wang, K. P., Doppelmayr, M., Steinberg, F., Hung, T. M., Lu, C., ... & Hatfield, B. (2023). QEEG markers of superior shooting performance in skilled

- marksmen: An investigation of cortical activity on psychomotor efficiency hypothesis. *Psychology of Sport and Exercise*, 65, 102320.
- Cheng, M. Y., Wang, K. P., Hung, C. L., Tu, Y. L., Huang, C. J., Koester, D., ... & Hung, T. M. (2017). Higher power of sensorimotor rhythm is associated with better performance in skilled air-pistol shooters. *Psychology of Sport and Exercise*, 32, 47-53.
- Cheng, M. Y., Wang, K. P., Hung, C. L., Tu, Y. L., Huang, C. J., Dirk, K., & Hung, T. M. (2017). Higher power of sensorimotor rhythm is associated with better performance in skilled air-pistol shooters. *Psychology of Sport and Exercise*, 32, 47-53.
- Cheng, M.Y. (2018). Neurofeedback in Sport Theory, Methods, Research, and Efficacy. *Handbook of Sport Neuroscience and Psychophysiology*.
- Cheng, M.-Y., Huang, C.-J., Chang, Y.-K., Koester, D., Schack, T., and Hung, T.-M. (2015). Sensorimotor rhythm NFB enhances golf putting performance. *J. Sport Exerc. Psychol.* 37:626-636.
- Christie, S., Bertollo, M., & Werthner, P. (2020). The effect of an integrated neurofeedback and biofeedback training intervention on ice hockey shooting performance. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 42(1), 34-47.
- Christie, S., Bertollo, M., & Werthner, P. (2020). The effect of an integrated neurofeedback and biofeedback training intervention on ice hockey shooting performance. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 42(1), 34-47.
- Christie, S., Werthner, P. (2015). Psychophysiological Profile of a 200-m Canoe Athlete: A Comparison of Best and Worst Reaction Times. *Biofeedback*, 43(2): 73-83.
- Christie, S., Werthner, P., & Bertollo, M. (2019). Exploration of event-related dynamics of brain oscillations in ice hockey shooting. *Sport, Exercise, and Performance Psychology*, 8(1), 38-52. doi: 10.1037/spy0000134.
- Clancy, K., Ding, M., Bernat, E., Schmidt, N. B., & Li, W. (2017). Restless 'rest': intrinsic sensory hyperactivity and disinhibition in post-traumatic stress disorder. *Brain*, 140(7), 2041-2050.
- Clark, D. A., & Beck, A. T. (2010). Cognitive theory and therapy of anxiety and depression: Convergence with neurobiological findings. *Trends in cognitive sciences*, 14(9), 418-424.

- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., et al. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *The journals of gerontology Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 61(11), 1166–1170.
- Colloca, L., Benedetti, F. (2005). Placebos and painkillers: is mind as real as matter? *Nat Rev Neurosci.*, 6(7):545-552.
- Comunian, A. L. (1985). The development and validation of the Italian form of the Test Anxiety Inventory. *Advances in test anxiety research*, 4, 215-220.
- Connell, J., Barkham, M., & Mellor-Clark, J. (2007). CORE-OM mental health norms of students attending university counselling services benchmarked against an age-matched primary care sample. *British Journal of Guidance & Counselling*, 35(1), 41-57.
- Cooke, A., Gallicchio, G., Kavussanu, M., Willoughby, A., McIntyre, D., & Ring, C. (2015). Premovement high-alpha power is modulated by previous movement errors: Indirect evidence to endorse high-alpha power as a marker of resource allocation during motor programming. *Psychophysiology*, 52(7), 977–981. doi: 10.1111/psyp.12414.
- Cooke, A., Kavussanu, M., Gallicchio, G., Willoughby, A., McIntyre, D., & Ring, C. (2014). Preparation for action: Psychophysiological activity preceding a motor skill as a function of expertise, performance outcome, and psychological pressure. *Psychophysiology*, 51(4), 374–384. doi: 10.1111/Psyp.1218.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive psychology*, 51(1), 42-100.
- Craig, A. (2009). How do you feel — now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, 10, 59–70.
- Crivelli, D., Fronda, G., & Balconi, M. (2019). Neurocognitive enhancement effects of combined mindfulness–neurofeedback training in sport. *Neuroscience*, 412, 83-93.
- Cserpan, D., Gennari, A., Gaito, L., Lo Biundo, S. P., Tuura, R., Sarnthein, J., & Ramantani, G. (2022). Scalp HFO rates are higher for larger lesions. *Epilepsia Open*, 7(3), 496-503.
- Dana, A., Rafiee, S., & Gholami, A. (2019). The effect of Neurofeedback Training on Working Memory and Perceptual-motor development in Athlete Boys. *Journal of Rehabilitation Sciences & Research*, 6(1), 34-40.

- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 19(4), 450-466.
- Dashtbozorgi, Z., Ahangar, M. D., Aminsharieh, S., Ashoori, J., Alizadeh, M. (2017). The Effect of Neurofeedback Training on Sustain Attention and Working Memory in Male Elementary School Students with Attention-Deficit/Hyperactivity. Disorder, 5(4): 5-13.
- Dave, F., & Tripathi, R. (2022). The efficacy of neurofeedback for alcohol use disorders-a systematic review. *The World Journal of Biological Psychiatry*, 1-29.
- Davelaar, E. J. (2018). Mechanisms of neurofeedback: a computation-theoretic approach. *Neuroscience*, 378, 175-188.
- Davelaar, E. J. (2018). Mechanisms of neurofeedback: A computation-theoretic approach. *Neuroscience*, 378, 175–188.
- Davidson, R. J. (1992). Emotion and affective style: Hemispheric substrates. *Psychological Science*, 3(1), 39–43. doi: 10.1111/j.1467-9280.1992.tb00254.x.
- Davis, M., Walker, D. L., Miles, L. & Grillon, C. (2010). Phasic versus sustained fear in rats and humans: role of the extended amygdala in fear versus anxiety. *Neuropsychopharmacology* 35, 105–135.
- Deacon, B., & Abramowitz, J. (2006). Anxiety sensitivity and its dimensions across the anxiety disorders. *Journal of anxiety disorders*, 20(7), 837-857.
- Debnath, S., & Debnath, S. (2016). Performance evaluation by image processing techniques in archery—a case study. *International Journal of New Technologies in Science and Engineering*, 3(1), 1-6.
- Dekker, M. K., Sitskoorn, M. M., Denissen, A. J., & van Boxtel, G. J. (2014). The time-course of alfa neurofeedback training effects in healthy participants. *Biological psychology*, 95, 70-73.
- Dekker, M. K., van den Berg, B. R., Denissen, A. J., Sitskoorn, M. M., & van Boxtel, G. J. (2014). Feasibility of eyes open alpha power training for mental enhancement in elite gymnasts. *Journal of Sports Sciences*, 32(16), 1550–1560. doi: 10.1080/02640414.2014.906044.
- Del Percio, C., Babiloni, C., Bertollo, M., Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., ... Eusebi, F. (2009). Visuoattentional and sensorimotor alpha rhythms are related to visuo-

- motor performance in athletes. *Human Brain Mapping*, 30(11), 3527–3540. doi: 10.1002/hbm.20776.
- Demos, J. N. (2005). *Getting started with neurofeedback*. WW Norton & Company.
- Dempster, T. (2012). *An investigation into the optimum training paradigm for alfa electroencephalographic biofeedback*. Canterbury Christ Church University (United Kingdom).
- De Pittà, M., Brunel, N., & Volterra, A. (2016). Astrocytes: Orchestrating synaptic plasticity?. *Neuroscience*, 323, 43-61.
- Dessy, E., Mairesse, O., Van Puyvelde, M., Cortoos, A., Neyt, X., & Pattyn, N. (2020). Train your brain? Can we really selectively train specific EEG frequencies with neurofeedback training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 22.
- Dietrich, A. (2004). Neurocognitive mechanisms underlying the experience of flow. *Consciousness and Cognition*, 13(4), 746–761.
- Dietrich, A., & Audiffren, M. (2011). The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(6), 1305–1325.
- Diotaiuti, P., Corrado, S., Mancone, S., Falese, L., Dominski, F. H., & Andrade, A. (2021). An exploratory pilot study on choking episodes in archery. *Frontiers in Psychology*, 12, 585477.
- Diotaiuti, P., Valente, G., & Mancone, S. (2021). Validation study of the Italian version of Temporal Focus Scale: psychometric properties and convergent validity. *BMC psychology*, 9, 1-13.
- Diotaiuti, P., Valente, G., Mancone, S., Falese, L., Corrado, S., Siqueira, T. C., & Andrade, A. (2022). A Psychoeducational Intervention in Prenatal Classes: Positive Effects on Anxiety, Self-Efficacy, and Temporal Focus in Birth Attendants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7904.
- Domingos, C., Alves, C. P., Sousa, E., Rosa, A., & Pereira, J. G. (2020). Does neurofeedback training improve performance in athletes? *NeuroRegulation*, 7(1), 8–17.
- Domingos, C., da Silva Caldeira, H., Miranda, M., Melício, F., Rosa, A. C., & Pereira, J. G. (2021). The Influence of Noise in the Neurofeedback Training Sessions in Student

- Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), 13223.
- Domingos, C., Peralta, M., Prazeres, P., Nan, W., Rosa, A., & Pereira, J. G. (2021). Session Frequency Matters in Neurofeedback Training of Athletes. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 46(2), 195-204.
- Domingos, C., Silva, C. M. D., Antunes, A., Prazeres, P., Esteves, I., & Rosa, A. C. (2021). The influence of an alfa band neurofeedback training in heart rate variability in athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 12579.
- Doppelmayr, M., Finkenzeller, T., & Sauseng, P. (2008). Frontal midline theta in the preshot phase of rifle shooting: Differences between experts and novices. *Neuropsychologia*, 46, 1463–1467. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.12.026.
- Driscoll, R. (2007). Westside Test Anxiety Scale validation. *Online submission*.
- Dupee, M. (2008). Exploring a bioneurofeedback training intervention to enhance psychological skills & performance in sport (Doctoral dissertation, University of Ottawa (Canada)).
- Dupee, M., & Werthner, P. (2011). Managing the stress response: The use of biofeedback and neurofeedback with Olympic athletes. *Biofeedback*, 39(3), 92-94.
- Durguerian, A., Bougard, C., Drogou, C., Sauvet, F., Chennaoui, M., & Filaire, E. (2015). Weight loss, performance and psychological related states in high-level weightlifters. *International journal of sports medicine*, 230-238.
- Edwards, S. (2006). Physical exercise and psychological well-being. *South African journal of psychology*, 36(2), 357-373.
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2003). Ecological validity of neurofeedback: Modulation of slow wave EEG enhances musical performance. *Neuroreport*, 14(9), 1221-1224.
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2004). EEG biofeedback of low beta band components: frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials. *Clinical neurophysiology*, 115(1), 131-139.



- Egner, T., Gruzelier, J. (2001). Learned self-regulation of EEG frequency components affects attention and event-related brain potentials in humans. *Neuroreport*, 12(18): 4155-4159.
- Egner, T., Gruzelier, J. H. (2003). Ecological validity of neurofeedback: modulation of slow wave EEG enhances musical performance. *Neuroreport*, 14(9):1221-1224.
- Egner, T., Strawson, E., & Gruzelier, J. H. (2002). EEG signature and phenomenology of alpha/theta neurofeedback training versus mock feedback. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 27, 261-270.
- Egner, T., Zech, T. F., & Gruzelier, J. H. (2004). The effects of neurofeedback training on the spectral topography of the electroencephalogram. *Clinical Neurophysiology*, 115(11), 2452-2460.
- Egner, T., Zech, T. F., Gruzelier, J. H. (2004). The effects of neurofeedback training on the spectral topography of the electroencephalogram. *Clin Neurophysiol*, 115(11): 2452-2460.
- Elliott, T. R., Shewchuk, R. M., & Richards, J. S. (2001). Family caregiver social problem-solving abilities and adjustment during the initial year of the caregiving role. *Journal of Counseling Psychology*, 48(2), 223.
- Emmert, K., Kopel, R., Sulzer, J., Brühl, A. B., Berman, B. D., Linden, D. E., et al. (2016). Meta-analysis of real-time fMRI neurofeedback studies using individual participant data: How is brain regulation mediated? *NeuroImage*, 124, 806–812.
- Engelbregt, H., Alderse Baas, H. F., de Grauw, S., & Deijen, J. B. (2022). Brain Activity During Paired and Individual Mindfulness Meditation: A Controlled EEG Study.
- Enoch, M. A., Shen, P. H., Ducci, F., Yuan, Q., Liu, J., White, K. V., ... & Goldman, D. (2008). Common genetic origins for EEG, alcoholism and anxiety: the role of CRH-BP. *PloS one*, 3(10), e3620.
- Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2013). Boosting brain functions: Improving executive functions with behavioral training, neurostimulation, and neurofeedback. *International journal of psychophysiology*, 88(1), 1-16.

- Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2017). EEG-neurofeedback as a tool to modulate cognition and behavior: A review tutorial. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 51.
- Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., Figge, C., & Herrmann, C. S. (2014). Self-regulation of frontal-midline theta facilitates memory updating and mental set shifting. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8, 420. doi: 10.3389/fnbeh.2014.00420.
- Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., Scharfenort, R., Mokom, Z. N., Zimmermann, J., & Herrmann, C. S. (2014). Modulation of frontal-midline theta by neurofeedback. *Biological psychology*, 95, 59-69.
- Enriquez-Geppert, S., Smit, D., Pimenta, M. G., & Arns, M. (2019). Neurofeedback as a treatment intervention in ADHD: Current evidence and practice. *Current psychiatry reports*, 21(6), 1-7.
- Epstein, J., Osborne, R. H., Elsworth, G. R., Beaton, D. E., & Guillemin, F. (2015). Cross-cultural adaptation of the Health Education Impact Questionnaire: experimental study showed expert committee, not back-translation, added value. *Journal of clinical epidemiology*, 68(4), 360-369.
- Ericsson, K. A., Delaney, P. F., Weaver, G., & Mahadevan, R. (2004). Uncovering the structure of a memorist's superior "basic" memory capacity. *Cognitive psychology*, 49(3), 191-237.
- Escolano, C., Aguilar, M., & Minguez, J. (2011, August). EEG-based upper alpha neurofeedback training improves working memory performance. In *2011 annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 2327-2330). IEEE.
- Escolano, C., Aguilar, M., & Minguez, J. (2011, August). EEG-based upper alpha neurofeedback training improves working memory performance. In *2011 annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 2327-2330). IEEE.
- Escolano, C., Aguilar, M., Minguez, J. (2011). EEG-based upper alpha neurofeedback training improves working memory performance. In *Engineering in medicine and biology*

- society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE (pp. 2327- 2330). IEEE.
- Escolano, C., Navarro-Gil, M., Garcia-Campayo, J., & Minguez, J. (2014). The effects of a single session of upper alpha neurofeedback for cognitive enhancement: A sham-controlled study. *Applied psychophysiology and biofeedback, 39*, 227-236.
- Evans, J. R., & Abarbanel, A. (Eds.). (1999). *Introduction to quantitative EEG and neurofeedback*. Elsevier.
- Evans, J. R., Budzynski, T. H., Budzynski, H. K., & Abarbanel, A. (Eds.). (2009). *Introduction to quantitative EEG and neurofeedback: Advanced theory and applications*. Academic Press.
- Feixas, G., & Botella, L. (2004). Psychotherapy integration: Reflections and contributions from a constructivist epistemology. *Journal of Psychotherapy Integration, 14*(2), 192.
- Fernández-Álvarez, J., Grassi, M., Colombo, D., Botella, C., Cipresso, P., Perna, G., & Riva, G. (2022). Efficacy of bio-and neurofeedback for depression: a meta-analysis. *Psychological medicine, 52*(2), 201-216.
- Fisher, S. F. (2014). *Neurofeedback in the treatment of developmental trauma: Calming the fear-driven brain*. WW Norton & Company.
- Foa, E. B. & Kozak, M. J. (1986). Emotional processing of fear: exposure to corrective information. *Psychol. Bull.* 99, 20–35.
- Fortenbaugh, F. C., DeGutis, J., & Esterman, M. (2017). Recent theoretical, neural, and clinical advances in sustained attention research. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1396*(1), 70-91.
- Fovet, T., Jardri, R., & Linden, D. (2015). Current issues in the use of fMRI-based neurofeedback to relieve psychiatric symptoms. *Current pharmaceutical design, 21*(23), 3384-3394.
- Fitzpatrick, J. J. (2017). World mental health day. *Archives of Psychiatric Nursing, 31*(6), 531.
- Gadea, M., Aliño, M., Hidalgo, V., Espert, R., & Salvador, A. (2020). Effects of a single session of SMR neurofeedback training on anxiety and cortisol levels. *Neurophysiologie Clinique, 50*(3), 167-173.

- Gardner, M. J., & Altman, D. G. (1986). Confidence intervals rather than P values: Estimation rather than hypothesis testing. *British Medical Journal*, 292, 746-750.
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers: a review using an integrative framework. *Psychological bulletin*, 134(1), 31.
- Gayman, A. M., Fraser-Thomas, J., Dionigi, R. A., Horton, S., & Baker, J. (2016). Is sport good for older adults? A systematic review of psychosocial outcomes of older adults' sport participation. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 10, 164–185.
- Gazzaley, A., & Nobre, A. C. (2012). Top-down modulation: bridging selective attention and working memory. *Trends in cognitive sciences*, 16(2), 129-135.
- Gevensleben, H., Holl, B., Albrecht, B., Schlamp, D., Kratz, O., Studer, P., ... & Heinrich, H. (2010). Neurofeedback training in children with ADHD: 6-month follow-up of a randomised controlled trial. *European child & adolescent psychiatry*, 19, 715-724.
- Ghaziri, J., Tucholka, A., Larue, V., Blanchette-Sylvestre, M., Reyburn, G., Gilbert, G., ... & Beauregard, M. (2013). Neurofeedback training induces changes in white and gray matter. *Clinical EEG and neuroscience*, 44(4), 265-272.
- Glorfeld, L. W. (1995). An improvement on Horn's Parallel Analysis methodology for selecting the correct number of factors to retain. *Educational and Psychological Measurement*, 55(3), 377-393.
- Göçmen, R., Aktop, A., Pınar, Y., Toktaş, N., & Jandačková, V. K. (2023). The Effect of Heart Rate Variability Biofeedback on Basketball Performance Tests.
- Gökşin, B., Yılmaz, B., & İçöz, K. (2019). Improving short-term memory performance of healthy young males using alfa band neurofeedback. *NeuroRegulation*, 6(1), 15-15.
- Gołaś, A., Nitychoruk, M., Żak, M., Kowalczyk, M., Ignatjeva, A., & Maszczyk, A. (2019). Optimizing visual processing efficiency using neurofeedback training in judo athletes. *Archives of Budo Science of Martial Arts and Extreme Sports*, 15, 105-112.
- Gong, A., Gu, F., Nan, W., Qu, Y., Jiang, C., & Fu, Y. (2021). A review of neurofeedback training for improving sport performance from the perspective of user experience. *Frontiers in Neuroscience*, 15.

- Gong, A., Nan, W., Yin, E., Jiang, C., & Fu, Y. (2020). Efficacy, trainability, and neuroplasticity of SMR vs. Alfa rhythm shooting performance neurofeedback training. *Frontiers in human neuroscience, 14*, 94.
- Gonzalez-Campos, G., Valdivia-Moral, P., Luisa Zagalaz, M., & Romero, S. (2015). The self-confidence and control of stress in soccer players: Review of studies. *Revista Iberoamericana De Psicologia Del Ejercicio Y El Deporte, 10*(1), 95-101.
- Gordon, S., Todder, D., Deutsch, I., Garbi, D., Alkobi, O., Shriki, O., ... & Meiran, N. (2020). Effects of neurofeedback and working memory-combined training on executive functions in healthy young adults. *Psychological Research, 84*, 1586-1609.
- Gorman, J. M., Sloan, R. P. (2000). Heart rate variability in depressive and anxiety disorders. *Am. Hear. J., 140*, S77–S83.
- Graczyk, M., Pachalska, M., Ziolkowski, A., Manko, G., Lukaszewska, B., Kochanowicz, K., ... & Kropotow, I. D. (2014). Neurofeedback training for peak performance. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 21*(4).
- Gray, J. A. & McNaughton, N. (2000). *The Neuropsychology of Anxiety: an Enquiry into the Functions of the Septo-Hippocampal System. Oxford Univ. Press.*
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics.* New York: Wiley.
- Greene, J., Cohen, D., Siskowski, C., & Toyinbo, P. (2017). The relationship between family caregiving and the mental health of emerging young adult caregivers. *The journal of behavioral health services & research, 44*, 551-563.
- Grupe, D. W., & Nitschke, J. B. (2013). Uncertainty and anticipation in anxiety: an integrated neurobiological and psychological perspective. *Nature Reviews Neuroscience, 14*(7), 488-501.
- Gruzelier, J. (2009). A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cognitive processing, 10*(1), 101-109.
- Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance. III: a review of methodological and theoretical considerations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 44*, 159-182.

- Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance. I: A review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 124-141.
- Gruzelier, J. H., Egner, T., & Vernon, D. J. (2006). Validating the efficacy of neurofeedback for optimising performance. *Progress in Brain Research*, 159, 421–431. doi: 10.1016/S0079-6123(06)59027-2.
- Gruzelier, J. H., Inoue, A., Smart, R., Steed, A., & Steffert, T. (2010). Acting performance and flow state enhanced with sensory-motor rhythm neurofeedback comparing ecologically valid immersive VR and training screen scenarios. *Neuroscience Letters*, 480(2), 112–116. doi: 10.1016/j.neulet.2010.06.019.
- Gruzelier, J. H., Thompson, T., Redding, E., Brandt, R., & Steffert, T. (2014). Application of alpha/theta neurofeedback and heart rate variability training to young contemporary dancers: State anxiety and creativity. *International Journal of Psychophysiology*, 93(1), 105-111.
- Gruzelier, J., Inoue, A., Smart, R., Steed, A., & Steffert, T. (2010). Acting performance and flow state enhanced with sensory-motor rhythm neurofeedback comparing ecologically valid immersive VR and training screen scenarios. *Neuroscience letters*, 480(2), 112-116.
- Gu, F., Gong, A., Qu, Y., Bao, A., Wu, J., Jiang, C., & Fu, Y. (2022). From Expert to Elite?—Research on Top Archer’s EEG Network Topology. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 759330.
- Guariglia P., Giaimo F., Palmiero M., Piccardi L. (2019). Normative data and validation of the Italian translation of the Working Memory Questionnaire (WMQ). *Applied Neuropsychology: Adult*. 1-14.
- Guez, J., Rogel, A., Getter, N., Keha, E., Cohen, T., Amor, T., ... & Todder, D. (2015). Influence of electroencephalography neurofeedback training on episodic memory: A randomized, sham-controlled, double-blind study. *Memory*, 23(5), 683-694.
- Guez, J., Rogel, A., Getter, N., Keha, E., Cohen, T., Amor, T., ... Gordon, S., Meiran, N., & Todder, D. (2015). Influence of electroencephalography neurofeedback training on episodic memory: A randomized, sham-controlled, double-blind study. *Memory*, 23(5), 683–694. doi: 10.1080 /09658211.2014.921713.

- Guru, C. S., Krishnan, A., Mahajan, U., & Sharma, D. (2020). Heart Rate Values During Shooting is a Field-Side Performance Analysis Tool in Archery-A study of Elite Indian Archers. *International Journal of Sport Studies for Health*, 3(1).
- Hachinski, V., Iadecola, C., Petersen, R. C., Breteler, M. M., Nyenhuis, D. L., Black, S. E., ... & Leblanc, G. G. (2006). National Institute of Neurological Disorders and Stroke–Canadian stroke network vascular cognitive impairment harmonization standards. *Stroke*, 37(9), 2220-2241.
- Hammond, D. C. (2005). Neurofeedback to improve physical balance, incontinence, and swallowing. *J. Neurother.*, 9(1): 27-36.
- Hammond, D. C. (2005). Neurofeedback treatment of depression and anxiety. *J Adult Dev.*, 12(2-3):131-137.
- Hammond, D. C. (2007). What is neurofeedback?. *Journal of neurotherapy*, 10(4), 25-36.
- Hammond, D. C., & Kirk, L. (2008). First, do no harm: Adverse effects and the need for practice standards in neurofeedback. *Journal of Neurotherapy*, 12(1), 79-88.
- Hammond, D. C. (2010). Neurofeedback Treatment of Anger: Preliminary Reports. *Journal of Neurotherapy*, 14(2):162-9.
- Hammond, D.C., (2011). What is Neurofeedback: An Update. *Journal of Neurotherapy* 15, 305-336.
- Hao, Z., He, C., Ziqian, Y., Haotian, L., & Xiaoli, L. (2022). Neurofeedback training for children with ADHD using individual beta rhythm. *Cognitive Neurodynamics*, 1-11.
- Hardt, J. V., & Kamiya, J. (1978). Anxiety change through electroencephalographic alfa feedback seen only in high anxiety subjects. *Science*, 201(4350), 79-81.
- Harmon-Jones, E., & Gable, P. A. (2018). On the role of asymmetric frontal cortical activity in approach and withdrawal motivation: An updated review of the evidence. *Psychophysiology*, 55(1), doi: 10.1111/psyp.12879.
- Harris, D. J., Vine, S. J., & Wilson, M. R. (2017). Is flow really effortless? The complex role of effortful attention. *Sport, Exercise, and Performance Psychology*, 6(1), 103. doi: 10.1037/spy0000083.

- Harvey, R. H., Beauchamp, M. K., Saab, M., & Beauchamp, P. (2011). Biofeedback reaction-time training: *Toward Olympic gold. Biofeedback*, 39(1), 7-14.
- Hatfield, B.D. (2018). Brain Dynamics and Motor Behavior: A Case for Efficiency and Refinement for Superior Performance. *Kinesiol. Rev.*, 7, 42–50.
- Heishman, A. D., Curtis, M. A., Saliba, E., Hornett, R. J., Malin, S. K., & Weltman, A. L. (2018). Noninvasive assessment of internal and external player load: implications for optimizing athletic performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(5), 1280-1287.
- Hernández-Mendo, A., Morales-Sánchez, V., & Peñalver, I. (2014). A replication of the psychometric properties of the sports performance psychological inventory. *Revista de Psicología del Deporte*, 23(2), 311-324.
- Hirsch, L. J., Fong, M. W., Leitinger, M., LaRoche, S. M., Beniczky, S., Abend, N. S., ... & Gaspard, N. (2021). American Clinical Neurophysiology Society's standardized critical care EEG terminology: 2021 version. *Journal of clinical neurophysiology: official publication of the American Electroencephalographic Society*, 38(1), 1.
- Hirsch, L. J., LaRoche, S. M., Gaspard, N., Gerard, E., Svoronos, A., Herman, S. T., ... & Drislane, F. W. (2013). American clinical neurophysiology society's standardized critical care EEG terminology: 2012 version. *Journal of clinical neurophysiology*, 30(1), 1-27.
- Hoehn-Saric, R., & McLeod, D. R. (2000). Anxiety and arousal: physiological changes and their perception. *Journal of affective disorders*, 61(3), 217-224.
- Hofmann, W., Schmeichel, B. J., & Baddeley, A. D. (2012). Executive functions and selfregulation. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(3), 174–180.
- Holtmann, M., Sonuga-Barke, E., Cortese, S., & Brandeis, D. (2014). Neurofeedback for ADHD: a review of current evidence. *Child and Adolescent Psychiatric Clinics*, 23(4), 789-806.
- Hong, K. S., Naseer, N., & Kim, Y. H. (2015). Classification of prefrontal and motor cortex signals for three-class fNIRS-BCI. *Neuroscience letters*, 587, 87-92.
- Hong, N. Q., Pluye, P., Fabregues, S., Bartlett, G., Boardman, F., Cargo, M., Dagenais, P., Gagnon, M.-P., Griffiths, F., Nicolau, B., O'cathain, A., Rousseau, M.-C., & Vedel, I. (2018). Mixed methods appraisal tool (MMAT). Version 2018. User guide.



- Hosseini, F., & Norouzi, E. (2017). The effect of neurofeedback training on self-talk and performance in elite and non-elite volleyball player. *Med. dello sport*.
- Hou, Y., Zhang, S., Li, N., Huang, Z., Wang, L., & Wang, Y. (2021). Neurofeedback training improves anxiety trait and depressive symptom in GAD. *Brain and Behavior*, *11*(3), e02024.
- Hsueh, J. J., Chen, T. S., & Shaw, F. Z. (2012, November). Neurofeedback training on memory enhancement in humans. In *2012 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)* (pp. 9-12). IEEE.
- Hsueh, J. J., Chen, T. S., Chen, J. J., Shaw, F. Z. (2016). Neurofeedback training of EEG alpha rhythm enhances episodic and working memory. *Human brain mapping*, *37*(7):2662-75.
- Hu, J., Jiang, H., Liang, H., & Yang, H. (2018). Change of cerebral structural plasticity of track athletes based on magnetic resonance imaging. *NeuroQuantology*, *16*, 6.
- Hembree, R. (1990). The nature, effects, and relief of mathematics anxiety. *Journal for research in mathematics education*, *21*(1), 33-46.
- Iqbal, S., Gupta, S., & Venkatarao, E. (2015). Stress, anxiety & depression among medical undergraduate students & their socio-demographic correlates. *The Indian journal of medical research*, *141*(3), 354.
- Ikkai, A., & Curtis, C. E. (2011). Common neural mechanisms supporting spatial working memory, attention and motor intention. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1428-1434.
- Ismail, M., & Amer, A. (2016). University rugby sevens players anxiety and confident scores between first game and second game based on different position of play. *International Journal of Psychology and Behavioral Sciences*, *6*(2), 53-57.
- Israsena, P., Jirayucharoensak, S., Hemrungronj, S., & Pan-Ngum, S. (2021). Brain exercising games with consumer-grade single-channel electroencephalogram neurofeedback: pre-post intervention study. *JMIR Serious Games*, *9*(2), e26872.
- Isyanov, E. V., & Calamari, J. E. (2004). Does stress perception mediate the relationship between anxiety sensitivity and anxiety and depression symptoms?. *Anxiety, Stress & Coping*, *17*(2), 153-162.

- Jack Jr, C. R., Albert, M., Knopman, D. S., McKhann, G. M., Sperling, R. A., Carillo, M., ... & Phelps, C. H. (2011). Introduction to revised criteria for the diagnosis of Alzheimer's disease: National Institute on Aging and the Alzheimer Association Workgroups. *Alzheimer's & dementia: the journal of the Alzheimer's Association*, 7(3), 257.
- Jackson, L. E., Han, Y. J., & Evans, L. H. (2023). The efficacy of electroencephalography neurofeedback for enhancing episodic memory in healthy and clinical participants: A systematic qualitative review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 105455.
- Jeddi, E. M., & Nazari, M. A. (2013). Effectiveness of EEG-biofeedback on attentiveness, working memory and quantitative electroencephalography on reading disorder. *Iranian Journal of Psychiatry and Behavioral Sciences*, 7(2), 35.
- Jensen, O., & Mazaheri, A. (2010). Shaping functional architecture by oscillatory alfa activity: gating by inhibition. *Frontiers in human neuroscience*, 4, 186.
- Jeon, Y., Nam, C.S., Kim, Y.-J., & Whang, M.C. (2011). Event-related (De) synchronization (ERD/ERS) during motor imagery tasks: Implications for brain-computer interfaces. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(5), 428–436. doi: 10.1016/j.ergon.2011.03.005.
- Jeunet, C., Tonin, L., Albert, L., Chavarriaga, R., Bideau, B., Argelaguet, F., ... & Kulpa, R. (2020). Uncovering EEG correlates of covert attention in soccer goalkeepers: towards innovative sport training procedures. *Scientific Reports*, 10(1), 1705.
- Jiang, H., & Farquharson, K. (2018). Are working memory and behavioral attention equally important for both reading and listening comprehension? A developmental comparison. *Reading and writing*, 31, 1449-1477.
- Jiang, Y. V., Lee, H. J., Asaad, A., & Remington, R. (2016). Similarity effects in visual working memory. *Psychonomic bulletin & review*, 23, 476-482.
- Jiang, Y., Jessee, W., Hoyng, S., Borhani, S., Liu, Z., Zhao, X., ... & Cerel-Suhl, S. (2022). Sharpening working memory with real-time electrophysiological brain signals: which neurofeedback paradigms work?. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14, 160..

- Jimenez Morgan, S., & Molina Mora, J. A. (2017). Effect of heart rate variability biofeedback on sport performance, a systematic review. *Applied psychophysiology and biofeedback, 42*, 235-245.
- Jirayucharoensak, S., Israsena, P., Pan-Ngum, S., Hemrungronj, S., & Maes, M. (2019). A game-based neurofeedback training system to enhance cognitive performance in healthy elderly subjects and in patients with amnesic mild cognitive impairment. *Clinical interventions in aging, 14*, 347.
- Kakhaki, A. S., & Taheri, H. (2017). The Effect of Bio/Neurofeedback Training on Performance, Audio and Visual Attention in Elite Shooters. *International Journal of Applied Exercise Physiology, 6*(3), 85-90.
- Kamiński, J., Brzezicka, A., Gola, M. et al. (2012). Beta band oscillations engagement in human alertness process. *Int J Psychophysiol, 85*(1): 125-128.
- Kamiya, J. (1969). Operant control of the EEG alfa rhythm and some of its reported effects on consciousness. *Alerted states of consciousness, 489*.
- Kamiya, J., (1962). Conditioned discrimination of the EEG alfa rhythm in humans, the Western Psychological. *The Western Psychological, San Francisco, California*.
- Kaptchuk, T. J. (2006). Sham device v inert pill: randomised controlled trial of two placebo treatments. *BMJ, 332*(7538):391-397.
- Katahira, K., Yamazaki, Y., Yamaoka, C., Ozaki, H., Nakagawa, S., & Nagata, N. (2018). EEG correlates of the flow state: A combination of increased frontal theta and moderate frontocentral alfa rhythm in the mental arithmetic task. *Frontiers in psychology, 9*, 300.
- Kavianipoor, H., Farsi, A., & Bahrami, A. (2023). The Effect of Neurofeedback Training on Executive Control Network of Attention and Dart-Throwing Performance in Individuals with Trait Anxiety. *Applied Psychophysiology and Biofeedback, 1-13*.
- Keizer, A. W., Verschoor, M., Verment, R. S., & Hommel, B. (2010). The effect of gamma enhancing neurofeedback on the control of feature bindings and intelligence measures. *International Journal of Psychophysiology, 75*(1), 25-32.
- Kieffaber, P. D., & Dickter, C. L. (2013). EEG methods for the psychological sciences. *EEG Methods for the Psychological Sciences, 1-176*.

- Kim, E. J., Kang, H. W., & Park, S. M. (2021). The effects of psychological skills training for archery players in Korea: Research synthesis using meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(5), 2272.
- Kim, W., Chang, Y., Kim, J., Seo, J., Ryu, K., Lee, E., ... & Janelle, C. M. (2014). An fMRI study of differences in brain activity among elite, expert, and novice archers at the moment of optimal aiming. *Cognitive and Behavioral Neurology*, *27*(4), 173-182.
- Kimura, I., Noyama, H., Onagawa, R., Takemi, M., Osu, R., & Kawahara, J. I. (2023). Efficacy of neurofeedback training for improving attentional performance in healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *bioRxiv*, 2023-03.
- Kirk, H. W. (Ed.). (2015). *Restoring the brain: Neurofeedback as an integrative approach to health*. CRC Press.
- Kora, P., Meenakshi, K., Swaraja, K., Rajani, A., & Raju, M. S. (2021). EEG based interpretation of human brain activity during yoga and meditation using machine learning: A systematic review. *Complementary therapies in clinical practice*, *43*, 101329.
- Klimesch, W. (1996). Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization. *International journal of psychophysiology*, *24*(1-2), 61-100.
- Klimesch, W. (1999). EEG alfa and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain research reviews*, *29*(2-3), 169-195.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., & Hanslmayr, S. (2006). Upper alfa ERD and absolute power: their meaning for memory performance. *Progress in brain research*, *159*, 151-165.
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations: The inhibition–timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, *53*(1), 63–88.
- Knudsen, E. I. (2007). Fundamental components of attention. *Annu. Rev. Neurosci.*, *30*, 57-78.
- Kober, S. E., Ninaus, M., Witte, M., Buchrieser, F., Grössinger, D., Fischmeister, F. P. S., ... & Wood, G. (2022). Triathletes are experts in self-regulating physical activity–But what about self-regulating neural activity?. *Biological Psychology*, *173*, 108406.

- Kober, S. E., Witte, M., Ninaus, M., Koschutnig, K., Wiesen, D., Zaiser, G., et al. (2017). Ability to gain control over one's own brain activity and its relation to spiritual practice: A multimodal imaging study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 1–12.
- Kober, S. E., Witte, M., Ninaus, M., Neuper, C., & Wood, G. (2013). Learning to modulate one's own brain activity: The effect of spontaneous mental strategies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1–12.
- Kober, S. E., Witte, M., Stangl, M., Våljamäe, A., Neuper, C., & Wood, G. (2015). Shutting down sensorimotor interference unblocks the networks for stimulus processing: An SMR neurofeedback training study. *Clinical Neurophysiology*, 126(1), 82-95.
- Kopańska, M., Dejniewicz-Velitchkov, A., Bartman, P., & Szczygielski, J. (2022). MiniQEEG and Neurofeedback in Diagnosis and Treatment of COVID-19-Related Panic Attacks: A Case Report. *Brain Sciences*, 12(11), 1541.
- Kouijzer, M.E., de Moor, J.M., Gerrits, B.J., Buitelaar, J.K., van Schie, H.T., 2009. Long-term effects of neurofeedback treatment in autism. *Research in Autism Spectrum Disorders* 3, 496-501.
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological psychology*, 84(3), 394-421.
- Krigolson, O. E., Williams, C. C., & Colino, F. L. (2017). Using portable EEG to assess human visual attention. In *Augmented Cognition. Neurocognition and Machine Learning: 11th International Conference, AC 2017, Held as Part of HCI International 2017, Vancouver, BC, Canada, July 9-14, 2017, Proceedings, Part I 11* (pp. 56-65). Springer International Publishing.
- Kuan, G., Morris, T., Kueh, Y. C., & Terry, P. C. (2018). Effects of relaxing and arousing music during imagery training on dart-throwing performance, physiological arousal indices, and competitive state anxiety. *Frontiers in psychology*, 9, 14.
- Kübler, A., Neumann, N., Wilhelm, B., Hinterberger, T., & Birbaumer, N. (2004). Predictability of brain-computer communication. *Journal of Psychophysiology*, 18(2/3), 121-129.

- Kwan, Y., Yoon, S., Suh, S., & Choi, S. (2022). A Randomized Controlled Trial Comparing Neurofeedback and Cognitive-Behavioral Therapy for Insomnia Patients: Pilot Study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 47(2), 95-106.
- Lam, W., Maxwell, J., & Masters, R. (2009). Analogy versus explicit learning of a modified basketball shooting task: Performance and kinematic outcomes. *Journal of Sports Sciences*, 27(2), 179–191. doi: 10.1080/02640410802448764.
- Landers, D. M., Han, M., Salazar, W., & Petruzzello, S. J. (1994). Effects of learning on electroencephalographic and electrocardiographic patterns in novice archers. *International Journal of Sport Psychology*.
- Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Salazar, W., Crews, D. J., Kubitz, K. A., Gannon, T. L., & Han, M. (1991). The influence of electrocortical biofeedback on performance in pre-elite archers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*.
- Lane, A. M., Jones, L., & Stevens, M. J. (2002). Coping with failure: the effects of self-esteem and coping on changes in self-efficacy. *Journal of Sport Behavior*, 25(4).
- Larsen, S., Sherlin, L., 2013. Neurofeedback: An Emerging Technology for Treating Central Nervous System Dysregulation. *Psychiatric Clinics of North America* 36, 163-168.
- Laursen, B., & Hartl, A. C. (2013). Understanding loneliness during adolescence: Developmental changes that increase the risk of perceived social isolation. *Journal of Adolescence*, 36(6), 1261-1268.
- Lavy, Y., Dwolatzky, T., Kaplan, Z., Guez, J., & Todder, D. (2019). Neurofeedback improves memory and peak alfa frequency in individuals with mild cognitive impairment. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 44, 41-49.
- Leary, M. R., Adams, C. E., & Tate, E. B. (2006). Hypo-egoic self-regulation: Exercising self-control by diminishing the influence of the self. *Journal of personality*, 74(6), 1803–1831.
- LeDoux, J. (2020). *Ansia: Come il cervello ci aiuta a capirla*. Raffaello Cortina Editore.
- Lee, K. (2009). Evaluation of attention and relaxation levels of archers in shooting process using brain wave signal analysis algorithms. *Sci Sensitivity*, 12(3), 341-350.
- Lee, S. A. (2020). Coronavirus Anxiety Scale: A brief mental health screener for COVID-19 related anxiety. *Death studies*, 44(7), 393-401.

- Lehrer, P., Kaur, K., Sharma, A., Shah, K., Huseby, R., Bhavsar, J., & Zhang, Y. (2020). Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: A systematic review and meta-analysis. *Applied psychophysiology and biofeedback, 45*, 109-129.
- Lemay, V., Hoolahan, J., & Buchanan, A. (2019). Impact of a yoga and meditation intervention on students' stress and anxiety levels. *American journal of pharmaceutical education, 83*(5).
- Leocani, L., Cohen, L.G., Wassermann, E.M., Ikoma, K., & Hallett, M. (2000). Human corticospinal excitability evaluated with transcranial magnetic stimulation during different reaction time paradigms. *Brain, 123*(6), 1161–1173. doi: 10.1093/brain/123.6.1161.
- Levy, J. J., & Baldwin, D. R. (2019). Psychophysiology and biofeedback of sport performance.
- Liebert, R. M., & Morris, L. W. (1967). Cognitive and emotional components of test anxiety: A distinction and some initial data. *Psychological reports, 20*(3), 975-978.
- Lisman, J. E., & Idiart, M. A. (1995). Storage of  $7 \pm 2$  short-term memories in oscillatory subcycles. *Science, 267*(5203), 1512-1515.
- Liu, Y., Harihara Subramaniam, S. C., Sourina, O., Shah, E., Chua, J., & Ivanov, K. (2018). NeuroFeedback training for enhancement of the focused attention related to athletic performance in elite rifle shooters. In *Transactions on Computational Science XXXII: Special Issue on Cybersecurity and Biometrics* (pp. 106-119). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Liu, Y., Subramaniam, S. C. H., Sourina, O., Shah, E., Chua, J., and Ivanov, K. (2017). "NFB training for rifle shooters to improve cognitive ability," in 2017 International Conference on Cyberworlds (Singapore), 186–189. doi: 10.1109/CW.2017.36.
- Lo, P. C., Shr Da Wu, & Yueh Chang Wu (2004). Meditation training enhances the efficacy of BCI system control. In *Networking, Sensing and Control, 2004 IEEE International Conference on: Networking, Sensing and Control, 2004* (Vol. 2, 825–828).

- Lodder, G. M., Scholte, R. H., Goossens, L., & Verhagen, M. (2017). Loneliness in early adolescence: Friendship quantity, friendship quality, and dyadic processes. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology*, 46(5), 709-720.
- Loo, S. K., and Barkley, R. A. (2005). Clinical utility of EEG in attention deficit hyperactivity disorder. *Appl. Neuropsychol.* 12, 64–76.
- Loriette, C., Ziane, C., & Hamed, S. B. (2021). Neurofeedback for cognitive enhancement and intervention and brain plasticity. *Revue Neurologique*, 177(9), 1133-1144.
- Loze, G. M., Collins, D., & Holmes, P. S. (2001). Pre-shot EEG alpha-power reactivity during expert air-pistol shooting: A comparison of best and worst shots. *Journal of sports sciences*, 19(9), 727-733.
- Lubar, J.F., Shouse, M.N., 1976. EEG and behavioral changes in a hyperkinetic child concurrent with training of the sensorimotor rhythm (SMR): a preliminary report. *Biofeedback Self Regul* 1, 293-306.
- Lucini, D., Di Fede, G., Parati, G., Pagani, M. (2005). Impact of Chronic Psychosocial Stress on Autonomic Cardiovascular Regulation in Otherwise Healthy Subjects. *Hypertension*, 46, 1201–1206.
- Lundqvist, M., Stigler, J., Cedervall, T., Berggard, T., Flanagan, M. B., Lynch, I., ... & Dawson, K. (2011). The evolution of the protein corona around nanoparticles: a test study. *ACS nano*, 5(9), 7503-7509.
- Lustig, C., Shah, P., Seidler, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (2009). Aging, training, and the brain: a review and future directions. *Neuropsychology review*, 19, 504-522.
- Maleki Nezamabad, A., Mohammadzadeh, H., & Eskandarnejad, M. (2022). The effect of biofeedback exercises on some physiological factors and performance of skilled archers. *Journal of Sport Management and Motor Behavior*, 18(36), 137-125.
- Maller, R. G., & Reiss, S. (1992). Anxiety sensitivity in 1984 and panic attacks in 1987. *Journal of anxiety disorders*, 6(3), 241-247.
- Markiewicz, R. (2017). The use of EEG Biofeedback/Neurofeedback in psychiatric rehabilitation. *Psychiatria Polska*, 51(6).



- Martens, R., Burton, D., Rivkin, F., & Simon, J. (1980). Reliability and validity of the competitive state anxiety inventory (CSAI). *Psychology of motor behavior and sport*, 91-99.
- Martin, R. D., & Naziruddin, Z. (2020). Systematic review of student anxiety and performance during objective structured clinical examinations. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*, 12(12), 1491-1497.
- Maruyama, S., Fukunaga, M., Sugawara, S. K., Hamano, Y. H., Yamamoto, T., & Sadato, N. (2021). Cognitive control affects motor learning through local variations in GABA within the primary motor cortex. *Scientific Reports*, 11(1), 18566.
- Marzbani, H., Marateb, H. R., & Mansourian, M. (2016). Neurofeedback: a comprehensive review on system design, methodology and clinical applications. *Basic and clinical neuroscience*, 7(2), 143.
- Massar, S. A. A., Rossi, V., Schutter, D. J. L. G., Kenemans, J. L. (2012). Baseline EEG theta/beta ratio and punishment sensitivity as biomarkers for feedback-related negativity (FRN) and risk-taking. *Clinical Neurophysiology*, 123(10):1958–1965.
- Massar, S. A., Kenemans, J. L., Schutter, D. J. (2014). Resting-state EEG theta activity and risk learning: Sensitivity to reward or punishment? *International Journal of Psychophysiology*, 91(3):172–177.
- Massuça, L. M., Fragoso, I., & Teles, J. (2014). Attributes of top elite team-handball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(1), 178-186.
- Masters, R. S. (1992). Knowledge, knerves and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British Journal of Psychology*, 83(3), 343–358. doi: 10.1111/j.2044- 8295.1992.tb02446.x.
- Maszczyk A., Gołaś A., Pietraszewski P., Kowalczyk M., & Cieszczyk P., Kochanowicz A., Smółka W., & Zajac A. (2018). Neurofeedback for the enhancement of dynamic balance of judokas. *Biology of Sport*. 35. 10.5114/biolsport.2018.71488.
- Maszczyk, A., Dobrakowski, P., Nitychoruk, M., Żak, M., Kowalczyk, M., & Toborek, M. (2020). The Effect of Neurofeedback Training on the Visual Processing Efficiency in Judo Athletes, *Journal of Human Kinetics*, 71(1), 219-227.

- Maszczyk, A., Dobrakowski, P., Nitychoruk, M., Żak, M., Kowalczyk, M., & Toborek, M. (2020). The effect of neurofeedback training on the visual processing efficiency in judo athletes. *Journal of human kinetics*, 71(1), 219-227.
- Maszczyk, A., Gołaś, A., Pietraszewski, P., Kowalczyk, M., Ciężczyk, P., Kochanowicz, A., ... & Zając, A. (2018). Neurofeedback for the enhancement of dynamic balance of judokas. *Biology of sport*, 35(1), 99-102.
- Matar Boumosleh, J., & Jaalouk, D. (2017). Depression, anxiety, and smartphone addiction in university students-A cross sectional study. *PloS one*, 12(8), e0182239.
- Mathew, S. J., Price, R. B., & Charney, D. S. (2008, May). Recent advances in the neurobiology of anxiety disorders: implications for novel therapeutics. In *American Journal of Medical Genetics Part C: Seminars in Medical Genetics* (Vol. 148, No. 2, pp. 89-98). Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.
- Maugeri, G., Castrogiovanni, P., Battaglia, G., Pippi, R., D'Agata, V., Palma, A., ... & Musumeci, G. (2020). The impact of physical activity on psychological health during Covid-19 pandemic in Italy. *Heliyon*, 6(6).
- Maurer, U., Brem, S., Liechti, M., Maurizio, S., Michels, L., & Brandeis, D. (2015). Frontal midline theta reflects individual task performance in a working memory task. *Brain Topography*, 28, 127–134. doi: 10.1007/s10548-014-0361-y.
- McBride, J., Zhao, X., Munro, N., Smith, C., Jicha, G., & Jiang, Y. (2013). Resting EEG discrimination of early stage Alzheimer's disease from normal aging using inter-channel coherence network graphs. *Annals of biomedical engineering*, 41, 1233-1242.
- McGinley, M. J., Vinck, M., Reimer, J., Batista-Brito, R., Zaghera, E., Cadwell, C. R., ... & McCormick, D. A. (2015). Waking state: rapid variations modulate neural and behavioral responses. *Neuron*, 87(6), 1143-1161.
- McNair, D. M., Lorr, M., & Droppleman, L. F. (1992). *EdITS Manual for the Profile of Mood States (POMS)*. Educational and industrial testing service.
- Memmert, D. (2015) "Attention in sports," in *The Handbook of Attention*, eds J. Fawcett, E. F. Risko, and A. Kingstone Cambridge: MIT Press.

- Mennella, R., Patron, E., & Palomba, D. (2017). Frontal alpha asymmetry neurofeedback for the reduction of negative affect and anxiety. *Behaviour research and therapy*, 92, 32-40.
- Mi, Y., Katkov, M., & Tsodyks, M. (2017). Synaptic correlates of working memory capacity. *Neuron*, 93(2), 323-330.
- Micoulaud-Franchi, J. A., Jeunet, C., Pelissolo, A., & Ros, T. (2021). Eeg neurofeedback for anxiety disorders and post-traumatic stress disorders: a blueprint for a promising brain-based therapy. *Current psychiatry reports*, 23, 1-14.
- Mierau, A., Hülsdünker, T., & Strüder, H. K. (2015). Brain Oscillations and Athletic Performance. *Sports Performance*, 25-36.
- Mikicin M. & Kowalczyk M (2015) Audio-visual and autogenic relaxation alter amplitude of alfa EEG band, causing improvements in work performance in athletes. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 40: 219–227.
- Mikicin, M., Mróz, A., Karczewska-Lindinger, M., Malinowska, K., Mastalerz, A., & Kowalczyk, M. (2020). Effect of the neurofeedback-EEG training during physical exercise on the range of mental work performance and individual physiological parameters in swimmers. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 45, 49-55.
- Mikicin, M., Orzechowski, G., Jurewicz, K., Paluch, K., Kowalczyk, M., and Wróbel, A. (2015). Brain-training for physical performance: a study of EEG-NFB and alfa relaxation training in athletes. *Acta Neurobiol. Exp.* 75, 434–445.
- Mikicin, M., Sczypanska, M., & Skwarek, K. (2018). Neurofeedback needs support! Effects of neurofeedback-EEG training in terms of the level of attention and arousal control in sports shooters. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 10(3), 8.
- Mikicin, Mirosław & Orzechowski, Grzegorz. (2022). Neuronal activity in the brain changes during exercise in attention states, warm-up, submaximal effort, and recovery, after Neurofeedback-EEG training in motion. *Acta Neuropsychologica*. 20.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2), 81.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24(1), 167-202.

- Milton, J., Solodkin, A., Hluštík, P., & Small, S. L. (2007). The mind of expert motor performance is cool and focused. *Neuroimage*, *35*(2), 804-813.
- Mimenza-Alvarado, A. J., Aguilar-Navarro, S. G., Martinez-Carrillo, F. M., Ríos-Ponce, A. E., & Villafuerte, G. (2021). Use of Fast Gamma Magnetic Stimulation Over the Left Prefrontal Dorsolateral Cortex for the Treatment of MCI and Mild Alzheimer's Disease: A Double-Blind, Randomized, Sham-Controlled, Pilot Study. *Frontiers in Neurology*, *15*, 1543.
- Mineka, S., & Zinbarg, R. (2006). A contemporary learning theory perspective on the etiology of anxiety disorders: it's not what you thought it was. *American psychologist*, *61*(1), 10.
- Mirifar, A., Beckmann, J., and Ehrlenspiel, F. (2017). Neurofeedback as supplementary training for optimizing athletes' performance: a systematic review with implications for future research. *Neurosci. Biobehav. Rev.* *75*, 419–432.
- Mirifar, A., Keil, A., Beckmann, J., & Ehrlenspiel, F. (2019). No effects of neurofeedback of beta band components on reaction time performance. *Journal of Cognitive Enhancement*, *3*, 251-260.
- Moeller, R. W., & Seehuus, M. (2019). Loneliness as a mediator for college students' social skills and experiences of depression and anxiety. *Journal of adolescence*, *73*, 1-13.
- Monastra, V. J., Lynn, S., Linden, M., Lubar, J. F., Gruzelier, J., & La Vaque, T. J. (2006). Electroencephalographic biofeedback in the treatment of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of neurotherapy*, *9*(4), 5-34.
- Mongillo, G., Barak, O., & Tsodyks, M. (2008). Synaptic theory of working memory. *Science*, *319*(5869), 1543-1546.
- Morgenroth, E., Saviola, F., Gilleen, J., Allen, B., Lührs, M., Eysenck, M. W., & Allen, P. (2020). Using connectivity-based real-time fMRI neurofeedback to modulate attentional and resting state networks in people with high trait anxiety. *NeuroImage: Clinical*, *25*, 102191.
- Morris, L. W., & Liebert, R. M. (1970). Relationship of cognitive and emotional components of test anxiety to physiological arousal and academic performance. *Journal of consulting and clinical psychology*, *35*(3), 332.

- Mottola, F., Blanchfield, A., Hardy, J., & Cooke, A. (2021). EEG neurofeedback improves cycling time to exhaustion. *Psychology of Sport and Exercise*, 55, 101944.
- Mowrer, O. H. & Lamoreaux, R. R. (1946). Fear as an intervening variable in avoidance conditioning. *J. Comp. Psychol.* 39, 29–50.
- Naas, A., Rodrigues, J., Knirsch, J. P., & Sonderegger, A. (2019). Neurofeedback training with a low-priced EEG device leads to faster alpha enhancement but shows no effect on cognitive performance: A single-blind, sham-feedback study. *PLoS One*, 14(9), e0211668.
- Nan, W., Qu, X., Yang, L., Wan, F., Hu, Y., Mou, P., Mak, P. I., Mak, P. U., Vai, M. I., Rosa, A. (2015). Beta/theta neurofeedback training effects in physical balance of healthy people. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, 7-12, Toronto, Canada 2015 (pp. 1213-1216). Springer, Cham.
- Nan, W., Rodrigues, J. P., Ma, J., Qu, X., Wan, F., Mak, P. I., ... & Rosa, A. (2012). Individual alpha neurofeedback training effect on short term memory. *International journal of psychophysiology*, 86(1), 83-87.
- Nan, W., Rodrigues, J. P., Ma, J., Qu, X., Wan, F., Mak, P.-I., ... Rosa, A. (2012). Individual alpha neurofeedback training effect on short term memory. *International Journal of Psychophysiology*, 86(1), 83–87.
- Nan, W., Wan, M., Jiang, Y., Shi, X., Wan, F., & Cai, D. (2022). Alpha/theta ratio neurofeedback training for attention enhancement in normal developing children: A brief report. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 47(3), 223-229.
- Nawaz, R., Wood, G., Nisar, H., & Yap, V. V. (2023). Exploring the Effects of EEG-Based Alfa Neurofeedback on Working Memory Capacity in Healthy Participants. *Bioengineering*, 10(2), 200.
- Nicholson, A. A., Ros, T., Densmore, M., Frewen, P. A., Neufeld, R. W., Théberge, J., ... & Lanius, R. A. (2020). A randomized, controlled trial of alpha-rhythm EEG neurofeedback in posttraumatic stress disorder: A preliminary investigation showing evidence of decreased PTSD symptoms and restored default mode and salience network connectivity using fMRI. *NeuroImage: Clinical*, 28, 102490.

- Nien, J. T., Gill, D. L., Chou, T. Y., Liu, C. S., Geng, X., Hung, T. M., & Chang, Y. K. (2023). Effect of brief mindfulness and relaxation inductions on anxiety, affect and brain activation in athletes. *Psychology of Sport and Exercise*, 67, 102422.
- Nigbur, R., Ivanova, G., & Stürmer, B. (2011). Theta power as a marker for cognitive interference. *Clinical Neurophysiology*, 122, 2185–2194. doi: 10.1016/j.clinph.2011.03.030.
- Ninaus, M., Kober, S., Witte, M., Koschutnig, K., Neuper, C., & Wood, G. (2015). Brain volumetry and self-regulation of brain activity relevant for neurofeedback. *Biological Psychology*, 110, 126–133.
- Ninaus, M., Kober, S., Witte, M., Koschutnig, K., Stangl, M., Neuper, C., & Wood, G. (2013). Neural substrates of cognitive control under the belief of getting neurofeedback training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(914), 1–10.
- Niv, S. (2013). Clinical efficacy and potential mechanisms of neurofeedback. *Personality and Individual Differences*, 54(6), 676–686.
- Noonan, M. P., Crittenden, B. M., Jensen, O., & Stokes, M. G. (2018). Selective inhibition of distracting input. *Behavioural Brain Research*, 355, 36–47. doi: 10.1016/j.bbr.2017.10.010.
- Noorlag, L., van Klink, N. E., Kobayashi, K., Gotman, J., Braun, K. P., & Zijlmans, M. (2022). High-frequency oscillations in scalp EEG: A systematic review of methodological choices and clinical findings. *Clinical Neurophysiology*.
- Norouzi, E., Hosseini, F. S., Vaezmosavi, M., Gerber, M., Pühse, U., & Brand, S. (2021). Effects of quiet mind training on alfa power suppression and fine motor skill acquisition. *Journal of motor behavior*, 53(3), 399-408.
- Oftadehal, M., Movahedi, Y., Sepahvand, R. (2018). The Effectiveness of Neurofeedback Training on Improving Reaction time Performance in Football Athletes. *Community Health journal*, 11(2):1-9.
- Olatunji, B. O., & Wolitzky-Taylor, K. B. (2009). Anxiety sensitivity and the anxiety disorders: a meta-analytic review and synthesis. *Psychological bulletin*, 135(6), 974.
- Olbrich, S., Sander, C., Matschinger, H., Mergl, R., Trenner, M., Schönknecht, P., & Hegerl, U. (2011). Brain and body. *Journal of Psychophysiology*.

- Ong, N. C., & Chua, J. H. (2021). Effects of psychological interventions on competitive anxiety in sport: A meta-analysis. *Psychology of Sport and Exercise*, 52, 101836.
- Orsini, A., Schiappa, O., Chiacchio, L., & Grossi, D. (1982). Sex differences in a children's spatial serial-learning task. *The Journal of Psychology*, 111(1), 67-71.
- Ouyang, Y., Wang, K., Zhang, T., Peng, L., Song, G., & Luo, J. (2020). The influence of sports participation on body image, self-efficacy, and self-esteem in college students. *Frontiers in psychology*, 10, 3039.
- Pacheco, N. C. (2016). Neurofeedback for peak performance training. *Journal of Mental Health Counseling*, 38(2), 116-123.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ (Clinical research ed.)*, 372, n71. doi: [10.1136/bmj.n71](https://doi.org/10.1136/bmj.n71).
- Palop, J. J., & Mucke, L. (2010). Synaptic depression and aberrant excitatory network activity in Alzheimer's disease: two faces of the same coin?. *Neuromolecular medicine*, 12, 48-55.
- Palva, S., & Palva, J. M. (2007). New vistas for  $\alpha$ -frequency band oscillations. *Trends in neurosciences*, 30(4), 150-158.
- Pamplona, G. S., Heldner, J., Langner, R., Koush, Y., Michels, L., Ionta, S., ... & Salmon, C. E. (2020). Network-based fMRI-neurofeedback training of sustained attention. *Neuroimage*, 221, 117194.
- Pandey, P., Gupta, P., Chaudhary, S., Miyapuram, K. P., & Lomas, D. (2022, July). Real-time sensing and neurofeedback for practicing meditation using simultaneous EEG and eye tracking. In *2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)* (pp. 1-6). IEEE.
- Paret, C., Goldway, N., Zich, C., Keynan, J. N., Hendler, T., Linden, D., et al. (2019). Current progress in real-time functional magnetic resonance-based NFB: methodological challenges and achievements. *NeuroImage* 202:116107. doi: [10.1016/j.neuroimage.2019.116107](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116107).

- Parsaee, S., Alboghbish, S., Abdolahi, H., Alirajabi, R., and Anbari, A. (2018). Effect of a period of selected SMR/Theta NFB training on visual and auditory reaction time in veterans and disabled athletes. *Iran. J. War Public Health* 10:15–20. doi: 10.29252/ijwph.10.1.15.
- Patil, A. U., Lin, C., Lee, S. H., Huang, H. W., Wu, S. C., Madathil, D., & Huang, C. M. (2023). Review of EEG-based neurofeedback as a therapeutic intervention to treat depression. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 111591.
- Patil, A. U., Madathil, D., Fan, Y. T., Tzeng, O. J., Huang, C. M., & Huang, H. W. (2022). Neurofeedback for the education of children with ADHD and specific learning disorders: A review. *Brain Sciences*, 12(9), 1238.
- Paul, M., Ganesan, S., Sandhu, J., & Simon, J. (2012). Effect of sensory motor rhythm neurofeedback on psycho-physiological, electro-encephalographic measures and performance of archery players. *Ibnosina Journal of Medicine and Biomedical Sciences*, 4(02), 32-39.
- Pedrabissi, L., & Santinello, M. (1989). Verifica della validità dello STAI forma Y di Spielberger. *Giunti Organizzazioni Speciali*.
- Peniston, E. G., & Kulkosky, P. J. (1989).  $\alpha$ - $\theta$  Brainwave Training and  $\beta$ -Endorphin Levels in Alcoholics. *Alcoholism: Clinical and experimental research*, 13(2), 271-279.
- Perlman, D., Peplau, L. A., & Goldston, S. E. (1984). Loneliness research: A survey of empirical findings. *Preventing the harmful consequences of severe and persistent loneliness*, 13-46.
- Perry, F. D., Shaw, L., Zaichkowsky, L. (2011). Biofeedback and neurofeedback in sports. *Biofeedback*, 39(3):95-100.
- Peter Gröpel & Christopher Mesagno (2019) Choking interventions in sports: A systematic review, *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 12:1, 176-201, DOI: 10.1080/1750984X.2017.1408134.
- Pfurtscheller, G. (2003). Induced oscillations in the alpha band: Functional meaning. *Epilepsia*, 44, 2–8. doi: 10.1111/j.0013- 9580.2003.12001.x.



- Pfurtscheller, G., & Aranibar, A. (1977). Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 42(6), 817-826.
- Pfurtscheller, G., & Berghold, A. (1989). Patterns of cortical activation during planning of voluntary movement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 72(3), 250–258. doi: 10.1016/0013-4694(89)90250-2.
- Pfurtscheller, G., & Da Silva, F. L. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical neurophysiology*, 110(11), 1842-1857.
- Pineda, J. A. (2005). The functional significance of Mu rhythms: Translating “seeing” and “hearing” into “doing.” *Brain Research Reviews*, 50(1), 57–68. doi: 10.1016/j.brainresrev.2005.04.005.
- Plotkin, W. B., and Rice, K. M. (1981). Biofeedback as a placebo: anxiety reduction facilitated by training in either suppression or enhancement of  $\alpha$  brainwaves. *Exp. Brain Res.* 49, 590–596. doi: 10.1037/0022-006x.49. 4.590.
- Podvalny, E., Noy, N., Harel, M., Bickel, S., Chechik, G., Schroeder, C. E., ... & Malach, R. (2015). A unifying principle underlying the extracellular field potential spectral responses in the human cortex. *Journal of neurophysiology*, 114(1), 505-519.
- Porjesz, B., & Begleiter, H. (2003). Alcoholism and human electrophysiology. *Alcohol Research & Health*, 27(2), 15
- Pourbehbahani, Z., Saemi, E., Cheng, M. Y., & Dehghan, M. R. (2023). Both Sensorimotor Rhythm Neurofeedback and Self-Controlled Practice Enhance Motor Learning and Performance in Novice Golfers. *Behavioral Sciences*, 13(1), 65.
- Prabhakaran, V., Narayanan, K., Zhao, Z., & Gabrieli, J. D. E. (2000). Integration of diverse information in working memory within the frontal lobe. *Nature neuroscience*, 3(1), 85-90.
- Pusenjak, N., Grad, A., Tusak, M., Leskovsek, M., & Schwarzlin, R. (2015). Can biofeedback training of psychophysiological responses enhance athletes’ sport performance? A practitioner’s perspective. *The Physician and sportsmedicine*, 43(3), 287-299.

- Putman, P., van Peer, J., Maimari, I., van der Werff, S. (2010). EEG theta/beta ratio in relation to fear-modulated response-inhibition, attentional control, and affective traits. *Biological Psychology*, 83(2):73–78.
- Putman, P., Verkuil, B., Arias-Garcia, E., Pantazi, I., van Schie, C. (2014). EEG theta/beta ratio as a potential biomarker for attentional control and resilience against deleterious effects of stress on attention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 14(2):782–791.
- Putwain, D., & Daly, A. L. (2014). Test anxiety prevalence and gender differences in a sample of English secondary school students. *Educational Studies*, 40(5), 554-570.
- Raymond, J., Varney, C., Parkinson, L. A., & Gruzelier, J. H. (2005). The effects of alpha/theta neurofeedback on personality and mood. *Cognitive brain research*, 23(2-3), 287-292.
- Raz, A., & Buhle, J. (2006). Typologies of attentional networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 367–379.
- Rector, N. A., Szacun-Shimizu, K., & Leybman, M. (2007). Anxiety sensitivity within the anxiety disorders: Disorder-specific sensitivities and depression comorbidity. *Behaviour Research and Therapy*, 45(8), 1967-1975.
- Reddy, J. K., & Sneha, C. S. (2019). EEG neurofeedback brain training for epilepsy to reduce seizures. *International Journal of Child Development and Mental Health*, 7(1), 28-33.
- Reigal, R. E., Vázquez-Diz, J. A., Morillo-Baro, J. P., Hernández-Mendo, A., & Morales-Sánchez, V. (2020). Psychological profile, competitive anxiety, moods and self-efficacy in beach handball players. *International journal of environmental research and public health*, 17(1), 241.
- Reis, J., Portugal, A., Pereira, M. R., & Dias, N. (2015, April). Alfa and theta intensive neurofeedback protocol for age-related cognitive deficits. In 2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (pp. 715-718). IEEE.
- Reiss, S. (1985). The expectancy model of fear. *Theoretical issue in behavior therapy*, 107-121.
- Reiss, S. (1991). Expectancy model of fear, anxiety, and panic. *Clinical psychology review*, 11(2), 141-153.

- Reiss, S., Peterson, R. A., Gursky, D. M., & McNally, R. J. (1986). Anxiety sensitivity, anxiety frequency and the prediction of fearfulness. *Behaviour research and therapy*, 24(1), 1-8.
- Ren, Z., Zhang, Y., He, H., Feng, Q., Bi, T., & Qiu, J. (2019). The different brain mechanisms of object and spatial working memory: voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity. *Frontiers in human neuroscience*, 13, 248.
- Richardson, T., Elliott, P., Roberts, R., & Jansen, M. (2017). A longitudinal study of financial difficulties and mental health in a national sample of British undergraduate students. *Community mental health journal*, 53, 344-352.
- Rijken, N. H., Soer, R., de Maar, E., Prins, H., Teeuw, W. B., Peuscher, J., & Oosterveld, F. G. (2016). Increasing performance of professional soccer players and elite track and field athletes with peak performance training and biofeedback: a pilot study. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 41, 421-430.
- Ringeisen, T., Heckel, C., & Messerschmidt-Grandi, C. (2020). Assessing Test Anxiety in Italian-Speaking Adults: The Italian Multi-Faceted Test Anxiety Questionnaire. *Handbuch Stress und Kultur: Interkulturelle und kulturvergleichende Perspektiven*, 1-20.
- Rodriguez, B. F., Bruce, S. E., Pagano, M. E., Spencer, M. A., & Keller, M. B. (2004). Factor structure and stability of the Anxiety Sensitivity Index in a longitudinal study of anxiety disorder patients. *Behaviour research and therapy*, 42(1), 79-91.
- Rogala, J., Jurewicz, K., Paluch, K., Kublik, E., Cetnarski, R., & Wróbel, A. (2016). The Do's and Don'ts of neurofeedback training: A review of the controlled studies using healthy adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 301. doi: 10.3389/fnhum.2016.00301.
- Ros, T., Enriquez-Geppert, S., Zotev, V., Young, K. D., Wood, G., Whitfield-Gabrieli, S., ... & Thibault, R. T. (2020). Consensus on the reporting and experimental design of clinical and cognitive-behavioural neurofeedback studies (CRED-nf checklist).
- Ros, T., J. Baars, B., Lanius, R. A., & Vuilleumier, P. (2014). Tuning pathological brain oscillations with neurofeedback: a systems neuroscience framework. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 1008.

- Ros, T., Moseley, M.J., Bloom, P.A., Benjamin, L., Parkinson, L.A., Gruzelier, J.H., 2009. Optimizing microsurgical skills with EEG neurofeedback. *BMC neuroscience* 10, 87.
- Rosen, J. B. & Schulkin, J. (1998). From normal fear to pathological anxiety. *Psychol. Rev.* 105, 325–350
- Roy, R., de la Vega, R., Jensen, M. P., and Miró, J. (2020). Neurofeedback for pain management: a systematic review. *Front. Neurosci.* 14:671.
- Rudin, W. (1970). Real and complex analysis, Mladinska Knjiga.
- Rusciano, A., Corradini, G., and Stoianov, I. (2017). Neuroplus biofeedback improves attention, resilience, and injury prevention in elite soccer players. *Psychophysiol* 54, 916–926.
- Rydzik, Ł., Wąsacz, W., Ambroży, T., Javdaneh, N., Brydak, K., & Kopańska, M. (2023). The Use of Neurofeedback in Sports Training: Systematic Review. *Brain Sciences*, 13(4), 660.
- Sadeghi, N., Nazari, M. A., Alizade, M., Kamali, M. (2013). The effect of neurofeedback training on EEG and balance performance in children with reading disorder. *Journal of Modern Rehabilitation*, 7( 3):32-9.
- Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., Crews, D. J., & Kubitz, K. A. (1990). Hemispheric asymmetry, cardiac response, and performance in elite archers. *Research quarterly for exercise and sport*, 61(4), 351-359.
- Salehi, M., Pyke, W., Mohammadzadeh, H., Nazari, M. A., & Javadi, A. H. (2019). Neurofeedback and Motor Imagery are as good as physical training on Dart Throwing.
- Salimnejad, Z., Zandi, H., and Arsham, S. (2019). Effect of bio-neural feedback exercises on the performance of female Rugby players. *Int. J. Motor Control Learn.* 1:10–18. doi: 10.29252/ijmcl.1.2.10.
- Saulnier, R., Spiluttini, B., Toure, E., & Benchenane, K. (2022). Validation of the EEG signal of the URGOnight neurofeedback device, associated with a new SMR detection method. *bioRxiv*, 2022-12.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Gerloff, C., & Hummel, F. C. (2009). Spontaneous locally restricted EEG alfa activity determines cortical excitability in the motor cortex. *Neuropsychologia*, 47(1), 284-288.

- Schack, T., Junior, J. E. H., & Essig, K. (2020). Coaching with virtual reality, intelligent glasses and neurofeedback: the potential impact of new technologies. *International Journal of Sport Psychology*, 51(6), 667-688.
- Schabus M., Heib D. P. J., Lechinger J., Griessenberger H., Klimesch W., Pawlizki A., et al.. (2014). Enhancing sleep quality and memory in insomnia using instrumental sensorimotor rhythm conditioning. *Biol. Psychol.* 95, 126–134. 10.1016/j.biopsycho.2013.02.020
- Schabus, M., Griessenberger, H., Gnjezda, M. T., Heib, D. P., Wislowska, M., and Hoedlmoser, K. (2017). Better than sham? A double-blind placebo-controlled neurofeedback study in primary insomnia. *Brain* 140, 1041–1052. doi: 10.1093/brain/awx011
- Schwabe, L., & Wolf, O. T. (2010). Learning under stress impairs memory formation. *Neurobiology of learning and memory*, 93(2), 183-188.
- Scheel, A.M., Schijen, M.R.M.J., Lakens, D., 2021. An Excess of Positive Results: comparing the Standard Psychology Literature With Registered Reports. *Adv. Meth. Pract. Psychol. Sci.* 4, 25152459211007468.
- Schutter, D. J., Van Honk, J. (2005). Electrophysiological ratio markers for the balance between reward and punishment. *Cognitive Brain Research*, 24(3):685–690.
- Schwartz, M. S., Andrasik, F. (2017). *Biofeedback: A practitioner's guide*. Guilford Publications.
- Schwarzer, R. (2014). *Self-efficacy: Thought control of action*. Taylor & Francis.
- Serrano Pintado, I., & Escolar Llamazares, M. D. C. (2014). Description of the general procedure of a stress inoculation program to cope with the test anxiety. *Psychology*. 2014, V. 5, n. 8, p. 956-965.
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge University Press.
- Shewchuk, R. M., Richards, J. S., & Elliott, T. R. (1998). Dynamic processes in health outcomes among caregivers of patients with spinal cord injuries. *Health psychology*, 17(2), 125.

- Shipp, A. J., Edwards, J. R., & Lambert, L. S. (2009). Conceptualization and measurement of temporal focus: The subjective experience of the past, present, and future. *Organizational behavior and human decision processes*, 110(1), 1-22.
- Shokri, A., & Nosratabadi, M. (2021). Comparison of Biofeedback and Combined Interventions on Athlete's Performance. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 46(3), 227-234.
- Siekańska, M., Bondar, R. Z., di Fronso, S., Blecharz, J., & Bertollo, M. (2021). Integrating technology in psychological skills training for performance optimization in elite athletes: A systematic review. *Psychology of Sport and Exercise*, 57, 102008.
- Singer, R. N. (2000). Performance and human factors: Considerations about cognition and attention for self-paced and externally paced events. *Ergonomics*, 43, 1661–1680.
- Sitaram, R., Ros, T., Stoeckel, L., Haller, S., Scharnowski, F., Lewis-Peacock, J., et al. (2017). Closed-loop brain training: the science of NFB. *Nat. Rev. Neurosci.* 18:86–100. doi: 10.1038/nrn.2016.164.
- Sklett, V. H., Lorås, H. W., & Sigmundsson, H. (2018). Self-efficacy, flow, affect, worry and performance in elite world cup ski jumping. *Frontiers in psychology*, 9, 1215.
- Skottnik, L., & Linden, D. E. (2019). Mental imagery and brain regulation—new links between psychotherapy and neuroscience. *Frontiers in Psychiatry*, 10, 779.
- Smith, R. E., Smoll, F. L., Cumming, S. P., & Grossbard, J. R. (2006). Measurement of multidimensional sport performance anxiety in children and adults: The Sport Anxiety Scale-2. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 28(4), 479-501.
- Sonesson, S., Kvist, J., Arden, C., Österberg, A., & Silbernagel, K. G. (2017). Psychological factors are important to return to pre-injury sport activity after anterior cruciate ligament reconstruction: expect and motivate to satisfy. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 25, 1375-1384.
- Sperling, R. A., Aisen, P. S., Beckett, L. A., Bennett, D. A., Craft, S., Fagan, A. M., ... & Phelps, C. H. (2011). Toward defining the preclinical stages of Alzheimer's disease: Recommendations from the National Institute on Aging-Alzheimer's Association workgroups on diagnostic guidelines for Alzheimer's disease. *Alzheimer's & dementia*, 7(3), 280-292.

- Spielberger, C. D. (1983). State-trait anxiety inventory for adults.
- Spielberger, C. D. (1989). State-Trait Anxiety Inventory: Bibliography (2nd ed.). Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.
- Spielberger, C. D. (2010). Test anxiety inventory. *The Corsini encyclopedia of psychology*, 1-1.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., & Lushene, R. E. (1968). State-trait anxiety inventory (STAI): test manual for form X. Consulting Psychologists Press.
- Spinnler, H. & Tognoni, G. (1987). Standardizzazione e taratura italiana di test neuropsicologici. *Italian Journal of Neurological Sciences* (suppl. 8).
- Squires, N. K., Squires, K. C., & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 38(4), 387-401.
- Stallman, H. M. (2008). Prevalence of psychological distress in university students: Implications for service delivery. *Australian Journal of General Practice*, 37(8), 673.
- Steimer, T. (2022). The biology of fear-and anxiety-related behaviors. *Dialogues in clinical neuroscience*.
- Steiner, N. J., Frenette, E. C., Rene, K. M., Brennan, R. T., & Perrin, E. C. (2014). Neurofeedback and cognitive attention training for children with attention-deficit hyperactivity disorder in schools. *Journal of Developmental & Behavioral Pediatrics*, 35(1), 18-27.
- Sterman, M. B. (1996). Physiological origins and functional correlates of EEG rhythmic activities: Implications for self-regulation. *Biofeedback and Self-Regulation*, 21(1), 3–33. doi: 10.1007/BF02214147.
- Sterman, M. B. (2000). Basic concepts and clinical findings in the treatment of seizure disorders with EEG operant conditioning. *Clinical electroencephalography*, 31(1), 45-55.
- Sterman, M. B., & Egner, T. (2006). Foundation and practice of neurofeedback for the treatment of epilepsy. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 31, 21-35.

- Stolarski, M., & Matthews, G. (2016). Time perspectives predict mood states and satisfaction with life over and above personality. *Current psychology*, 35, 516-526.
- Stys, A., Stys, T. (1998). Current clinical applications of heart rate variability. *Clin. Cardiol.*, 21, 719–724.
- Sultanov, M. B., & Ismayilova, K. Y. (2023). Mobile EEG systems for alpha neurofeedback and anxiety control. *Azerbaijan Journal of Physiology*, 38(1), 25-32.
- Sunder, K. R., & Bohnen, J. L. (2017). The progression of neurofeedback: an evolving paradigm in addiction treatment and relapse prevention. *MOJ Addict Med Ther*, 3(3), 00037.
- Szczypińska, M. (2019). Does attention training induce any changes in the level of the selected cognitive processes in handball players. *Journal of Physical Education & Sport*, 19.
- Taha, Z., Musa, R. M., Abdullah, M. R., Maliki, A. B. H. M., Kosni, N. A., Mat-Rasid, S. M., ... & Juahir, H. (2018). Supervised pattern recognition of archers' relative psychological coping skills as a component for a better archery performance. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(1S), 467-484.
- Tan, L. F., Dienes, Z., Jansari, A., & Goh, S. Y. (2014). Effect of mindfulness meditation on brain–computer interface performance. *Consciousness and Cognition*, 23, 12–21.
- Tan, L. F., Jansari, A., Keng, S. L., & Goh, S. Y. (2009). Effect of Mental Training on BCI Performance. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, et al. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 632–635). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tan, Y. Q., Tan, L. F., Mok, S. Y., & Goh, S. Y. (2015). Effect of short term meditation on brain-computer interface performance. *Journal of Medical and Bioengineering*, 4(2), 135–138.
- Tang, Y. Y., Tang, R., Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2019). Frontal theta activity and white matter plasticity following mindfulness meditation. *Current opinion in psychology*, 28, 294-297.



- Tansey, M. A. (1993). Ten-year stability of EEG biofeedback results for a hyperactive boy who failed fourth grade perceptually impaired class. *Biofeedback and Self-regulation*, 18, 33-44.
- Taylor, S. (2014). *Anxiety sensitivity: Theory, research, and treatment of the fear of anxiety*. Routledge.
- Taylor, S. F., & Martz, M. E. (2023). Real-time fMRI neurofeedback: the promising potential of brain-training technology to advance clinical neuroscience. *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 48(1), 238-239.
- Taylor, S., Zvolensky, M. J., Cox, B. J., Deacon, B., Heimberg, R. G., Ledley, D. R., ... & Cardenas, S. J. (2007). Robust dimensions of anxiety sensitivity: development and initial validation of the Anxiety Sensitivity Index-3. *Psychological assessment*, 19(2), 176.
- Tasca, G. A., Sylvestre, J., Balfour, L., Chyurlia, L., Evans, J., Fortin-Langelier, B., ... & Wilson, B. (2015). What clinicians want: Findings from a psychotherapy practice research network survey. *Psychotherapy*, 52(1), 1.
- Thayer, J. F., Brosschot, J. F. (2005). Psychosomatics and psychopathology: Looking up and down from the brain. *Psychoneuroendocrinology*, 30, 1050–1058.
- Thayer, J. F., Hansen, A. L., Saus-Rose, E., Johnsen, B. H. (2009). Heart Rate Variability, Prefrontal Neural Function, and Cognitive Performance: The Neurovisceral Integration Perspective on Self-regulation, Adaptation, and Health. *Ann. Behav. Med.*, 37, 141–153.
- Thayer, J. F., Sternberg, E. (2006). Beyond Heart Rate Variability: Vagal Regulation of Allostatic Systems. *Ann. New York Acad. Sci.*, 1088, 361–372.
- Thibault, R. T., Lifshitz, M., & Raz, A. (2016). The self-regulating brain and neurofeedback: experimental science and clinical promise. *cortex*, 74, 247-261.
- Thomas, C. L., Cassady, J. C., & Heller, M. L. (2017). The influence of emotional intelligence, cognitive test anxiety, and coping strategies on undergraduate academic performance. *Learning and Individual Differences*, 55, 40-48.
- Thompson, M., & Thompson, L. (2003). *The neurofeedback book: An introduction to basic concepts in applied psychophysiology*. Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback.

- Thompson, T., Keogh, E., and French, C. C. (2011). Sensory focusing versus distraction and pain: moderating effects of anxiety sensitivity in males and females. *J. Pain* 12, 849–858. doi: 10.1016/j.jpain.2011.01.004
- Tolin, D. F., Davies, C. D., Moskow, D. M., & Hofmann, S. G. (2020). Biofeedback and neurofeedback for anxiety disorders: a quantitative and qualitative systematic review. *Anxiety disorders*, 265-289.
- Thornton, A., & Lee, P. (2000). Publication bias in meta-analysis: its causes and consequences. *Journal of clinical epidemiology*, 53(2), 207-216.
- Toma, K., Matsuoka, T., Immisch, I., Mima, T., Waldvogel, D., Koshy, B., ... & Hallett, M. (2002). Generators of movement-related cortical potentials: fMRI-constrained EEG dipole source analysis. *Neuroimage*, 17(1), 161-173.
- Torres, C. B., Barona, E. J. G., Molina, M. G., Sánchez, M. E. G. B., & Manso, J. M. M. (2023). A systematic review of EEG neurofeedback in fibromyalgia to treat psychological variables, chronic pain and general health. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 1-19.
- Tortella-Feliu, M., Morillas-Romero, A., Balle, M., Llabrés, J., Bornas, X., Putman, P. (2014). Spontaneous EEG activity and spontaneous emotion regulation. *International Journal of Psychophysiology*, 94(3):365–372.
- Trambaiolli, L. R., Kohl, S. H., Linden, D. E., & Mehler, D. M. (2021). Neurofeedback training in major depressive disorder: a systematic review of clinical efficacy, study quality and reporting practices. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 125, 33-56.
- Tuescher, O., Protopopescu, X., Pan, H., Cloitre, M., Butler, T., Goldstein, M., ... & Stern, E. (2011). Differential activity of subgenual cingulate and brainstem in panic disorder and PTSD. *Journal of anxiety disorders*, 25(2), 251-257.
- Tuscan, L. A., Herbert, J. D., Forman, E. M., Juarascio, A. S., Izzetoglu, M., & Schultheis, M. (2013). Exploring frontal asymmetry using functional near-infrared spectroscopy: a preliminary study of the effects of social anxiety during interaction and performance tasks. *Brain imaging and behavior*, 7, 140-153.
- Ugalde, A., Krishnasamy, M., & Schofield, P. (2014). The relationship between self-efficacy and anxiety and general distress in caregivers of people with advanced cancer. *Journal of palliative medicine*, 17(8), 939-941.

- Uysal, B., Gormez, V., Karatepe, H. T., Sönmez, D., Taştekné, F., Tepedelen, M. S., & Jordan, T. R. (2023). Reducing test anxiety during the COVID-19 pandemic: A comparison of the effectiveness of cognitive behavioral therapy and acceptance and commitment therapy. *Psychological Reports*, 00332941231174394.
- Van Der Kolk, B. A., Hodgdon, H., Gapen, M., Musicaro, R., Suvak, M. K., Hamlin, E., & Spinazzola, J. (2016). A randomized controlled study of neurofeedback for chronic PTSD. *PloS one*, 11(12), e0166752.
- van Son, D., Angelidis, A., Hagenaaars, M. A., van der Does, W., Putman, P. (2018). Early and late dot-probe attentional bias to mild and high threat pictures: Relations with EEG theta/beta ratio, self-reported trait attentional control, and trait anxiety. *Psychophysiology*, 55(12):e13274.
- Verner-Filion, J., Vallerand, R. J., Donahue, E. G., Moreau, E., Martin, A., Mageau, G. A., & Martin, A. (2014). Passion, coping, and anxiety in sport: The interplay between key motivational and self-regulatory processes. *International Journal of Sport Psychology*, 45(6), 516-537.
- Vernon, D. (2005). Can neurofeedback training enhance performance? An evaluation of the evidence with implications for future research. *Applied Psychophysiology Biofeedback*, 30(4), 347–364.
- Vernon, D., Egner, T., Cooper, N., Compton, T., Neilands, C., Sheri, A., & Gruzelier, J. (2003). The effect of training distinct neurofeedback protocols on aspects of cognitive performance. *International journal of psychophysiology*, 47(1), 75-85.
- Vernon, D., Frick, A., Gruzelier, J. (2004). Neurofeedback as a Treatment for ADHD: A Methodological Review with Implications for Future Research. *J. Neurother.*, 8, 53–82.
- Victoria, D. H. S. (2002). Victorian population health survey 2001 selected findings. *DeHum. Serv. Melb*, 1, 29-31.
- Vigneau, F., & Cormier, S. (2008). The factor structure of the State-Trait Anxiety Inventory: an alternative view. *Journal of personality assessment*, 90(3), 280-285.
- Vine, S. J., Moore, L. J., Cooke, A., Ring, C., & Wilson, M. R. (2013). Quiet eye training: A means to implicit motor learning. *International Journal of Sport Psychology*, 44(4), 367–386. doi: 10.7352/IJSP2013.44.367.

- Viviani, G., & Vallesi, A. (2021). EEG-neurofeedback and executive function enhancement in healthy adults: A systematic review. *Psychophysiology*, *58*(9), e13874.
- Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(10), 525–544.
- Wang, C., Chen, Y., Song, P., Yu, H., Du, J., Zhang, Y., & Sun, C. (2022). Varied response of EEG rhythm to different tDCS protocols and lesion hemispheres in stroke subjects with upper limb dysfunction. *Neural Plasticity*, 2022.
- Wang, D., Hu, T., Luo, R., Shen, Q., Wang, Y., Li, X., ... & Yin, H. (2022). Effect of cognitive reappraisal on archery performance of elite athletes: The mediating effects of sport-confidence and attention. *Frontiers in Psychology*, *13*.
- Wang, J. R., & Hsieh, S. (2013). Neurofeedback training improves attention and working memory performance. *Clinical Neurophysiology*, *124*(12), 2406-2420.
- Wang, K. P., Cheng, M. Y., Chen, T. T., Chang, Y. K., Huang, C. J., Feng, J., Hung, T. M., & Ren, J. (2019). Experts' successful psychomotor performance was characterized by effective switch of motor and attentional control. *Psychology of Sport and Exercise*, *43*, 374–379. doi: 10.1016/j.psychsport.2019.04.006.
- Wang, K. P., Cheng, M. Y., Chen, T. T., Huang, C. J., Schack, T., & Hung, T. M. (2020). Elite golfers are characterized by psychomotor refinement in cognitive-motor processes. *Psychology of Sport and Exercise*, *50*, 101739. doi: 10.1016/j.psychsport.2020.101739.
- Wang, K. P., Frank, C., Hung, T. M., & Schack, T. (2022). Neurofeedback training: Decreases in Mu rhythm lead to improved motor performance in complex visuomotor skills. *Current Psychology*, 1-12.
- Wang, S. Y., Lin, I. M., Fan, S. Y., Tsai, Y. C., Yen, C. F., Yeh, Y. C., ... & Lin, H. C. (2019). The effects of alfa asymmetry and high-beta down-training neurofeedback for patients with the major depressive disorder and anxiety symptoms. *Journal of affective disorders*, *257*, 287-296.
- Watanabe, T., Sasaki, Y., Shibata, K., & Kawato, M. (2017). Advances in fMRI real-time neurofeedback. *Trends in cognitive sciences*, *21*(12), 997-1010.

- Wheeler, R. E., Davidson, R. J., & Tomarken, A. J. (1993). Frontal brain asymmetry and emotional reactivity: A biological substrate of affective style. *Psychophysiology*, *30*(1), 82-89.
- Wheaton, M. G., Deacon, B. J., McGrath, P. B., Berman, N. C., & Abramowitz, J. S. (2012). Dimensions of anxiety sensitivity in the anxiety disorders: Evaluation of the ASI-3. *Journal of Anxiety disorders*, *26*(3), 401-408.
- Williams, N. S., McArthur, G. M., de Wit, B., Ibrahim, G., & Badcock, N. A. (2020). A validation of Emotiv EPOC Flex saline for EEG and ERP research. *PeerJ*, *8*, e9713.
- Williamson, C. A., Wahlster, S., Shafi, M. M., & Westover, M. B. (2014). Sensitivity of compressed spectral arrays for detecting seizures in acutely ill adults. *Neurocritical care*, *20*, 32-39.
- Wilson, V. E., Peper, E., & Moss, D. (2006). “The Mind Room” in Italian Soccer Training: The Use of Biofeedback and Neurofeedback for Optimum Performance. *Biofeedback*, *34*(3).
- Wood, G., Kober, S. E., Witte, M., & Neuper, C. (2014). On the need to better specify the concept of “control” in brain-computer-interfaces/neurofeedback research. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *8*(171), 1–4.
- Wyrwicka, W., & Serman, M. B. (1968). Instrumental conditioning of sensorimotor cortex EEG spindles in the waking cat. *Physiology & Behavior*, *3*(5), 703-707.
- Xiang, M. Q., Hou, X. H., Liao, B. G., Liao, J. W., & Hu, M. (2018). The effect of neurofeedback training for sport performance in athletes: A meta-analysis. *Psychology of Sport and Exercise*, *36*, 114-122.
- Yeh, W. H., Hsueh, J. J., & Shaw, F. Z. (2021). Neurofeedback of alfa activity on memory in healthy participants: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*, 562360.
- Yuan, K., Steedle, J., Shavelson, R., Alonzo, A., & Opezzo, M. (2006). Working memory, fluid intelligence, and science learning. *Educational Research Review*, *1*, 83–98.
- Zadkhosh, S. M., Gharayagh Zandi, H., & Hemayattalab, R. (2017). The effects of Neurofeedback on Anxiety decrease and Athletic performance Enhancement. *Journal of Applied Psychological Research*, *7*(4), 21-37.

- Zaleski, Z. (1996). Future anxiety: Concept, measurement, and preliminary research. *Personality and individual differences*, 21(2), 165-174.
- Zarbo, C., Tasca, G. A., Cattafi, F., & Compare, A. (2016). Integrative psychotherapy works. *Frontiers in psychology*, 6, 2021.
- Zeidner, M. (1998). Test anxiety: The state of the art.
- Zeidner, M. (2007). Test anxiety in educational contexts: Concepts, findings, and future directions. In *Emotion in education* (pp. 165-184). Academic press.
- Zenke, F., & Gerstner, W. (2017). Hebbian plasticity requires compensatory processes on multiple timescales. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 372(1715), 20160259.
- Zhang, L., Chang, R. C. C., Chu, L. W., & Mak, H. K. F. (2012). Current neuroimaging techniques in Alzheimer's disease and applications in animal models. *American Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 2(3), 386.
- Zhang, J. W., & Howell, R. T. (2011). Do time perspectives predict unique variance in life satisfaction beyond personality traits?. *Personality and individual differences*, 50(8), 1261-1266.
- Zhang, X., Li, W., & Wang, J. (2022). Effects of exercise intervention on students' test anxiety: a systematic review with a meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6709.
- Zhou, C., & Liu, W. (2010). Research and Application of Competitive Sports Psychological Control. People's Sports Publishing House: *Beijing, China*, 110-111.
- Zich, C., Johnstone, N., Lührs, M., Lisk, S., Haller, S. P., Lipp, A., ... & Kadosh, K. C. (2020). Modulatory effects of dynamic fMRI-based neurofeedback on emotion regulation networks in adolescent females. *NeuroImage*, 220, 117053.
- Zimbardo, P. G., & Boyd, J. N. (2014). Putting time in perspective: A valid, reliable individual-differences metric. In *Time perspective theory; review, research and application: Essays in honor of Philip G. Zimbardo* (pp. 17-55). Cham: Springer International Publishing.

- Zinbarg, R. E., Barlow, D. H., & Brown, T. A. (1997). Hierarchical structure and general factor saturation of the Anxiety Sensitivity Index: Evidence and implications. *Psychological assessment, 9*(3), 277.
- Ziółkowski, A., Graczyk, M., Strzałkowska, A., Wilczyńska, D., Włodarczyk, P., & Zarańska, B. (2012). Neuronal, cognitive and social indicators for the control of aggressive behaviors in sport. *Acta Neuropsychologica, 10*(4), 537–546. doi: 10.5604/17307503.1030215.
- Zoefel, B., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2011). Neurofeedback training of the upper alfa frequency band in EEG improves cognitive performance. *Neuroimage, 54*(2), 1427-1431.

## Appendice

**Table 1** - Main characteristics of the included studies.

| AUTHORS AND YEAR    | SAMPLE  | DISCIPLINE AND EXPERTISE LEVEL                                | STUDY DESIGN AND PROCEDURE  | NF DEVICE  | TRAINING SESSIONS   | ELECTRODE POSITION AND INTERVENTION | FEEDBACK | CONTROL GROUP | OUTCOME   | INTERVENTION EFFECT   |
|---------------------|---|---|---|--|---|-------------------------------------|----------|---------------|---|---|
| Rijken et al., 2016 | Group A: 11 professional soccer players.<br>Group B: 10 track and field athletes (sprinters and hurdlers).<br>Mean age not specified. | Soccer and track and field.<br>Level: professional and elite. | Design: pilot study. No randomization (groups were not meant to compare).<br>Procedure: pre-intervention measurements – peak performance training + biofeedback (Group A)/neurofeedback (Group B) – post-intervention measurements – follow-up measurement. | Neurofeedback system for home-training: Samsung galaxy Tab 10.1” tablet + a set of headphones (Philips, O’Neill stretch headband); 5 Ag/AgCl electrodes mounted in the stretch headband and the ear covers of the headphone to measure EEG | Group A: 6 sessions per week for 5 weeks, 3 times per day, 3 minutes per session.<br>Group B: 20 sessions in 5 weeks, 30 minutes per session. | C3 and C4.<br>Increase alpha power. | Auditory | No            | EEG.<br>ECG.<br>Sleep quality.<br>Recovery and stress.<br>Sports Improvement Measurement -60.<br>Performance. | Peak performance program + either HRV-feedback or neurofeedback may lead to changes in performance-related outcomes and stress reduction. Group A: EEG alpha power and LF/HF ratio improved and SIM60 emotional stability and concentration indices revealed better scores after intervention.<br><br>Athletes: HRV low frequency power and |



|                                |   |   |  |   |   |   |        |    |   |   |
|--------------------------------|---|---|--|---|---|---|--------|----|---|---|
|                                |   |   |  | signals;<br>signals<br>transmitted<br>via Bluetooth<br>to the tablet<br>(system<br>validated by<br>van Boxtel et<br>al.<br>2012). |   |   |        |    |   | recovery index of<br>the RESTQ<br>significantly<br>improved.  |
| Hosseini &<br>Norouzi,<br>2017 | 30 volleyball<br>players: 15<br>élite players<br>and 15 non-<br>élite players<br>(mean age<br>22.8±4.2, all<br>males) | Volleyball.<br><br>Level: élite<br>and non-élite. | Design: quasi-<br>experimental study.<br><br>Procedure: pre-test phase<br>– neurofeedback training<br>– post-test phase. | ProComp<br>Infiniti +<br>BioGraph<br>software   | 1 single session<br>lasting 30-45<br>minutes. | C3, C4 and T3<br>(International 10-<br>10 System).<br><br>Increase SMR<br>power and inhibit<br>alpha power. | Visual | No | Assess the<br>use of self-<br>talk with the<br>Self-Talk<br>Questionnaire<br>(FSTQ;<br>Theodorakis,<br>Hatzigeorgiad<br>is & Chroni,<br>2008) and the<br>correctness<br>and precision | Use of internal<br>self-<br>talk in elite and<br>non-élite<br>volleyball<br><br>players<br>significantly<br>reduced; standard<br>volleyball service |

|                       |                                    |                               |  |   |                                 |   |                 |                     |  |  |
|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|---|---------------------------------|---|-----------------|---------------------|--|--|
|                       |                                    |                               |  |   |                                 |   |                 |                     | of volleyball serve skills with the AAHPERD Volleyball Serve Test (1984) | scores significantly increased   |
| Maszczyk et al., 2018 | 18 judo athletes (mean age 21±1.5) | Judo.<br>Level not specified. | Design: double-blind, randomized-controlled study.<br>Procedure: pre-test phase– neurofeedback training – post-test phase. | Enobio wireless and portable EEG/EOG/ECG monitoring device (with bandwidth: 0 to 125 Hz and sampling rate: 500 SPS) and Neuroelectric's Instrument Controller, v 1.1 - NIC 1.1 + Biograph Infiniti Software | 10 sessions of 25 minutes each. | O1 and O2.<br>Inhibit theta and reinforce beta rhythms. | Visual-auditory | Yes (sham feedback) | Assess dynamic balance and EEG measures.                                 | Theta and alpha values decreased, whereas beta values increased. Enhancement of dynamic balance. |

|                                      |  |  |   |   |   |  |        |                     |  |   |
|--------------------------------------|--|--|---|---|---|--|--------|---------------------|--|---|
| Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018 | 27 student-shooters (aged 19-21)               | Shooting.<br><br>Level: professional soldiers. | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: pre-test measurement – neurofeedback training – post-test measurement.                              | EEG<br>DigiTrack<br>Biofeedback system. | 20 sessions 1/2 times a week lasting 40 minutes each. | F3, F4, P3 and P4.<br><br>Strengthen beta frequency. | Visual | Yes (sham feedback) | Analyze changes in the level of attention and activation with COG and FLIM tests from the Vienna Test System.  | Improvement of accuracy and speed in the COG test.  |
| Norouzi et al., 2018                 | 30 dart players (mean age 24.5±4.7, all males) | Darts.<br><br>Level: novice.                   | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: pre-test phase – neurofeedback training – retention test 1 – pressure condition – retention test 2. | Device not specified.                   | 10 sessions of 40 minutes each.                       | F4.<br><br>Suppress alpha rhythm.                    | Visual | Yes (mock feedback) | Assess the impact of the Quiet Mind Training on the acquisition of dart throwing skills and on the suppression of alpha power and the effect of a pressure condition on the dart throwing skills | Improvements in implicit skill acquisition due to alpha power suppression. Stability of improvements under pressure conditions. |

|                             |   |  |  |  |   |  |                 |                     |  |   |
|-----------------------------|---|--|--|--|---|--|-----------------|---------------------|--|---|
|                             |   |  |  |  |   |  |                 |                     | acquired under Quiet Mind Training conditions.   |   |
| Szczypińska & Mikicin, 2019 | 18 handball players (mean age not specified, 9 females)                       | Handball.<br>Level: 1 <sup>st</sup> League and 2 <sup>nd</sup> League. | Design not specified.<br>Procedure: pre-training measurements – neurofeedback training – post-intervention measurements. | EEG DigiTrack Biofeedback system.          | 20 sessions 1/2 times a week lasting 40 minutes each. | C3 and C4.<br>Increase beta and SMR bands and decrease theta and beta2 bands.                        | Visual          | No                  | Analyse changes in peripheral vision, sensorimotor coordination and attention with PP, SMK and COG tests from the Vienna Tests System. | Improvement in concentration and attention (COG) and in sensorimotor coordination (SMK) in both males and females and in peripheral perception (PP) in males. |
| Mirifar et al., 2019        | 38 soccer players: SMR, Theta/Beta and Control group (aged 14-23, all males). | Soccer.<br>Level not specified.  | Design: mixed-multifactorial. Randomization.<br>Procedure: pre-test 1 – pre-test 2 – neurofeedback training – post-test. | NeXus-10 MKII system + BioTrace+ software. | 10 sessions every other day for 20 days.              | Cz.<br>Theta/Beta group: decrease theta band and increase beta power. SMR group: increase SMR power. | Visual-auditory | Yes (sham feedback) | Assess concentration, selective attention and reaction times.  | No improvement in attention performance and reaction times.   |

|                              |  |   |   |  |   |   |                 |                             |  |   |
|------------------------------|--|---|---|--|---|---|-----------------|-----------------------------|--|---|
| Golaś et al., 2019           | 12 judo athletes (aged 22-25, all males)   | Judo.<br><br>Level: national team.                    | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: pre-training phase – 1 <sup>st</sup> training cycle – four-week break – 2 <sup>nd</sup> training cycle – post-training phase. | ProComp5 + BioGraph Infiniti software. | Two training cycles: 1. 15 sessions every second day lasting 4 minutes each. 2. 15 sessions on consecutive days lasting 4 minutes each. | C3.<br><br>Decrease theta and beta2 bands and increase SMR and beta1 bands.                   | Visual-auditory | Yes (sham feedback)         | Assess reaction speed.   | Significant improvement in simple and complex reaction time following each training cycle. Improvement of coordination and the mechanisms of visual information processing. |
| Dana, Rafiee & Gholami, 2019 | 30 young athletes (experimental group mean age 13.26, control group mean age 12.87, all males) | Discipline not specified.<br><br>Level not specified. | Design: semi-experimental study.<br><br>Procedure: pre-training measurements – neurofeedback training – post-training measurements.   | ProComp2 + BioGraph Infiniti software. | 12 sessions twice a week for 6 weeks, 1 hour per session.   | Fz, F4, F3, O1 and Cz.<br><br>Increase SMR rhythm, enhance beta band and suppress theta wave. | Auditory        | Yes (passive control group) | Assess working memory performance (Wechsler digit span test) and perceptual-motor skills (Lincoln-Oseretsky test). | Improvement in working memory performance (direct and reverse digit span) and perceptual-motor skills.  |

|                                     |   |   |   |                                       |   |   |                 |                             |   |   |
|-------------------------------------|---|---|---|---------------------------------------|---|---|-----------------|-----------------------------|---|---|
| Mikicic et al., 2020                | 7 swimmers (mean age 20.6±1.40)   | Swimming.<br>Level not specified.       | Design not specified. No randomization.<br>Procedure: pre-training tests – neurofeedback training – post-training tests.  | System Flex 30 + TruScan software     | 20 sessions for 4 months (every 7 days on average), 6 series of 5 minutes each per session. | C3 and C4.<br>Decrease beta2.   | Visual          | No                          | EEG.<br>EMG.<br>Progressive Test.<br>Wingate Test.<br>Kreapelin Test. | Improved mental work performance which facilitates optimization of psychomotor activities.                              |
| Gong et al., 2020                   | 45 student-shooters: SMR, Alpha and Control group (mean age 19.5±2, all males). | Shooting.<br>Level: University level.   | Design not specified. Randomization.<br>Procedure: pre-training measurement – neurofeedback training – post-training measurement.   | Device not specified.                 | 6 sessions in 3 weeks, 30 trials per session, 25 minutes per session                        | Cz, C3, C4 T3 and T4.<br>SMR group: enhance SMR band in Cz, C3 and C4. Alpha group: enhance alpha band in T3 and decrease alpha band in T4. | Visual-auditory | Yes (passive control group) | Assess shooting performance.  | Higher shooting performance of the SMR group. Lower shooting performance of the Alpha group. Neuroplasticity promotion. |
| Christie, Bertollo & Werthner, 2020 | 31 ice hockey players (mean age 21.7 ± 2.0, 18 females)                         | Ice hockey.<br>Level: University level. | Design: longitudinal stratified random control experimental design.<br>Procedure: two phases: adaptation phase and intervention phase + post-training assessments. Adaptation | ProComp Infiniti + BioGraph software. | 15 sessions lasting 1.5 hours each over the period of 4.5 months.                           | Cz.<br>Increase SMR rhythm and inhibit theta and high beta bands.   | Visual-auditory | Yes (passive control group) | Assess shooting performance.  | Shooting performance improvement. Increase in SMR activity in lab setting. No changes in SMR                            |

|                       |   |   |  |   |  |   |                 |                             |  |   |
|-----------------------|---|---|--|---|--|---|-----------------|-----------------------------|--|---|
|                       |   |   | phase: 5 shooting assessments. Intervention phase: 14 shooting assessments + 15 SMR-NFT/BFT sessions.  |   |  |   |                 |                             |  | activity during performance.  |
| Maszczyk et al., 2020 | 12 judo athletes (aged 22-25, all males)  | Judo.<br><br>Level: national team.                    | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: pre-training phase – 1 <sup>st</sup> training cycle – four-week break – 2 <sup>nd</sup> training cycle – post-training phase   | Deymed Truscan system (soft. version 6.34.1761) | Two training cycles: 1. 15 sessions every other day lasting 10 minutes each. 2. 15 training sessions every other day lasting 4 minutes each.   | C3.<br><br>Increase beta1 rhythm and suppress theta rhythm. | Visual-auditory | Yes (sham feedback)         | Assess reaction speed.   | Significant reduction in reaction time.   |
| Domingos et al., 2020 | 45 participants: 15 athletes, 15 non-athletes and 15 control subjects (mean age 23.31 ± 4.20) | Discipline not specified.<br><br>Level not specified. | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: Athletes: familiarization phase – pre-test phase – neurofeedback training – performance test between 6 <sup>th</sup> and 7 <sup>th</sup> session – post-test phase.<br><br>Non-athletes: familiarization phase – pre-test phase – neurofeedback training – | Device not specified.                           | Athletes: 12 sessions of 25 trials of 60 seconds each, total time 300 minutes; sessions performed 2 times per week.<br><br>Non-athletes: 5 blocks of trials, 5 trials of 1 minute each; 25 minutes | Cz.<br><br>Increase alpha power.                            | Visual          | Yes (passive control group) | Assess short-term memory (Digit Span) and reaction time (Oddball Task) performances and standard and individual alpha bands amplitude. | Increase in SAB and IAB only in non-athlete group. Improvement in short-term memory tests in both control and athlete groups. Improvement in reaction time only in athlete group. |

|                            |  |   |  |  |  |  |          |                             |   |   |
|----------------------------|--|---|--|--|--|--|----------|-----------------------------|---|---|
|                            |  |   | performance test between 5 <sup>th</sup> and 6 <sup>th</sup> session and 10 <sup>th</sup> and 11 <sup>th</sup> session – post-test phase.    |  | per session, total time 375 minutes.   |  |          |                             |   |   |
| Shokri & Nosratabadi, 2021 | 45 basketball players:<br>Group 1 biofeedback, Group 2 biofeedback + neurofeedback, Control group (mean age 25, all males) | Basketball.<br><br>Level: novice.                     | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: pre-training assessment – neurofeedback/biofeedback training – post-training assessment. | ProComp Infiniti + BioGraph Infiniti software. | Group 1: 24 sessions in the lab (3 sessions per week in 8 weeks) + 8 sessions in the field.<br><br>Group 2: 24 sessions (3 sessions per week in 8 weeks): 40 minutes biofeedback + 20 minutes neurofeedback per session. | Cz and Cpz.<br><br>SMR protocol, increase alpha band and inhibit theta band. | Auditory | Yes (passive control group) | Assess basketball performance: free throw test, lay-up test, chest passing test and dribbling test. | Improvement in lay-up, dribbling and free throw of group 2 compared to group 1. Combined intervention more effective than biofeedback intervention alone. |
| Domingos et al., 2021      | 45 student-athletes: three-session-per-week intervention group, two-session-per-week                                       | Discipline not specified.<br><br>Level not specified. | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: 1 instruction session – pre-test phase – neurofeedback training – post-test phase.       | Device not specified.                          | 12 sessions of 25 trials of 60 seconds each, total time 300 minutes; sessions performed 2 or 3 times per week.   | Cz.<br><br>Improve Individual Alpha Band (IAB) amplitude.                    | Visual   | Yes (sham feedback)         | Assess changes in alpha activity and cognitive performance (Digit Span, N-Back and                  | Better EEG results in the relative IAB amplitude in the three- compared to the two-session-per-week group.  |



|                       |  |   |  |   |   |                                       |        |    |  |  |
|-----------------------|--|---|--|---|---|---------------------------------------|--------|----|--|--|
|                       | intervention group, control group (mean age 21.20±2.62 for the two-session protocol vs. 22.60±1.12 for the three-session protocol, all males)                            |   |  |   |   |                                       |        |    | Oddball Task).                               | Significant improvement in N-Back and Oddball cognitive performance tests in the three-session-per-week group. |
| Domingos et al., 2021 | 30 student-athletes: three-session-per-week group, two-session-per-week group (mean age 21.20 ± 2.62 for the two-session protocol vs. 22.60 ± 1.12 for the three-session | Discipline not specified.<br>Level not specified. | Design: randomized study.<br>Procedure: 1 instruction session – pre-test phase – neurofeedback training – post-test phase. | EEG training plugin included in the Somnium software. | 12 sessions of 25 trials of 60 seconds each (EEG and HRV recordings), total time 300 minutes; sessions performed 2 or 3 times per week. | Cz.<br>Improve IAB amplitude and HRV. | Visual | No | Assess if an $\alpha$ -NFT can increase HRV. | Significant improvement in IAB amplitude and HRV only in the three-session-per-week group.                     |

|                      |   |   |   |                       |   |  |                 |                             |   |   |
|----------------------|---|---|---|-----------------------|---|--|-----------------|-----------------------------|---|---|
|                      | protocol, all males)  |   |   |                       |   |  |                 |                             |   |   |
| Mottola et al., 2021 | Study 1A: 40 student-athletes: increase left frontal activity group (NFL), increase right frontal activity group (NFR), passive control group (aged 18-45, 14 females). Study 1B: 26 student-athletes from Study 1A: NFL and NFR groups (9 females) | Discipline not specified.<br>Level not specified. | Design: randomized between-subject study (Study 1A); randomized within-subject study (Study 1B).<br><br>Procedure Study 1A: visit 1 (anthropometric measurements + incremental ramp test on cycle-ergometer) – visit 2 (EEG recording + assessment of mood and self-control + brief writing task to elicit mild cognitive depletion and fatigue + second assessment of mood and self-control) – neurofeedback training – final assessment of mood and self control – cycling test on cycle-ergometer.<br><br>Procedure Study 1B: visit 3 (participants received the | BioExplorer software. | 1 session consisting of 6 blocks of 2 minutes each. | F3 and F4.<br><br>NFL group: decrease F3 alpha power and increase F4 alpha power.<br><br>NFR group: increase F3 alpha power and decrease F4 alpha power. | Visual-auditory | Yes (passive control group) | Assess the performance on the cycle-ergometer (time-to-exhaustion test) | Study 1A: greater relative left frontal cortical activity enhance cycling-based endurance exercise performance.<br><br>Study 1B: results from Study 1A confirmed. |

|                       |   |   |  |                       |   |  |          |                             |  |  |
|-----------------------|---|---|--|-----------------------|---|--|----------|-----------------------------|--|--|
|                       |   |   | opposite neurofeedback intervention, they received both the NFL and NFR interventions on separate occasions)                               |                       |   |  |          |                             |  |  |
| Domingos et al., 2021 | 45 student-athletes: noisy room, silent room, control group (mean age 22.02 ± 3.05, 7 females)          | Discipline not specified.<br><br>Level not specified. | Design: randomized control study.<br><br>Procedure: 1 familiarization session – pre-test phase – neurofeedback training – post-test phase. | Device not specified. | 12 sessions of 25 trials of 60 seconds each, total time 300 minutes; sessions performed 2 times per week. | Cz.<br><br>Increase IAB.   | Visual   | Yes (passive control group) | Assess impact of noise on working memory (N-Back Test) and reaction times (Oddball Task) and on IAB. | Both silent and noisy room had no results in increasing IAB. Significant results in all performance tests in the noisy room group. |
| Wang et al., 2022     | 30 golf players: increased Mu rhythm group (IMG), decreased Mu rhythm group (DMG), sham group (SG)(mean | Golf.<br><br>Level: novice.                           | Design: stratified random control experimental study.<br><br>Procedure: pre test-phase – neurofeedback training – post-test phase.         | BioTrace+ software.   | 1 session lasting 30-45 minutes.  | Cz.<br><br>IMG group: increase Mu rhythm. DMG group: decrease Mu rhythm. | Auditory | Yes (sham feedback)         | Assess the association between Mu rhythm and visuomotor tasks (golf putting task).                   | Significantly decreased Mu power in DMG group, but no significantly increased Mu power in IMG group. Significantly                 |

|                    |  |                                    |  |                    |                               |                             |        |                     |   |   |
|--------------------|--|------------------------------------|--|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------|---------------------|---|---|
|                    | age 27.4, 15 females)  |                                    |  |                    |                               |                             |        |                     |   | increased perceived control of action and improved performance in DMG group.  |
| Kober et al., 2022 | 26 triathletes: real feedback group, sham feedback group (mean age 30.3, 12 females) and 25 control participants: real feedback group, sham control group (mean age 30.06, 12 females) | Triathlon.<br>Level not specified. | Design: randomized study.<br>Procedure: pre-training phase – neurofeedback training – post-training phase. | SIMULINK software. | 1 session lasting 45 minutes. | Cz.<br>Increase SMR rhythm. | Visual | Yes (sham feedback) | Assess self-regulation abilities and brain structure (MRI). | Real feedback groups (triathletes and controls): up-regulation of SMR power, with a stronger linear increase in the second half of the training session in triathletes. Real feedback triathletes: larger brain volumes in inferior frontal gyrus, larger grey matter volumes in right inferior frontal gyrus, increased white matter volumes |

|                   |   |                               |  |   |   |  |          |                     |  |   |
|-------------------|---|-------------------------------|--|---|---|--|----------|---------------------|--|---|
|                   |   |                               |  |   |   |  |          |                     |  | bilaterally in inferior frontal gyrus, insula and orbitofrontale cortex, larger white matter volumes in left medial frontal gyrus and left precuneus. Real feedback controls: larger gray matter volumes in left inferior temporal gyrus, left parahippocampus, left fusiform gyrus and left precuneus. |
| Chen et al., 2022 | 36 golf players: function-specific instruction group (FSI), | Golf.<br>Level not specified. | Design not specified. No randomization.<br>Procedure: pre-training phase – neurofeedback | ProComp5<br>Infiniti +<br>BioGraph<br>Infiniti<br>software. | 1 session lasting 1.5 hours divided in 2 stages: pre-NFT and acquisition. | Fz.<br>Decrease frontal midline theta (FMT) power. | Auditory | Yes (sham feedback) | Assess performance in golf putting task. | FSI group: significant improvement in putting performance, significant  |

|                             |  |   |  |                                    |   |  |        |                     |  |  |
|-----------------------------|--|---|--|------------------------------------|---|--|--------|---------------------|--|--|
|                             | traditional instruction (TI) group, sham control group (mean age 37.1, 22 females) |   | training – post-training phase.  |                                    |   |  |        |                     |  | decrease in 4-7 Hz power.  |
| Mikicin & Orzechowski, 2022 | 10 track and field athletes and 10 swimmers (aged 18-25)                           | Track and field and swimming.<br><br>Level not specified. | Design not specified.<br><br>Procedure: pre-training measurements – neurofeedback training – post-training measurements. | System Flex 30 + TruScan software. | 20 sessions for 4 months (every 7 days on average), 6 series of 5 minutes each per session. | C3 and C4.<br><br>Decrease beta2 band. | Visual | Yes                 | Assess changes in EEG during exercise in attention states, warm-up, submaximal effort and recovery states. | Substantial modulation of spectral amplitude within sources located near frontal lobe, sensory cortex, motor cortex and anterior parietal and occipital lobes. Increased activity in sensorimotor cortex induced by submaximal exercise. |
| Pourbehbaha ni et al., 2023 | 40 student-golf players (mean age  | Golf.<br><br>Level: novice.                               | Design: randomized semi-empirical study.<br><br>Procedure: pre-test phase – neurofeedback                                | ProComp5 Infiniti + BioGraph       | 6 sessions (each consisting of 20 minutes of neurofeedback/sha                              | Cz.<br><br>Enhance SMR wave.           | Visual | Yes (sham feedback) | Examine combined effects of neurofeedback  | Individual independent effects of neurofeedback  |

|  |                   |  |   |                    |   |  |  |  |  |   |
|--|-------------------|--|---|--------------------|---|--|--|--|--|---|
|  | 26.1, 20 females) |  | intervention – post-test phase – follow-up. | Infiniti software. | m practices followed by golf putting for 3 blocks of 12 trials) |  |  |  | k practice combined with self-control practices on motor learning (golf putting task). | practice and self-control practice on motor performance and learning in golf putting. No combined effect. Maintenance of positive effects in follow-up for neurofeedback training but not for self-control technique. |
|--|-------------------|--|---|--------------------|---|--|--|--|--|---|

**Table 2** - Study quality appraisal.

| STUDY                                | SCREENING QUESTIONS | QUALITATIVE | QUANTITATIVE (RANDOMIZED) | QUANTITATIVE (NON-RANDOMIZED) | QUANTITATIVE (DESCRIPTIVE) | NOTES  | QUALITY SCORE |
|--------------------------------------|---------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|---------------|
| Rijken et al., 2016                  | YY                  |             |                           |                               |                            | No clear cut points for inclusion of participants. Athletes were not randomized and groups were not meant to compare. In Group B, one subject was lost at T2 and of two subjects one EEG measurement was missing because of insufficient signal quality because of woolly haired persons. The aim for each participant was to practice 20 times at home during the intervention period. A mean of 14.8 times were actually practiced. Two participants had technical problems and two participants had compliance problems. No control group existed, so causality could not be determined. It is unclear whether effects were generated because of placebo, coaching, training effects, or specific biofeedback training. | 40%           |
| Hosseini & Norouzi, 2017             | YY                  |             |                           |                               |                            | Quasi-experimental design. No randomization. No mention of confounders. Causality could not be determined due to the absence of a control group.   | 60%           |
| Maszczyk et al., 2018                | YY                  |             |                           |                               |                            | No details on randomization methods, only general information. Groups not comparable at baseline.  | 60%           |
| Mikicin, Szczypińska & Skwarek, 2018 | YY                  |             |                           |                               |                            | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors. A placebo effect may have been triggered in the control group. Groups not comparable at baseline.   | 40%           |
| Norouzi et al., 2018                 | YY                  |             |                           |                               |                            | Groups not comparable at baseline.   | 80%           |
| Szczypińska & Mikicin, 2019          | YY                  |             |                           |                               |                            | No randomization. Causality could not be determined due to the absence of a control group. No information about inclusion criteria of participants. No mention of confounders.   | 60%           |
| Mirifar et al., 2019                 | YY                  |             |                           |                               |                            | No details on randomization methods, only general information. Of 45 participants recruited, the experiment was completed by 38 (7 were lost   | 60%           |



|                                     |    |  |       |       |  |   |     |
|-------------------------------------|----|--|-------|-------|--|---|-----|
|                                     |    |  |       |       |  | after the baseline measurement, before NFT intervention) for which data were complete. No information about blinding of outcome assessors.  |     |
| Gołaś et al., 2019                  | YY |  | ?NY?Y |       |  | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors. Groups not comparable at baseline.   | 40% |
| Dana, Rafiee & Gholami, 2019        | YY |  |       | NYYYY |  | Semi-experimental design with convenience sampling.   | 80% |
| Mikicin et al., 2020                | YY |  |       | NYYNY |  | No randomization. Causality could not be determined due to the absence of a control group. No mention of confounders.   | 60% |
| Gong et al., 2020                   | YY |  | ?NYYY |       |  | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors. Groups not comparable at baseline.   | 60% |
| Christie, Bertollo & Werthner, 2020 | YY |  | YNN?N |       |  | 19 of the original 31 participants were analyzed. One subject was eliminated due to lefthandedness, and two participants were eliminated due to trigger in light malfunction during recordings. Eight participants failed to complete the study due to Olympic commitments (n = 2), life stress (n = 1), injury (n = 3), and dropout (n = 3). Three of the eight participants in the SMR-NFT/BFT group completed fewer than 15 sessions (10 and 12 SMR-NFT/ BFT sessions). No information about blinding of outcome assessors. Groups not comparable at baseline. | 20% |
| Maszczyk et al., 2020               | YY |  | ?NY?Y |       |  | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors. Groups not comparable at baseline.   | 40% |
| Domingos et al., 2020               | YY |  | ?YY?Y |       |  | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors.  | 60% |
| Shokri & Nosratabadi, 2021          | YY |  | ?NY?Y |       |  | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors. Groups not comparable at baseline.   | 40% |
| Domingos et al., 2021               | YY |  | ?YY?Y |       |  | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors.  | 60% |

|                             |    |  |       |  |       |  |     |
|-----------------------------|----|--|-------|--|-------|--|-----|
| Domingos et al., 2021       | YY |  | ?YN?Y |  |       | No details on randomization methods, only general information. Of 30 participants, 3 were excluded from the study due to poor-quality of the collected HRV data (1 from the 3 sessions/week group and 2 from the 2 sessions/week group). No information about blinding of outcome assessors.                     | 40% |
| Mottola et al., 2021        | YY |  | YNY?Y |  |       | No information about blinding of outcome assessors. Groups not comparable at baseline.   | 60% |
| Domingos et al., 2021       | YY |  | ?YY?Y |  |       | No details on randomization methods, only general information. No information about blinding of outcome assessors.   | 60% |
| Wang et al., 2022           | YY |  | ?YN?Y |  |       | No details on randomization methods, only general information. 49 trials rejected pretest and posttest (amplitudes exceeding $\pm 100 \mu V$ ). ANOVA results indicated that differences in the number of trials didn't affect findings. No information about blinding of outcome assessors.                     | 40% |
| Kober et al., 2022          | YY |  | ?YNY  |  |       | No details on randomization methods, only general information. Two triathletes and three controls had to be excluded from the analysis because of bad EEG data quality (1 male, 4 females, too many muscle- and eye movement artifacts).   | 60% |
| Chen et al., 2022           | YY |  |       |  | NYNYY | Consecutive sampling method. Twenty-two trials were rejected in the pre-test and 24 in the post-test because they had epochs with amplitudes exceeding $\pm 100 \mu V$ , which may have been contaminated by artifacts. ANOVA results indicated that differences in the number of trials didn't affect findings. | 60% |
| Mikicin & Orzechowski, 2022 | YY |  |       |  | NYYNY | No randomization. No mention of confounders.   | 60% |
| Pourbehbahani et al., 2023  | YY |  | ?NY?Y |  |       | No details on randomization methods, only general information. Groups not comparable at baseline. No information about blinding of outcome assessors.  | 40% |

**Note** - Y = Yes (criterion met); N = No (criterion not met); ? = Can't tell (not enough information).

**Figure 1** - . PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis) flow diagram of search strategy.

