

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Informatica



Tesi di Laurea magistrale

Analisi dello stress e del carico cognitivo mediante Brain-Computer Interface

Relatori

Prof. Andrea SANNA

Prof. Federico MANURI

Candidata

Claudia CIANFLONE

Dicembre 2024

Sommario

Introduzione

Il crescente sviluppo della tecnologia ha portato ad una maggiore integrazione tra esseri umani e dispositivi, tra cui le Brain-Computer Interface (BCI). Questi strumenti consentono di analizzare e processare i segnali cerebrali per applicazioni che spaziano dall'ambito medico a quello industriale. La robotica collaborativa è un settore che può beneficiare di questo tipo di tecnologia, con l'obiettivo di ottimizzare l'interazione uomo-robot, migliorando sicurezza, efficienza e naturalità. Tuttavia, l'introduzione di sistemi robotici in collaborazione diretta con l'uomo comporta sfide, come la gestione dello stress e del carico cognitivo percepito dagli utenti durante l'interazione.

Questa tesi esplora come le BCI, utilizzando dispositivi come *Emotiv MN8* e *Insight*, possano contribuire a monitorare stress e carico cognitivo nel contesto della robotica collaborativa. L'obiettivo è analizzare l'effetto dell'incertezza nella comunicazione uomo-robot, confrontando scenari in cui l'utente non è informato sulle azioni del robot con altri in cui le azioni vengono anticipate, riducendo così incertezza e stress.

Background

Il primo capitolo fornisce una panoramica delle metodologie più note utilizzate per misurare stress e carico cognitivo. Questi parametri sono fondamentali in contesti in cui la sicurezza e l'efficienza sono prioritarie, come l'industria e il trasporto. Lo stress è definito come la risposta fisiologica e psicologica a situazioni percepite come difficili o minacciose, mentre il carico cognitivo rappresenta la quantità di risorse mentali richieste per completare un compito.

Nel caso di robotica collaborativa che operi nello stesso spazio di lavoro dell'uomo, l'obiettivo è sviluppare robot che collaborino con gli esseri umani in maniera intuitiva e sicura, soprattutto in ambienti dinamici. Sfide tipiche includono l'adattamento a scenari imprevedibili, la riduzione dei carichi di lavoro degli operatori e la prevenzione di errori. L'incertezza nell'interazione è un fattore critico che può

aumentare lo stress e il carico cognitivo, riducendo l'efficacia dell'interazione uomo-macchina.

EEG e Dispositivi Emotiv

Il secondo capitolo approfondisce le tecnologie EEG (elettroencefalogramma) utilizzate per monitorare l'attività cerebrale. I dispositivi *Emotiv MN8* e *Insight* sono strumenti portatili e user-friendly che consentono di raccogliere dati EEG per analizzare stati cognitivi ed emotivi.

- **Emotiv Insight:** Progettato per monitorare attenzione, carico cognitivo e stress in tempo reale. Grazie alla sua portabilità e alle funzionalità avanzate di analisi dei dati, può essere facilmente integrato in contesti lavorativi e di ricerca.
- **Emotiv MN8:** Dispositivo più leggero, ideale per applicazioni quotidiane o sperimentali in ambienti meno strutturati.

Questi dispositivi elaborano i segnali EEG per fornire indicatori utili come il livello di concentrazione, stress, affaticamento e rilassamento. Questa capacità di monitoraggio passivo li rende ideali per applicazioni nella robotica collaborativa, dove è necessario ottimizzare l'esperienza utente senza interferire direttamente con l'attività in corso.

Progettazione e Sviluppo

Il terzo capitolo descrive la progettazione di esperimenti finalizzati a monitorare stress e carico cognitivo durante l'interazione con un braccio robotico. Gli esperimenti sono stati strutturati in tre fasi principali:

1. **Preparazione:** raccolta dei dati basali in condizioni controllate per creare un riferimento neutro per l'utente specifico.
2. **Interazione senza segnalazione:** l'utente interagisce con il braccio robotico, senza ricevere indicazioni sulle azioni successive da parte del robot, generando un senso di incertezza nell'utente.
3. **Interazione con segnalazione acustica:** il robot fornisce indicazioni chiare sulle sue azioni, riducendo così l'incertezza e favorendo una maggiore prevedibilità.

I dati raccolti includono le bande di potenza *Theta*, *Alpha*, *Beta Low* e *Beta High*, particolarmente indicative dei livelli di stress e carico cognitivo, corrispondenti ai due elettrodi T7 e T8, posizionati nelle regioni temporali sinistra e destra del cervello. Dalle bande di potenza selezionate sono state estrapolate tendenze di stress e carico cognitivo, confrontando le variazioni in funzione di un esercizio base e ottenendo riscontri soggettivi degli utenti tramite questionario.

Validazione e Discussione

Nel quarto capitolo vengono analizzati i risultati sperimentali ottenuti tramite l'uso delle BCI, al fine di chiarire se la presenza o meno di segnalazioni influenzano significativamente i livelli di stress e il carico cognitivo degli utenti.

In particolare, è stato osservato un impatto sulle reazioni psicofisiologiche in base alla presenza o meno di comunicazione dei movimenti di un braccio robotico (e.DO di COMAU). È stata analizzata quale condizione, in base al livello di incertezza del movimento del robot, genera una maggiore attivazione delle aree cerebrali associate alla gestione dello stress. La validità dei risultati è stata supportata dalla coerenza delle misurazioni effettuate tramite dispositivi Emotiv MN8 ed Insight.

Conclusioni e Prospettive Future

Il quinto capitolo riassume i contributi principali del lavoro, sottolineando come l'uso di BCI possa aiutare a migliorare significativamente l'interazione uomo-robot, garantendo un'interazione non solo efficace, ma anche confortevole per l'utente. Le implicazioni principali dello studio sono:

- **Ottimizzazione della robotica collaborativa:** sistemi che riducono lo stress e il carico cognitivo sono più efficienti e facilmente adottabili.
- **Applicazioni industriali:** questo approccio può migliorare la sicurezza e il comfort degli operatori in contesti lavorativi.
- **Espansione delle BCI passive:** la capacità di monitorare in tempo reale lo stato cognitivo ed emotivo apre nuove possibilità di personalizzazione in vari settori.

Le proposte future includono:

- Sperimentazioni con un numero maggiore di partecipanti per validare ulteriormente i risultati.
- Integrazione con tecnologie di realtà aumentata per fornire feedback visivi più efficaci in sostituzione e/o aggiunta agli stimoli sonori.

- Esplorazione di scenari complessi in cui la comunicazione tra uomo e robot richiede una maggiore cooperazione.
- Gestione e adattamento del flusso di lavoro del robot in funzione dello stress e del carico cognitivo dell'utente in tempo reale.

In conclusione, questo lavoro non solo dimostra l'efficacia delle BCI nella robotica collaborativa, ma suggerisce anche nuove strade per ottimizzare l'interazione uomo-robot in contesti complessi..

Ringraziamenti

Con questa tesi si conclude una fase importante della mia vita, un percorso che non avrei potuto intraprendere né completare senza il sostegno, l'affetto e la guida delle persone che mi circondano.

In primo luogo, desidero esprimere il mio sincero ringraziamento al mio relatore, Andrea Sanna, e al mio corelatore, Federico Manuri, per la loro professionalità e disponibilità durante tutto il percorso di ricerca.

Ringrazio i miei genitori, mia sorella, la mia famiglia, il mio fidanzato e tutti i miei amici, compagni di viaggio preziosi, che hanno condiviso con me gioie, ansie e fatiche.

Grazie per il vostro costante sostegno, per i momenti di spensieratezza, per le risate e per avermi tenuto la mano nei momenti di difficoltà.

A tutti voi voglio dedicare questa tesi, perché ciascuno di voi, a suo modo, ha contribuito a rendere possibile la realizzazione di questo importante traguardo.

Grazie di cuore.

Indice

Elenco delle tabelle	X
Elenco delle figure	XI
Acronyms	XIV
1 Introduzione	1
2 Background	4
2.1 Continuum Reale-Virtuale	4
2.2 Stress e carico cognitivo	5
2.3 Metodi di misurazione	6
2.3.1 Misure fisiologiche	7
2.3.2 Misure soggettive	10
2.4 Casi di studio	11
2.4.1 Piloti aerei e automobilisti	11
2.4.2 Simulazioni di volo in VR	11
2.4.3 Manutenzione industriale	13
2.4.4 Chirurgia	14
2.4.5 Gaming	14
2.5 BCI	14
2.5.1 BCI in ambienti XR	18
2.5.2 BCI e AR	18
2.5.3 BCI e VR	18
2.6 Robotica Collaborativa	19
3 EEG e Dispositivi Emotiv	23
3.1 EEG	23
3.1.1 Banda del segnale EEG	23
3.1.2 Elettrodi	29
3.1.3 Trasformata di Fourier	31

3.2	EMOTIV	33
3.2.1	Elaborazione dei Dati EEG di EmotivPRO	34
3.2.2	Struttura MN8	35
3.2.3	Struttura Insight	38
3.3	EmotivUnityPlugin	41
4	Progettazione e Sviluppo	43
4.1	Studi preliminari	43
4.2	Procedura	52
4.2.1	Obiettivi dell'Analisi	52
4.2.2	Descrizione delle Fasi della Procedura	53
4.3	Applicazione Unity	56
4.3.1	La classe MyDataRecorder	57
4.3.2	La classe GameManager	61
4.3.3	Integrazione di MyDataRegister e GameManager agli script degli esercizi	62
4.4	Esercizio di robotica collaborativa	63
4.4.1	Il Compito di Assemblaggio	64
4.4.2	Raccolta di Dati	65
4.5	Tracciamento dei Grafici	65
4.5.1	Il metodo in dettaglio	66
4.5.2	Analisi EEG con TLI, Engagement Index e Beta/Alpha Ratio	69
5	Validazione	70
5.1	Procedura	70
5.2	Test e Risultati	71
6	Conclusione	81
A	Connessione Robot	84
	Bibliografia	90

Elenco delle tabelle

3.1	Riepilogo delle correlazioni EEG delle potenze spettrali per la valutazione del carico cognitivo.	27
3.2	Specifiche Tecniche dei Dispositivi Utilizzati, dal sito Emotiv gitbook	40
5.1	NASA TLX Rating Table	72

Elenco delle figure

2.1	Continuum Reale-Virtuale	4
2.2	L'attività elettrica dei neuroni che può essere rilevata con un dispositivo EEG, da [9].	8
2.3	Risoluzione spaziale e temporale di diversi strumenti di neuroimaging, da [10].	9
2.4	Il NASA Task Load Index, citato in [15].	12
2.5	Simulatore di volo in realtà virtuale descritto nello studio [17]: configurazione hardware (a sinistra). Rendering visuale sull'HMD a terra (in alto a destra) e durante il tracciamento del bersaglio (in basso a destra).	13
2.6	Rappresentazione spettrografica riportata nello studio [22] durante un gioco di simulazione strategica, paragonando i giocatori abituali e i non giocatori.	15
2.7	BCI invasiva su Michael Edwards Nagle, da [25].	16
2.8	Metodo di registrazione del segnale cerebrale semi-invasivo, ricavato da [26].	16
2.9	BCI non invasiva, da [27].	17
2.10	Con riferimento allo studio Riferimento allo studio [30]: Auricolare HoloLens 2 AR con componente di rilevamento delle onde cerebrali incorporato (supporto clip-on EEG sopra la corteccia visiva e pre-frontale, due elettrodi EEG evidenziati in arancione); Un'immagine ravvicinata del supporto clip-on con 7 elettrodi; Utente che indossa un sistema "migliorato" AR-BCI (clip-on in blu sopra la corteccia visiva e pre-frontale); Una rappresentazione visiva della palla da calcio che viene generata quando l'utente è impegnato nel gioco. . .	19
2.11	Dimostrazione del funzionamento del simulatore di volo VR con l'uso della BCI riferito allo studio [31].	19
3.1	Onde Cerebrali	25
3.2	Componenti ERP	28
3.3	Sistema internazionale 10-20	30

3.4	Sistema internazionale 10-10	30
3.5	Dispositivo Emotiv MN8, dal sito Emotiv.	36
3.6	Brain Waves e Performance Metrics con MN8, ricavato da [48].	37
3.7	Dispositivo Emotiv Insight, dal sito Emotiv.	38
3.8	Struttura del codice del plugin Unity per Emotiv riferito a [50].	42
4.1	Struttura della sessione sperimentale proposta in [29]	44
4.2	Fase di training proposta in [52].	46
4.3	Fase di testing proposta in [52].	46
4.4	Fase di Training con fasi di bassa e alta tensione proposta in [2].	48
4.5	Feedback dello stress dell'utente.	49
4.6	Il modello a quadrante in [56].	51
4.7	Struttura dell'esperimento descritto in [21].	51
4.8	Fasi dello studio	53
4.9	Pagina principale, da cui far partire la sessione e i test.	57
4.10	Esempi di risposte nello Stroop World Color Test.	57
5.1	Esercizio di Sustained Attention To Response Task.	74
5.2	Esercizio di Stroop Word Color Test.	75
5.3	Esercizio di Aritmetica.	76
5.4	Confronto tra esercizi di robotica collaborativa con e senza segnalazione acustica (Utente 1).	77
5.5	Confronto tra esercizi di robotica collaborativa con e senza segnalazione acustica (Utente 2).	79

Acronyms

BCI

Brain-Computer Interface

XR

Extended Reality

EEG

Elettroencefalogramma

fNIRS

Functional Near Infrared Spectroscopy

EOG

Elettrooculogramma

ECG

Elettrocardiogramma

HRV

Heart Rate Variability

ANS

Autonomic Nervous System

GSR

Galvanic Skin Response

EDA

Electrodermal Activity

PSS

Perceived Stress Scale

HRC

Human-Robot Collaboration

HRI

Human-Robot Interaction

HCI

Human-Computer Interaction

TAM

Technology Acceptance Model

cobot

Collaborative-Robot

TLX

Task Load Index

SVM

Support-Vector Machines

EP

Evoked Potential

ERP

Event-Related Potential

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, la crescente integrazione tra esseri umani e tecnologie avanzate ha stimolato particolare interesse per dispositivi innovativi come le **Brain-Computer Interface (BCI)**, che consentono di analizzare e comprendere i segnali cerebrali per diverse applicazioni.

Contestualmente, il campo della **robotica collaborativa** ha guadagnato rilevanza, puntando a migliorare l'interazione tra uomo e robot attraverso sistemi sempre più intuitivi e sicuri. L'utilizzo di queste tecnologie rappresenta un'interessante sfida, ma pone interrogativi cruciali sullo **stress** e sul **carico cognitivo** percepiti dagli utenti durante l'interazione con sistemi robotici.

Questa tesi "**Analisi dello stress e del carico cognitivo mediante Brain-Computer Interface**" nasce dall'esigenza di affrontare una delle principali sfide della robotica collaborativa: garantire che l'interazione tra utenti e robot non solo sia efficace, ma anche confortevole per l'utente. La comprensione del carico cognitivo e dello stress grazie all'utilizzo di dispositivi BCI, come l'Emotiv MN8 e Insight, in un contesto di robotica collaborativa, ricopre un'importanza fondamentale per ottimizzare tali sistemi e promuoverne una più ampia adozione. Inoltre, il crescente interesse per l'uso della realtà aumentata (AR) come strumento per ridurre l'incertezza nell'interazione uomo-robot ha ispirato la ricerca di soluzioni innovative per migliorare la comunicazione tra le parti.

L'obiettivo principale di questo elaborato è dunque quello di esaminare il carico cognitivo e lo stress degli utenti durante l'uso dei dispositivi BCI Emotiv nel contesto della robotica collaborativa, ponendo particolare attenzione a due scenari sperimentali:

- Un'interazione in cui l'utente non è informato sulle azioni future del robot, causando incertezza.
- Un'interazione che anticipa le azioni del robot, ipotizzando una riduzione dello stress e del carico cognitivo.

La letteratura analizzata evidenzia una crescente attenzione verso le tecnologie BCI e i loro molteplici utilizzi.

La BCI passiva, in particolare, permette il monitoraggio delle condizioni cognitive dell'utente in vari contesti che spaziano dall'ambito lavorativo, in cui è importante analizzare il livello di attenzione, concentrazione o affaticamento durante attività che richiedono elevate capacità cognitive, quello sanitario per identificare condizioni legate allo stress, all'ansia o alla depressione e fornendo quindi un valido supporto per diagnosi precoci e terapie personalizzate, quello della sicurezza, monitorando lo stato di vigilanza di operatori in settori ad alto rischio, come il trasporto aereo o la guida autonoma, dove la distrazione o la fatica possono avere conseguenze gravi, e quello videoludico del gaming e dell'intrattenimento, permettendo la personalizzazione dell'esperienza di gioco, adattandola in tempo reale alle emozioni e al grado di coinvolgimento del giocatore, migliorando l'immersione e il divertimento.

Allo stesso tempo, la robotica collaborativa mira a migliorare l'efficienza e la sicurezza nei contesti in cui uomo e macchina operano fianco a fianco, con l'obiettivo di facilitare l'adattamento dei robot a situazioni dinamiche e imprevedibili.

Queste tecnologie sono progettate per ottimizzare i processi produttivi, ridurre i carichi fisici e mentali dell'operatore umano e favorire un'interazione naturale e intuitiva.

Gli studi che combinano BCI e robotica collaborativa sono dunque di fondamentale rilevanza, rendendo questo lavoro un contributo significativo per esplorare nuove modalità di interazione uomo-macchina. Questo studio adotta un approccio sperimentale basato sull'utilizzo dei dispositivi Emotiv e di un braccio robotico. Dopo una fase iniziale di raccolta dei dati in condizioni controllate, tramite degli esercizi preliminari, sono stati progettati tre esperimenti distinti con l'utilizzo del braccio robotico per valutare le reazioni cognitive ed emotive degli utenti in situazioni con e senza una segnalazione per ridurre l'incertezza, fornendo maggiore prevedibilità all'azione del robot. I dati raccolti sono stati analizzati e confrontati con database esistenti per verificare l'affidabilità delle misurazioni.

Il seguente lavoro di tesi è strutturato come segue:

- Background 2: Una panoramica delle principali metodologie per la misurazione di stress e carico cognitivo, con un focus sulla robotica collaborativa e sulle sue sfide.
- EEG e Dispositivi Emotiv 3: Approfondimento sulle tecnologie utilizzate, incluse le misurazioni EEG e le funzionalità del dispositivo Emotiv.
- Progettazione e Sviluppo 4: Dettaglio dell'applicazione sviluppata, dei protocolli sperimentali e delle metodologie di analisi.

- Validazione e Discussione 5: Presentazione e interpretazione dei dati raccolti ed elaborati con particolare attenzione alle implicazioni della robotica collaborativa.
- Conclusioni e proposte future6: Riflessioni finali e suggerimenti per ulteriori sviluppi.

Questo lavoro si propone di fornire un contributo innovativo alla comprensione dell'interazione uomo-robot, dimostrando come l'uso combinato di BCI e realtà aumentata possa migliorare significativamente l'esperienza utente. Le analisi condotte mirano non solo a rispondere alle domande di ricerca, ma anche a proporre soluzioni pratiche per il futuro della robotica collaborativa.

Capitolo 2

Background

Il seguente capitolo mira a comprendere meglio cosa si intende per carico cognitivo e stress, sottolineando come essi siano due concetti intrinsecamente collegati nel contesto dell'apprendimento. Verranno mostrati e discussi i metodi di misurazione utilizzati per il calcolo di tali fattori e verranno illustrati diversi casi di studio presi in esame in vari contesti. Infine si discuterà dell'utilizzo delle BCI in ambienti XR.

2.1 Continuum Reale-Virtuale

In questo capitolo verranno più volte citati concetti come Realtà Virtuale (VR), Realtà Aumentata (AR) e Realtà Mista (XR).



Figura 2.1: Continuum Reale-Virtuale

Il continuum Reale-Virtuale, ideato da Paul Milgram e Fumio Kishino nel 1994, è un framework teorico che si riferisce allo spettro di possibilità tecnologiche che spazia dal mondo interamente reale a quello totalmente digitale e virtuale.

Nel diagramma in Fig. 2.1, il termine realtà mista comprende la maggior parte del continuum, ad eccezione degli endpoint. Per realtà mista si intende, infatti, qualsiasi ambiente che combini oggetti reali e virtuali in un singolo display. Le diverse sezioni del continuum definiscono quanti elementi reali rispetto a quelli digitali vengono visualizzati, a partire dall'estremità sinistra, l'ambiente reale, dove vengono visualizzati solo oggetti reali o fisici e nessun elemento digitale, rispetto all'estremità destra, l'ambiente virtuale, dove la totalità degli oggetti visualizzati sono in formato digitale [1].

2.2 Stress e carico cognitivo

- Lo **stress** è un fattore fisico, chimico ed emotivo che porta alla tensione del cervello e del corpo, descritto generalmente come uno squilibrio tra le esigenze ambientali e le capacità individuali, derivante dall'interazione di fattori interni ed esterni. Può essere diviso in "*eustress*" o "*stress positivo*", che può aiutare a rimanere concentrati, mantenendo alte motivazione e produttività, o anche per superare sfide e situazioni pericolose e "*distress*" o "*stress negativo*", correlato ad emozioni e reazioni fisiologiche negative, diminuendo la produttività e la capacità dell'individuo di reagire [2]. Riconoscere precocemente i livelli di stress è essenziale per prevenire ulteriori danni al benessere complessivo. In questo contesto il cervello gioca un ruolo fondamentale nel riconoscimento delle emozioni [3] e i segnali EEG possono essere utili per analizzare e identificare le emozioni che una persona sta vivendo. Le persone sane bilanciano i sistemi simpatico e parasimpatico del sistema nervoso autonomo (ANS), ma lo stress attiva una risposta "fight-or-flight". Anche situazioni non minacciose possono innescare questa risposta, come esami e discorsi. La ricerca [4] mostra una specializzazione degli emisferi cerebrali nelle emozioni: il sinistro per le positive e il destro per le negative, con la corteccia frontale coinvolta nell'elaborazione emotiva. Gli studi EEG e di neuroimaging hanno rivelato che la corteccia prefrontale destra è centrale nella risposta allo stress e può influire sulla salute mentale e fisica.
- Il **carico cognitivo o mentale** è l'impegno che produce la memoria per elaborare ed immagazzinare le informazioni durante un processo di apprendimento. La teoria del carico cognitivo di John Swaller descrive un'architettura cognitiva in cui la capacità della memoria di lavoro è limitata. Esistono tre tipi di carichi cognitivi: intrinseco, estraneo e pertinente:
 - Il carico cognitivo *intrinseco* imposto da un compito consiste nella complessità intrinseca del contenuto in relazione al livello di competenza dell'utente.

Esso è determinato dalla naturale complessità dell'informazione che deve essere processata.

- Il carico cognitivo *estraneo* è il peso mentale non necessario causato da una progettazione e presentazione delle informazioni cognitive inappropriata; in altre parole, i processi cognitivi che inducono carico estraneo non contribuiscono all'apprendimento.
- Il carico cognitivo è associato ai processi direttamente rilevanti per l'apprendimento, e implica la costruzione di automatismi e di modelli di pensiero che aiutino la categorizzazione delle informazioni. Sono, dunque, le risorse cognitive necessarie per gestire il carico cognitivo intrinseco. Il carico *pertinente* si verifica quando la presentazione delle informazioni è progettata in modo tale da favorire l'assimilazione di nuovi concetti.

La teoria in questione afferma che per ottimizzare l'apprendimento c'è bisogno di migliorare il carico cognitivo pertinente e ridurre il carico cognitivo estraneo [5].

Gli effetti di un alto carico mentale includono sia una diminuzione delle prestazioni che un aumento dei livelli di stress, influenzando la valutazione cognitiva e inducendo, conseguentemente all'aumento delle richieste cognitive, risposte psicologiche e fisiologiche.

Un basso carico mentale può comportare un sottoutilizzo delle risorse cognitive e un ridotto impegno nei compiti, portando potenzialmente alla noia o al disimpegno. Lo stress può essere benefico, a breve termine, per superare ad esempio sfide o situazioni pericolose. Tuttavia, lo stress cronico può avere effetti negativi sulla salute e sul benessere mentale, portando potenzialmente ad ansia, frustrazione, nervosismo, paura, preoccupazione e disagio. La relazione [6] tra carico cognitivo e stress è complessa e può variare a seconda del contesto e delle condizioni specifiche. Inoltre, è importante considerare che la natura interconnessa tra carico cognitivo e stress può essere bidirezionale, con il carico cognitivo che può influenzare lo stress e viceversa. È dunque di fondamentale importanza comprendere come questi fattori si influenzino a vicenda e come possano influenzare le esperienze e le prestazioni degli individui, in modo tale da gestirli efficacemente e mantenere elevate prestazioni cognitive e benessere psicologico [7].

2.3 Metodi di misurazione

Il carico cognitivo e lo stress possono essere misurati utilizzando varie metodologie e tecniche, che possono essere sia oggettive (fisiologiche) che soggettive (quiz).

2.3.1 Misure fisiologiche

Alcuni approcci comuni nel campo delle tecniche di **neuroimaging** includono:

- Elettroencefalografia (EEG),
- Spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso (fNIRS)
- Risonanza magnetica funzionale (fMRI)

Alcuni approcci prevedono misurazioni **fisiologiche**, come:

- Pupillometria, elettrooculogramma (EOG), frequenza di blink rate e eye-tracking
- Variazione della frequenza cardiaca, elettrocardiogramma (ECG), pressione sanguigna
- Variazione della frequenza respiratoria
- Risposta galvanica della pelle (Galvanic Skin Response - GSR), anche chiamata attività Elettrodermica (Electrodermal activity - EDA) o Conduttanza Cutanea (Skin Conductance - SC)
- Temperatura della pelle (Skin Temperature - ST)

Verranno presi in esame i metodi più utilizzati negli studi consultati.

EEG

L'EEG è un indice fisiologico che misura l'attività elettrica del cervello. È una tecnica non invasiva che registra l'attività neuronale (Figura 2.4.) attraverso elettrodi posizionati sulla superficie del cuoio capelluto. Esistono diversi dispositivi che possono essere utilizzati per registrare un EEG, e tali dispositivi possono variare da un minimo di un singolo sensore a 256 elettrodi. L'EEG può essere utilizzato come misura real-time e continuativa del carico cognitivo, in quanto riflette le variazioni nell'attività cerebrale che si verificano durante il processo cognitivo. Quando una persona svolge un compito che richiede sforzo mentale, l'attività elettrica nel cervello varia in modo caratteristico. Queste variazioni possono essere osservate e registrate tramite l'EEG. I neuro-marcatori EEG possono anche, ad esempio, aiutare a identificare i modelli relativi alle attività di immagini motorie (Motory Imagery) e, utilizzati in combinazione con algoritmi di apprendimento automatico come SVM (Support Vector Machine), permettono di classificare e interpretare i segnali EEG relativi alle immagini motorie. Le immagini motorie comportano la simulazione mentale dei movimenti senza eseguirli fisicamente.

Analizzando i segnali EEG, i neuro-marcatori possono rilevare questi movimenti immaginati, permettendo ai pazienti di interagire con i sistemi BCI per controllare dispositivi esterni o interfacce. Allenando il classificatore SVM sui dati EEG contenenti neuro-marcatori, il sistema può distinguere accuratamente tra diverse classi di attività di immagini motorie, come la mano sinistra, la mano destra e i movimenti del piede, facilitando una riabilitazione efficace per i pazienti.[8] Molti studi utilizzano l'elettroencefalografia per studiare condizioni come l'epilessia, i disturbi del sonno, o altri disturbi cerebrali. Nel contesto di un sistema basato sull'EEG per riconoscere i livelli di attenzione, la valutazione del carico cognitivo e dello stress potrebbe essere importante per comprendere meglio le risposte cognitive e fisiologiche dei partecipanti durante le attività proposte e per ottimizzare le prestazioni del sistema [6].

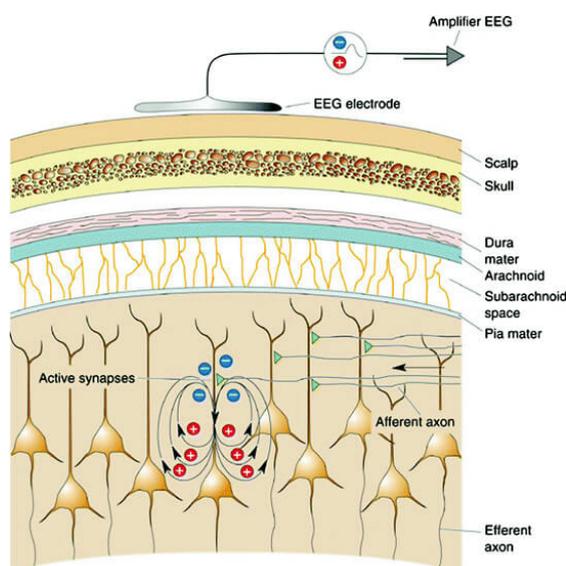


Figura 2.2: L'attività elettrica dei neuroni che può essere rilevata con un dispositivo EEG, da [9].

fNIRS

La spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso (functional near infrared spectroscopy, fNIRS) misura i cambiamenti nell'ossigenazione del sangue nelle aree corticali del cervello, fornendo informazioni sulle regioni cerebrali attivate durante compiti cognitivi e emotivi, senza le problematiche intrinseche all'uso, ad esempio, delle tradizionali tecniche di Risonanza Magnetica Funzionale (fMRI). È utile per studi che richiedono il monitoraggio dell'attività cerebrale con una risoluzione temporale moderata e una buona risoluzione spaziale superficiale. Il segnale fNIRS consente

lo studio dell'apprendimento, l'acquisizione del linguaggio, le funzioni sensoriali e motorie, le emozioni, le interazioni sociali e l'influenza di una serie di processi patologici. L'fNIRS è stato impiegato per valutare l'esperienza utente di software, adattare compiti e misurare il carico mentale durante attività come il controllo del traffico aereo. Sono tecniche resistenti agli artefatti da movimento ed economiche da condurre. Gli studi attuali cercano di comprendere come misurare l'impatto dello stress con delle misurazioni fNIRS del carico mentale e viceversa. Sebbene siano stati condotti numerosi studi utilizzando l'fNIRS per esaminare il carico mentale e lo stress separatamente, pochi ricercatori hanno esaminato se queste esperienze influenzino le misurazioni fisiologiche [7].

Ciascun metodo di neuroimaging può aiutare a rispondere a diverse domande di ricerca.

L'fNIRS è in grado di rispondere a domande del tipo *“Quali aree del cervello sono coinvolte in attività cognitive specifiche?”*.

L'EEG registra l'attività principalmente degli strati esterni del cervello (cioè ha una bassa risoluzione spaziale), ed è più adatto per domande come *“A quali parti, ad esempio, di un video i partecipanti hanno prestato maggiore attenzione?”*

La risonanza magnetica funzionale (fMRI) è più adatta a rispondere a domande come *“Quale parte del cervello è correlata ai cambiamenti dell'attenzione?”*

Il più grande punto di forza dell'EEG è che può misurare l'attività neurale su una scala di millisecondi, che può misurare i processi preconsce, come si può vedere nella Figura 2.3

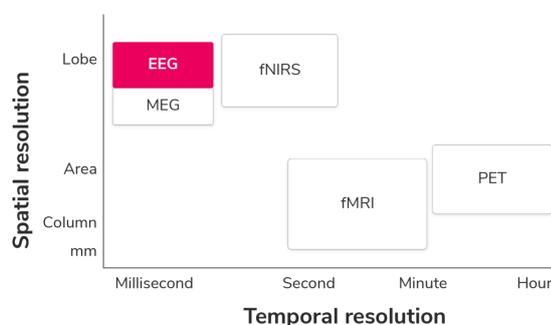


Figura 2.3: Risoluzione spaziale e temporale di diversi strumenti di neuroimaging, da [10].

Pupillometria e eye tracking

La pupillometria è un prezioso indicatore in tempo reale ben convalidato per misurare il carico cognitivo in ambienti di formazione in realtà virtuale (VR). La

dilatazione della pupilla è una risposta involontaria che riflette l'attività di una regione del cervello che regola l'eccitazione, l'attività mentale e l'emozione. Per questo motivo è una delle misure fisiologiche più sensibili e affidabili per il carico cognitivo, specialmente quando i compiti coinvolgono la gestione delle emozioni [11]. Attraverso delle registrazioni effettuate mediante eye tracker [12], può essere valutata la dinamica della dilatazione della pupilla come una misura dello sforzo mentale, dove ad un aumento del diametro della pupilla consegue un aumento dello sforzo mentale. Anche la distribuzione dello sguardo può essere analizzata, attraverso modelli di distribuzione dello sguardo per capire dove viene concentrata maggiormente l'attenzione.

Variazione della frequenza cardiaca

Lo stress psicofisiologico influenza la variabilità della frequenza cardiaca (HRV) attraverso il sistema nervoso autonomo (ANS), il quale regola le funzioni cardiovascolari: il sistema nervoso simpatico aumenta la frequenza cardiaca e il parasimpatico la diminuisce. Le fluttuazioni della frequenza cardiaca possono essere calcolate tramite ECG e possono indicare stati di stress, eccitazione, affaticamento e altri stati emotivi, fornendo informazioni sulle risposte fisiologiche degli utenti. Il monitoraggio della frequenza cardiaca può aiutare a identificare i cambiamenti nei livelli di eccitazione fisiologica, che possono influenzare le prestazioni, il processo decisionale e la sicurezza ad esempio durante le attività di guida o di volo [13].

Risposta Galvanica della pelle

La risposta galvanica della pelle (GSR) anche detta EDA è la misura delle variazioni nelle caratteristiche elettriche della pelle, come ad esempio la conduttanza, a seguito della variazione della sudorazione del corpo umano. Essa può essere utilizzata come indicatore in tempo reale del carico cognitivo poiché la conduttanza cutanea degli utenti aumenta con il carico cognitivo, mentre diminuisce al rilassamento dell'utente. Questo è utile per studiare i cambiamenti rapidi, ovvero il livello di stress di un preciso momento, ma non è utile per capire l'effettivo livello di stress che una persona sta subendo [14].

2.3.2 Misure soggettive

L'integrazione di misure fisiologiche (EEG, ECG, GSR...) con metodi convenzionali (NASA-TLX, test prestazionali, esecuzione contemporanea di due compiti, interviste...) può migliorare significativamente la valutazione del carico cognitivo.

Nasa-TLX

Il NASA Task Load Index (NASA-TLX) [15] è uno strumento soggettivo di valutazione multidimensionale del carico di lavoro ampiamente utilizzato, che misura diversi aspetti del carico di lavoro, come richieste mentali, fisiche e temporali, sforzo, frustrazione e prestazioni, come mostrato in Figura 2.4. Per multidimensionale si intende, infatti, una valutazione che non si limita a una singola misura del carico di lavoro, ma considera più fattori che contribuiscono ad esso, per ottenere una visione più completa e accurata della situazione. Viene utilizzato in un'ampia varietà di settori, come la sanità, l'aviazione e altri settori ad alto rischio. È vastamente usato in sessioni di training e in altri studi intrapresi in procedure cliniche, chirurgiche minimamente invasive, robotiche, oltre a diverse strategie di allenamento come ad esempio simulazione, modelli cadaverici, conferenze e realtà virtuale. Il carico cognitivo auto-percepito è valutato da 0 a 100 punti in base a sei diverse sottoclassi: domanda mentale, domanda fisica, domanda temporale, prestazioni, sforzo e frustrazione.

2.4 Casi di studio

Diversi approfondimenti accademici e ricerche esplorano gli effetti del carico cognitivo e dello stress sugli utenti e sulle loro prestazioni, spesso impiegando tecnologie XR.

2.4.1 Piloti aerei e automobilisti

Nello studio [16], vengono monitorati e valutati in tempo reale gli stati cognitivi e fisiologici di piloti e automobilisti. Questo monitoraggio include il carico mentale, la vigilanza ridotta, la stanchezza e la sonnolenza, utilizzando misure fisiologiche come EEG, EOG, ECG e GSR. Lo scopo principale di tali ricerche è prevenire potenziali rischi per la sicurezza e gli incidenti, attraverso sistemi di allarme precoce che sollecitano piloti e conducenti ad azioni correttive tempestive per garantire la sicurezza delle operazioni. Inoltre, la personalizzazione e l'ottimizzazione dei programmi di addestramento per piloti e conducenti vengono effettuate in base alle risposte cognitive e fisiologiche individuali, al fine di massimizzare l'efficacia del sistema.

2.4.2 Simulazioni di volo in VR

Numerosi studi si concentrano sull'analisi del carico cognitivo sperimentato dai piloti attraverso l'utilizzo di simulatori di volo basati sulla realtà virtuale. Questi studi spesso coinvolgono piloti di caccia e si avvalgono di ambienti di combattimento

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date
<p>Mental Demand How mentally demanding was the task?</p> <p>Very Low Very High</p>		
<p>Physical Demand How physically demanding was the task?</p> <p>Very Low Very High</p>		
<p>Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?</p> <p>Very Low Very High</p>		
<p>Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?</p> <p>Perfect Failure</p>		
<p>Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?</p> <p>Very Low Very High</p>		
<p>Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?</p> <p>Very Low Very High</p>		

Figura 2.4: Il NASA Task Load Index, citato in [15].

e scenari di tracciamento realistici, come si può vedere in Fig. 2.5. Fornire un'analisi dettagliata del carico cognitivo durante varie condizioni di volo, come visibilità ridotta e compiti cognitivi secondari, all'interno di un ambiente di simulazione, risulta utile per ottimizzare la formazione dei piloti [17]. Inoltre, l'acquisizione e l'analisi in tempo reale dell'attività cerebrale dei piloti durante le simulazioni di volo consentono di osservare come un aumento della percezione della difficoltà da parte del pilota corrisponda a un maggiore consumo complessivo di risorse cognitive [12]. L'importanza di valutare la gestione del carico cognitivo da parte dei piloti, sia esperti che novizi, durante l'addestramento in realtà virtuale, utilizzando indicatori comportamentali e fisiologici, risiede nel riconoscimento che un'efficiente gestione del carico cognitivo in settori critici per la sicurezza è fondamentale per ridurre gli errori garantendo la sicurezza, ottimizzare le prestazioni, migliorare

il processo decisionale e potenziare l'efficacia della formazione [18]. Le misure utilizzate in questi casi sono state sia fisiologiche che soggettive: EEG, ECG, HRV dimensione pupillare, tempo di completamento dei compiti, tasso di errore, Nasa-TLX, Task Load Index - indice utilizzato per valutare il carico di lavoro cognitivo di un individuo durante l'esecuzione di un compito -, Task Engagement Index - indice utilizzato per valutare il coinvolgimento del partecipante in un compito o un'attività -. In [12], oltre al visore HTC Vive Pro Eye, il quale viene utilizzato per fornire una visualizzazione immersiva della cabina di pilotaggio e dell'ambiente esterno ai partecipanti, vediamo anche l'uso del dispositivo Emotiv EPOC Flex-32, un headset EEG a 32 canali, utilizzato per monitorare e valutare il carico cognitivo, l'engagement e in generale l'attività cerebrale dei partecipanti durante le simulazioni di volo nel simulatore VR.



Figura 2.5: Simulatore di volo in realtà virtuale descritto nello studio [17]: configurazione hardware (a sinistra). Rendering visuale sull'HMD a terra (in alto a destra) e durante il tracciamento del bersaglio (in basso a destra).

2.4.3 Manutenzione industriale

In [19] viene esplorato l'effetto dell'uso della realtà aumentata (AR) nell'assistenza alla manutenzione industriale, concentrandosi sull'analisi dello stress fisico durante attività di diversa complessità. Dalla ricerca è emerso che un'istruzione basata su AR è più efficiente e meno stressante dell'istruzione cartacea, indicando che il sistema AR può offrire vantaggi nella riduzione dei carichi di lavoro fisici e nei tempi di completamento dei task, migliorando le prestazioni complessive.

2.4.4 Chirurgia

Anche in ambito chirurgico viene adottato un approccio innovativo per la progettazione di ambienti di training basati su XR. In particolare, nel contesto della chirurgia ortopedica [20] vengono presi in considerazione i fattori HCI dell'affordance e del carico cognitivo per lo sviluppo di ambienti di formazione efficaci. Complessivamente, l'approccio di integrazione di modelli informativi e il coinvolgimento degli utenti nel processo di progettazione, hanno contribuito a creare ambienti di allenamento XR che favoriscono l'apprendimento efficace e l'acquisizione di abilità e conoscenze da parte dei partecipanti.

2.4.5 Gaming

Durante il gioco, fattori come l'aumento dei livelli di difficoltà o la pressione del tempo possono indurre stress, manifestandosi in modelli specifici osservabili nei segnali EEG. L'analisi dei livelli di stress durante il gameplay tramite l'EEG sottolinea l'importanza del classificatore SVM nella classificazione accurata dei livelli di stress basati sui segnali cerebrali, indicando la necessità di ulteriori ricerche per approfondire quest'area [21].

L'analisi dello stress in [22] è stata condotta utilizzando segnali EEG per misurare il rapporto tra le bande beta e alpha (Beta-Alpha Ratio - BAR) durante il gameplay. I soggetti sono stati divisi in due gruppi: gamer e non-gamer, e sono stati esposti a diversi tipi di giochi. I risultati mostrano che i non-gamer tendono a sperimentare livelli di stress più elevati rispetto ai gamer, specialmente durante i giochi strategici. Durante il gameplay, infatti, l'attività nella banda beta nella regione frontale del cervello aumenta, indicando un maggiore stress e concentrazione, come si vede in Fig. 2.6. Nel settore del gaming, i risultati ottenuti dal monitoraggio dello stress durante una sessione di gioco possono essere utilizzati per migliorare il design dei giochi, promuovere pratiche di gioco consapevoli e integrare il biofeedback nei giochi terapeutici .

2.5 BCI

Una BCI (interfaccia cervello-computer, nota anche come interfaccia di controllo neurale, interfaccia mente-macchina o interfaccia neurale diretta) è una tecnologia capace di rilevare e interpretare i segnali cerebrali, trasmettendoli poi a un dispositivo esterno che esegue comandi in base ai segnali ricevuti. Il cervello umano è composto da numerose cellule chiamate neuroni. Ogni volta che pensiamo, ci muoviamo, percepiamo qualcosa o ricordiamo, i neuroni sono impegnati in attività che producono segnali biochimici ed elettrici. Questi segnali possono essere rilevati e interpretati mediante l'elettroencefalografia (EEG). Dopo essere stati amplificati,

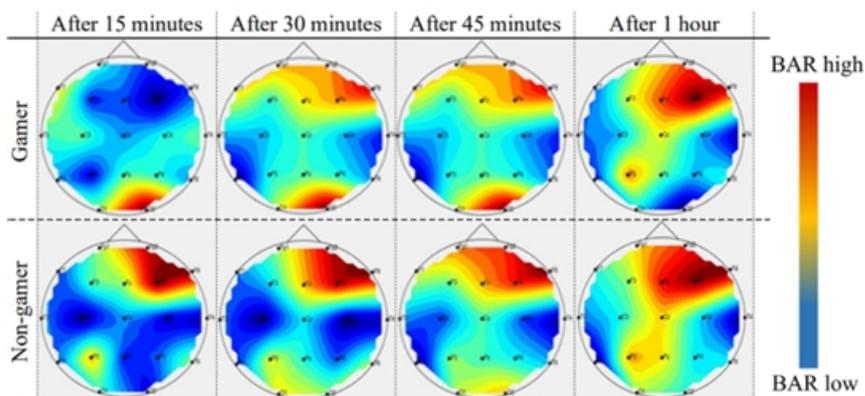


Figura 2.6: Rappresentazione spettrografica riportata nello studio [22] durante un gioco di simulazione strategica, paragonando i giocatori abituali e i non giocatori.

i segnali vengono analizzati da un programma informatico BCI che li utilizza per controllare dispositivi esterni. Algoritmi di apprendimento automatico sono stati addestrati per riconoscere l'attività cerebrale EEG legata a specifiche emozioni, azioni ed espressioni.

Quando gli algoritmi identificano l'attività cerebrale EEG corrispondente, la BCI è in grado di trasmettere comandi a un dispositivo esterno per il controllo. Questi dispositivi sono programmati per interpretare ed eseguire tali comandi, sia per azioni fisiche che per interfacce digitali. Ad esempio, una persona che indossa un dispositivo EEG può pensare “muovi a sinistra” e vedere il cursore del computer spostarsi a sinistra. Un'altra applicazione potrebbe essere un soggetto che utilizza una BCI basata su EEG collegata a un braccio robotico e pensa “saluta”: il braccio robotico eseguirà il gesto di salutare [23].

Classificazione delle BCI

Una BCI (Brain-Computer Interface) può essere classificata in tre tipologie principali: invasiva, parzialmente invasiva e non invasiva, come indicato nello studio [24]:

- **BCI invasiva** (Fig. 2.7) richiede un intervento chirurgico per impiantare elettrodi sotto il cuoio capelluto. Offre una rilevazione accurata dell'attività cerebrale, ma comporta rischi chirurgici.



Figura 2.7: BCI invasiva su Michael Edwards Nagle, da [25].

- Nel caso della **BCI parzialmente invasiva** (Fig. 2.8) gli elettrodi sono impiantati all'interno del cranio ma esternamente al cervello. Fornisce una migliore lettura del segnale rispetto alla BCI non invasiva, ma senza entrare nella materia grigia. L'elettrocorticografia (ECoG) è un esempio di questa tecnologia. L'elettrocorticografia (ECoG) è una misurazione dell'attività cerebrale che utilizza la BCI parzialmente invasiva. Le ECoG prendono da sotto il cranio in modo simile all'elettroencefalografia non invasiva, ma gli elettrodi sono incorporati in un sottile cuscinetto di plastica che viene impiantato.

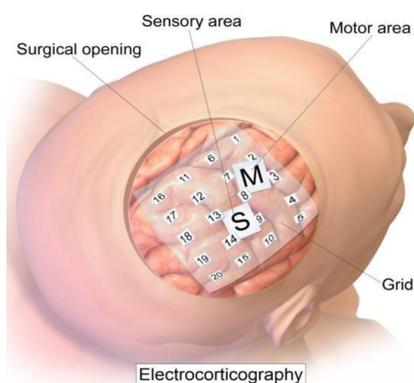


Figura 2.8: Metodo di registrazione del segnale cerebrale semi-invasivo, ricavato da [26].

- La **BCI non invasiva** (Fig. 2.9) è un dispositivo che non intacca il cervello. La maggior parte dei lavori pubblicati sulla BCI riguarda la BCI non invasiva basata su EEG. È ampiamente studiata e facile da indossare, rendendola promettente per il consumo di massa. Tuttavia, presenta una risoluzione spaziale limitata e segnali indeboliti dal cranio, oltre a richiedere una formazione approfondita per l'utente.



Figura 2.9: BCI non invasiva, da [27].

La BCI può essere passiva o attiva:

- Una **BCI passiva (pBCI)** misura e interpreta l'attività cerebrale dell'individuo durante un determinato compito per stimare il suo stato mentale e fornire informazioni sul suo stato cognitivo ed emotivo. Ad esempio, può essere utilizzato per rilevare lo stato emotivo di un utente. Questo tipo di BCI è dunque legata alla misurazione dell'attività celebrale a livello elettroencefalografico [28].
- Una **BCI attiva (aBCI)** richiede agli utenti di modulare attivamente i segnali cerebrali per interagire con un dispositivo esterno. Ad esempio, un utente può immaginare di muovere il proprio braccio provocando il movimento di un braccio robotico nello stesso modo [23].

È importante utilizzare approcci di classificazione sia specifici per il soggetto, ovvero che utilizzano dati raccolti da un singolo individuo per addestrare e testare il modello di classificazione, che trasversali che prevedono l'utilizzo di dati provenienti da più soggetti, per poter raggiungere un grado di accuratezza elevato nella rilevazione del carico cognitivo e dello stress. I risultati ottenuti in [29], in cui è stata classificata contemporaneamente più di una categoria o stato mentale usando EEG, indicano la fattibilità di sviluppare un sistema BCI passivo online per monitorare contemporaneamente il carico cognitivo e lo stress in tempo reale, con potenziali applicazioni in diversi settori.

2.5.1 BCI in ambienti XR

La combinazione della tecnologia Brain-Computer Interface (BCI) con i sistemi di Realtà Virtuale (VR) e Realtà Aumentata (AR) ha un immenso potenziale per varie applicazioni. Alcune delle applicazioni potenziali chiave includono:

- Esperienze immersive migliorate
- Riabilitazione medica e terapia
- Tecnologie assistive
- Neurofeedback e addestramento conoscitivo
- Istruzione e formazione
- Entertainment and Gaming
- Salute Mentale e Benessere

2.5.2 BCI e AR

Per valutare l'attenzione visuospaziale, ovvero la capacità di convogliare l'attenzione in specifiche regioni dello spazio visivo senza la necessità di compiere movimenti oculari evidenti, in AR (con HoloLens 2 Fig. 2.10) può essere utilizzato un sistema BCI. L'analisi dei dati EEG durante l'esecuzione di questi compiti consente di identificare modelli di attività cerebrale associati alla distribuzione dell'attenzione visuospaziale. Nel complesso, i risultati di questo studio [30] spianano la strada ai progressi nella tecnologia AR mostrando i vantaggi della combinazione di headset AR con sistemi BCI per creare esperienze AR più coinvolgenti e immersive, personalizzate e user-friendly, offrendo la possibilità di creare applicazioni in vari campi come la riabilitazione, la robotica, la valutazione dello stato mentale e l'intrattenimento.

2.5.3 BCI e VR

L'uso della tecnologia BCI in combinazione con la realtà virtuale (VR) ha dimostrato numerosi vantaggi nell'ambito della simulazione di volo [31], garantendo un'esperienza più coinvolgente e naturale per gli utenti, grazie a un'interazione più intuitiva e diretta rispetto ai tradizionali dispositivi di input come joystick o tastiere, come si osserva in Fig. 2.11. Si verifica quindi una riduzione dell'affaticamento dell'utente e un conseguente aumento del comfort e del controllo durante la simulazione.



Figura 2.10: Con riferimento allo studio Riferimento allo studio [30]: Auricolare HoloLens 2 AR con componente di rilevamento delle onde cerebrali incorporato (supporto clip-on EEG sopra la corteccia visiva e prefrontale, due elettrodi EEG evidenziati in arancione); Un'immagine ravvicinata del supporto clip-on con 7 elettrodi; Utente che indossa un sistema "migliorato" AR-BCI (clip-on in blu sopra la corteccia visiva e pre-frontale); Una rappresentazione visiva della palla da calcio che viene generata quando l'utente è impegnato nel gioco.

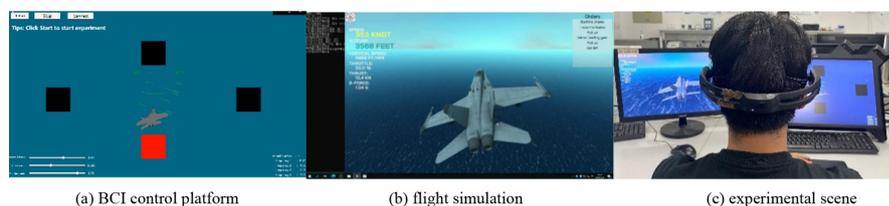


Figura 2.11: Dimostrazione del funzionamento del simulatore di volo VR con l'uso della BCI riferito allo studio [31].

2.6 Robotica Collaborativa

I progressi nella robotica hanno contribuito alla diffusione della collaborazione uomo-robot (HRC). Tuttavia, lavorare e interagire con robot collaborativi a stretto contatto può essere psicologicamente stressante. Rispetto ai robot industriali tradizionali, i cobot offrono maggiore flessibilità e sicurezza, ma possono anche introdurre nuove sfide e stress per gli operatori umani, come un aumento del carico

di lavoro, una ridotta percezione di controllo sulle attività e una maggiore pressione psicologica. Pertanto, comprendere gli impatti dell'interazione uomo-robot (HRI) sullo stress mentale è cruciale per migliorare il benessere sul posto di lavoro. È stato studiato come questi fattori HRI (presenza, complessità e modalità di interazione) influenzino lo stress psicologico dei lavoratori. Livelli più bassi di stress mentale vengono ottenuti quando gli utenti sono in grado di comunicare con il co-robot e regolare il ritmo della collaborazione in base alle loro esigenze, e quando l'effettore finale che si avvicina al campo visivo del lavoratore ha un percorso limitato e una velocità ridotta, evidenziando l'importanza dell'interazione e del controllo del robot per la mitigazione dello stress [32], [33].

L'**accettazione** e la **fiducia** degli utenti verso il robot [34] svolgono un ruolo fondamentale nella riuscita integrazione dei robot collaborativi nel settore manifatturiero. Il modello di accettazione della tecnologia (TAM) ha proposto il ruolo chiave di due fattori: l'utilità percepita (misura in cui l'utente ritiene che l'utilizzo di un particolare sistema migliorerebbe le prestazioni lavorative) e la facilità di utilizzo percepita (misura in cui l'utente ritiene che l'utilizzo del sistema sarebbe privo di sforzi).

La fiducia degli utenti svolge un ruolo molto importante in questo ambito: più il lavoratore si fida dello strumento innovativo e più è probabile che venga utilizzato, ed è determinata dal grado di autonomia del robot, che influisce sull'efficienza e sul carico di lavoro.

Nel caso di una sproporzione tra le risorse cognitive disponibili dell'operatore e le esigenze cognitive del compito, gli individui che si fidano di un sistema robotico possono avere maggiori probabilità di credere che il sistema sia competente e in grado di gestire compiti complessi, che potrebbero ridurre lo stress percepito. D'altra parte, gli individui che non si fidano di un sistema robotico possono avere maggiori probabilità di dubitare delle proprie capacità e, pertanto, possono sperimentare livelli più elevati di stress percepito, che potrebbero, dunque, portare a errori umani.

Metodi ed esperimenti

In [32] è stata implementata una configurazione sperimentale in cui gli operatori umani hanno lavorato insieme a un robot collaborativo su compiti di assemblaggio Lego, utilizzando diversi paradigmi di interazione, tra cui pressione di pulsanti, gesti delle mani e comandi verbali.

I risultati hanno rivelato che l'introduzione delle interazioni a livelli differenti (hand gesture - canale visivo, pulsanti - canale aptico e comandi verbali - canale vocale) durante l'HRC, ha contribuito a ridurre lo sforzo mentale. L'uso delle hand gesture ha tuttavia portato a uno stress mentale significativamente maggiore rispetto ai

pulsanti e ai comandi verbali. I risultati hanno fornito spunti pratici per mitigare lo stress mentale sul posto di lavoro e promuovere il benessere nell'HRC.

Nello studio [35], i dati raccolti tramite eye tracking e analisi del diametro della pupilla sono stati analizzati utilizzando il metodo del T-Test, il quale consente di confrontare i dati di due gruppi per individuare eventuali differenze significative, in questo caso tra i lavoratori che collaborano con i cobots e quelli che collaborano con altre persone.

I risultati indicano che lavorare con i cobots non aumenta i livelli di stress per i lavoratori, e può migliorare l'efficienza, la qualità e la produttività, riducendo il carico fisico e gli errori umani in compiti ripetitivi o particolarmente faticosi, confermando uno degli obiettivi per cui questi robot sono stati progettati.

Nella revisione sistematica condotta in [36], dopo aver identificato 165 articoli, ne sono stati selezionati 23 specificamente dedicati all'esplorazione del carico mentale dei lavoratori in attività di collaborazione con i cobot.

Si è notato come i fattori principali che contribuiscono al carico mentale degli operatori durante l'interazione con i cobot, includono: il movimento dei cobot, la prevedibilità, l'organizzazione dei compiti e i modelli di comunicazione.

Influenza negativa dei cobot sul carico cognitivo

- **Ambiguità nel ruolo:** i lavoratori non comprendono appieno il ruolo del robot nella collaborazione o il robot non riesce a comunicare in modo chiaro e coerente, causando confusione e stress.
- **Mancanza di controllo:** i lavoratori potrebbero sentirsi sopraffatti e stressati se percepiscono di avere poca o nessuna possibilità di controllare le azioni del robot oppure il se robot agisce in modo imprevedibile.
- **Errori o malfunzionamenti:** se i robot presentano frequenti errori o malfunzionamenti che richiedono interventi umani ripetuti per correggerli, ciò potrebbe aumentare la pressione e lo stress sui lavoratori.
- **Complessità tecnologica:** un'interfaccia utente del robot complicata o difficile da utilizzare, può scaturire frustrazione e stress nei lavoratori.
- **Sovraccarico cognitivo:** compiti assegnati al robot troppo complessi o che richiedono un'elevata concentrazione da parte dei lavoratori per monitorare e coordinare le attività del robot, può aumentare il carico cognitivo e lo stress.
- **Distrazione:** se i robot non sono integrati in modo efficace o se sono troppo invadenti o rumorosi, possono compromettere la concentrazione e l'attenzione.

Misure soggettive e fisiologiche usate

- NASA-Task • PSS • Risposte galvaniche della pelle • Elettromiografia • Eye-tracking • Frequenza cardiaca

Capitolo 3

EEG e Dispositivi Emotiv

In questo capitolo verrà approfondita la tecnica dell'elettroencefalografia, i diversi tipi di elettrodi e verranno analizzati i dispositivi prodotti dall'azienda Emotiv, con un'attenzione particolare rivolta ai dispositivi MN8 e Insight, utilizzati per l'analisi delle misure di stress cognitivo e attenzione di questo studio, e per lo sviluppo dell'applicazione. In conclusione, verrà presentato il plug-in Emotiv per Unity.

3.1 EEG

Il termine EEG sta per “*elettroencefalografia*” e si tratta di un metodo non invasivo del monitoraggio dell'attività elettrofisiologica del cervello. Il test a cui si viene sottoposti è chiamato elettroencefalogramma, il quale riesce a rilevare l'attività elettrica del cervello, dovuta a cambiamenti di voltaggio che provengono dalla corrente ionica all'interno e tra alcune cellule cerebrali chiamate neuroni, attraverso degli elettrodi collegati al cuoio capelluto [37]. Tali elettrodi sono sensori in grado di rilevare e registrare i modelli delle onde cerebrali. Gli elettrodi, posti sul cuoio capelluto o in una apposita cuffia, permettono di effettuare una misura integrale dell'attività elettrica dei neuroni cerebrali. I segnali vengono inviati a un amplificatore e quindi a un computer o dispositivo mobile che elabora i dati [38].

3.1.1 Banda del segnale EEG

L'attività elettrica del cervello tramite elettroencefalografia può essere analizzata sull'attività elettrica spontanea del cervello o attraverso i potenziali evocati.

EEG

L'attività elettrica spontanea del cervello **tramite EEG** è presente continuamente e naturalmente e può essere misurata sullo scalpo o attraverso un elettrocorticogramma (direttamente sulla corteccia cerebrale). Il segnale EEG è complesso, dinamico e non lineare, con un'ampiezza che varia tra i 10 e 100 μV e una frequenza tra 1 e 100 Hz, anche se il contenuto informativo si estende fino ai 30 Hz. È suddiviso in ritmi riconoscibili, rappresentate dalle onde cerebrali, classificate in onde “lente” o “veloci” in base alla frequenza (Fig. 3.1), ciascuna associata a specifici stati mentali [38]:

- Onde **Delta** δ (0.5-3 Hz) sono le onde a bassa frequenza, e con ampiezza maggiore, generate nelle fasi del sonno più profondo (sonno senza sogni), stato di trance e incoscienza. È il ritmo dominante nei bambini fino ai 2 anni.
- Onde **Theta** θ (3-8 Hz) sono le onde che si verificano maggiormente durante il sonno, e durante la meditazione profonda. Sono collegate quindi al sonno e al rilassamento, così come all'apprendimento, alla memoria e alla creatività. È il momento in cui i nostri sensi vengono focalizzati sui segnali che provengono dall'interno, e che sperimentiamo nei momenti di addormentamento o risveglio. Sotto stress possono manifestarsi come distrazione o mancanza di concentrazione. È il ritmo dominante nei bambini da 1 a 6 anni.
- Onde **Alpha** α (8-12 Hz), dominanti durante gli stati meditativi, che aiutano il coordinamento, calma, prontezza, consapeloevolezza e apprendimento. Sono anche collegate alla capacità del ricordo e alla riduzione di stress e ansia.
- Onde **Beta** β (12-38 Hz) sono legate invece allo stato di veglia, con un'attenzione rivolta verso l'esterno. È presente nelle situazioni di vigilanza, attenzione e processi decisionali. Nei dispositivi Emotiv sono disponibili le misure distinte di Low Beta (12-16 Hz) e High Beta (16-25 Hz). La distinzione principale è che le onde Low Beta si riferiscono alla concentrazione attiva e al problem-solving e un loro aumento indica generalmente maggiore focus e diminuzione della stanchezza mentale. Per quanto riguarda le High Beta, possono indicare ansia, stress e tensione, quindi un loro aumento si verifica in stati di allerta, stress, multitasking e conseguente diminuzione del rilassamento.
- Onde **Gamma** γ (38-42 Hz) sono le onde a frequenza più alta e ad ampiezza ridotta, più complicate da registrare e vengono collegate all'elaborazione simultanea di informazioni. Inizialmente erano state considerate dai ricercatori come “rumore cerebrale di riserva” fino a che non si capì che erano particolarmente presenti in momenti di profonda concentrazione.

Le onde cerebrali sono state studiate sia singolarmente che combinate.

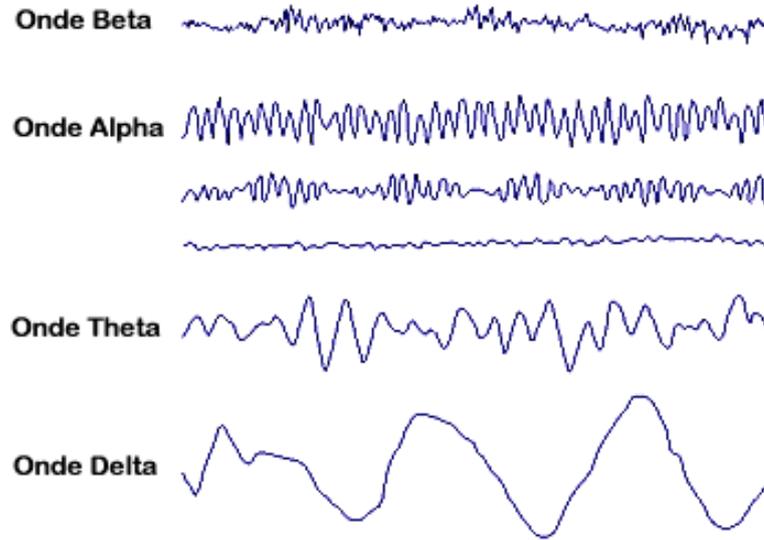


Figura 3.1: Onde Cerebrali

Nello studio [39] vengono utilizzate quattro misure di rapporto di banda di potenza: $\frac{\theta+\alpha}{\beta}$, $\frac{\alpha}{\beta}$, $\frac{\theta}{\beta}$: i cui aumenti potrebbero indicare una maggiore attività cerebrale associata a stati di rilassamento o attenzione ridotta, e $\frac{\theta+\alpha}{\alpha+\beta}$: che offre informazioni dettagliate sull'interazione tra le onde più lente e più veloci nel cervello durante determinate attività.

Lo studio [40] ha rilevato come i rapporti di banda siano in grado di rilevare e discriminare al meglio le percezioni di carico di lavoro mentale, rispetto alle singole misure di banda EEG. I modelli addestrati con queste caratteristiche hanno mostrato un'elevata precisione di classificazione, come indicato da metriche di valutazione come accuratezza, f1-score, richiamo e precisione. In particolare, valori di Alpha e Theta, espressi in termini di densità spettrale di potenza ($\mu\text{V}^2/\text{Hz}$), svolgono un ruolo cruciale nella valutazione del carico cognitivo e nell'analisi dell'attività cerebrale.

In [41] vengono esplorate diverse relazioni tra le bande EEG (alpha, beta e theta) e suggeriscono che l'uso di più bande EEG insieme può migliorare l'accuratezza nella valutazione del carico di lavoro mentale.

$$\text{Task Load Index (TLI)} = \frac{\theta}{\alpha}$$

utilizzato per valutare il carico di lavoro mentale. L'indice è basato sull'assunto che un aumento del carico mentale è associato a una diminuzione della potenza alpha e a un aumento della potenza theta. Ovvero, quando il carico di lavoro aumenta, si

osserva una riduzione della potenza alpha, che indica un minore rilassamento e un incremento della potenza theta, indicativa di maggiore sforzo cognitivo.

Approfondimento sulla correlazione Theta-Alpha

Come possiamo osservare nello studio [42], il cui obiettivo è analizzare le bande theta e alpha in relazione al carico cognitivo durante compiti multitasking, la potenza della banda theta aumenta con l'aumento del carico cognitivo. Questo è in linea con la letteratura esistente, che suggerisce che la potenza theta sia associata alla richiesta di risorse cognitive. L'aumento della potenza theta è da interpretarsi dunque come un indicatore dell'impegno delle risorse cognitive necessarie per completare un compito. Quando i partecipanti affrontano più sottotask, la potenza theta aumenta, indicando un maggiore coinvolgimento cognitivo.

Per quanto riguarda la potenza alpha, si è osservato che tende a diminuire con l'aumento della difficoltà del compito e del carico cognitivo. Tuttavia, lo studio ha trovato risultati più complessi, con un aumento della potenza alpha in alcune condizioni, suggerendo che potrebbe essere interpretato come un meccanismo di inibizione, dove il cervello si concentra su informazioni rilevanti escludendo quelle non necessarie. Questo è in contrasto con l'idea che un carico cognitivo elevato porti sempre a una diminuzione della potenza alpha. Lo studio suggerisce che, in generale, un aumento della potenza theta è associato a una diminuzione della potenza alpha, e viceversa. Tuttavia, le osservazioni non sono sempre sistematiche e possono variare in base al contesto del compito e alle differenze individuali. L'aumento della potenza theta è sicuramente un indicatore di maggiore impegno cognitivo, mentre le variazioni nella potenza alpha possono riflettere sia l'attenzione che l'inibizione delle informazioni irrilevanti.

$$\text{Engagement Index} = \frac{\beta}{\alpha + \theta}$$

utilizzato per studiare la vigilanza e l'impegno in un compito. Si osserva che quando la potenza alpha diminuisce, la potenza beta tende ad aumentare, mentre la potenza theta può diminuire, indicando uno stato di **alta vigilanza e coinvolgimento**. Al contrario, una diminuzione della potenza beta e un aumento della potenza theta possono indicare uno stato di **bassa vigilanza o sonnolenza**.

La **Tabella 3.1** fornisce un riepilogo delle correlazioni EEG delle potenze spettrali per la valutazione del carico cognitivo che possiamo trovare in letteratura [43].

Potenziali Evocati

I **potenziali evocati** (EP), rivelano un cambiamento di ampiezza del voltaggio osservato nell'EEG come risultato di un evento sensoriale o cognitivo. Il loro scopo è misurare l'attività elettrica del cervello e del midollo spinale in risposta a

Tabella 3.1: Riepilogo delle correlazioni EEG delle potenze spettrali per la valutazione del carico cognitivo.

Indicatore	Tipo di comportamento cognitivo	Descrizione
<i>Theta</i>	Carico di lavoro, vigilanza e concentrazione.	Si ritiene che la potenza spettrale Theta aumenti con una maggiore richiesta di risorse cognitive. Theta aumenta nei compiti che richiedono un focus di concentrazione e vigilanza prolungato.
<i>Alpha</i>	Carico di lavoro, affaticamento cognitivo e attenzione.	La banda Alpha aumenta negli stati di rilassamento con gli occhi chiusi e diminuisce quando gli occhi sono aperti. Un aumento della potenza Alpha è associato a una minore vigilanza mentale e prontezza.
<i>Beta</i>	Carico di lavoro, attenzione visiva e concentrazione.	Un aumento della potenza Beta è associato a livelli elevati di carico cognitivo durante i compiti mentali e la concentrazione. L'attività della banda Beta riflette un'attivazione del sistema visivo durante una maggiore attenzione visiva.
$\frac{Beta}{Alpha + Theta}$	Sforzo mentale, vigilanza e attenzione.	È stato utilizzato per studiare la prontezza, l'impegno nei compiti, la focalizzazione mentale e lo sforzo mentale.
$\frac{Theta}{Alpha}$	Carico di lavoro, sforzo mentale.	Questo indice si basa sull'assunzione che un aumento del carico mentale sia associato a una diminuzione della potenza Alpha e a un aumento della potenza Theta.
$\frac{Theta}{Beta}$	Memoria di lavoro, attenzione e sonnolenza.	Questo indice si basa sull'assunzione che un aumento della prontezza e dell'impegno nei compiti comporti un aumento della potenza Beta e una diminuzione della potenza Theta.

specifici stimoli, come visivi, tattili, uditivi o elettrici [38]. Tali segnali presentano ampiezze molto basse (1-3 μV) e vengono utilizzati per valutare l'integrità spinale e neurologica, diagnosticare lesioni sensoriali e monitorare cambiamenti nello stato neurologico ad esempio durante interventi chirurgici. I test dei potenziali evocati misurano la velocità e l'integrità con cui i segnali nervosi vengono trasmessi al cervello [44]. Alcune componenti EP dipendono non solo semplicemente dalle caratteristiche fisiche dello stimolo, ma anche dall'attenzione mentale del soggetto e dall'ambiente in cui si verifica lo stimolo. Tali potenziali "correlati all'evento" o "endogeni" (ERP) sono correlati agli aspetti cognitivi dell'elaborazione degli stimoli, fornendo informazioni sulla tempistica e sulla distribuzione dell'attività neuronale durante l'elaborazione mentale. Le variazioni nelle onde ERP, come latenza e ampiezza, possono riflettere i processi cognitivi coinvolti in attività come la percezione, la memoria e la risposta agli stimoli. Per scopi clinici, l'attenzione è stata rivolta in particolare alla cosiddetta componente P300 o P3 dell'ERP (Fig. 3.2) [44]. Il nome deriva dalla sua polarità positiva e dalla sua latenza (ritardo tra stimolo e risposta) di circa 300-400 ms dopo l'inizio di uno stimolo target uditivo (ad esempio un tono poco frequente o il nome stesso del soggetto). Essa è considerata un potenziale endogeno, in quanto il suo verificarsi non è collegato agli attributi fisici di uno stimolo, ma alla reazione di una persona ad esso.

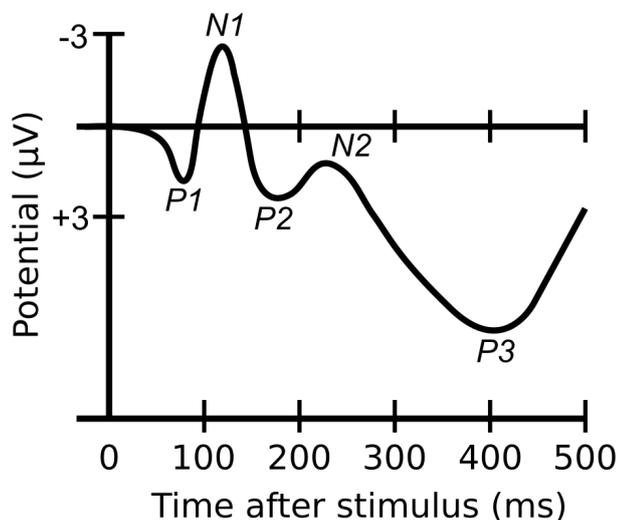


Figura 3.2: Componenti ERP

3.1.2 Elettrodi

Un elettrodo è in grado di convertire le correnti ioniche, generate dall'attività nervosa nelle sinapsi e nelle strutture neurologiche del cervello, in correnti elettriche che vengono registrate dall'EEG. Dal 1958 è stato introdotto un sistema internazionale (SI) per standardizzare queste registrazioni, garantendo una copertura adeguata dello scalpo per diverse diagnosi. I due principali sistemi internazionali per la disposizione degli elettrodi sono il SI 10-20 e il SI 10-10 [38].

Sistema internazionale 10-20

Nel sistema internazionale 10-20 Fig. 3.3, i numeri '10' e '20' indicano che le distanze tra gli elettrodi adiacenti corrispondono al 10% o al 20% della distanza totale tra i punti 'anteriore-posteriore' o 'destra-sinistra' del cranio. I punti di riferimento sul cranio includono i punti **preauricolari** destro e sinistro (depressioni alla base dello zigomo), il **nasion** (depressione tra gli occhi) e l'**inion** (il punto più sporgente della protuberanza occipitale, sulla linea mediana). Ogni posizione degli elettrodi è identificata da una lettera e un numero (o una seconda lettera). La prima lettera corrisponde alla regione della corteccia sottostante (F = frontale, C = centrale, T = temporale, P = parietale e O = occipitale), i numeri indicano la lateralizzazione (i pari sull'emisfero destro, i dispari su quello sinistro), mentre la lettera "z" rappresenta la posizione sulla linea mediana.

Il sistema 10-20 comprende complessivamente 19 posizioni (8 sull'emisfero sinistro, 8 su quello destro e 3 centrali), più due siti auricolari di riferimento. Le misurazioni si basano sui seguenti punti anatomici: la prima misura viene presa sul piano sagittale, cioè sulla linea mediana del cranio che va dal nasion, passando per il vertice (il punto più alto della testa), fino all'inion. La seconda misura è sul piano coronale, dal punto preauricolare sinistro al destro, passando per il vertice. La terza misura comprende due tracciati: dal nasion all'inion, passando per le regioni temporali destra e sinistra. La quarta misura, effettuata sul piano parasagittale, va da Fp1 a O1 (attraversando C3) sul lato sinistro e da Fp2 a O2 (attraversando C4) sul lato destro.

Le 21 posizioni standard degli elettrodi includono: Fp2, F4, F8, C4, P4, T4, T6, O2 sul lato destro; Fp1, F3, F7, C3, P3, T3, T5, O1 sul lato sinistro; Fz, Cz, Pz lungo la linea mediana; e A2 e A1 come elettrodi auricolari di riferimento [38].

Sistema internazionale 10-10

Il sistema internazionale 10-10 Fig. 3.4 è un'estensione del sistema 10-20, con l'aggiunta di nuovi elettrodi per migliorare la copertura rispetto ai 19 elettrodi standard del 10-20. I nuovi elettrodi sono etichettati usando una combinazione di lettere e numeri coerente con la terminologia standard, come FC (tra le file frontali

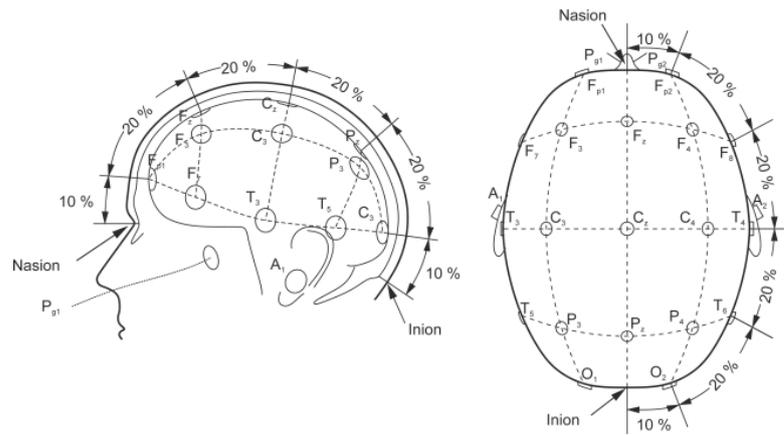


Figura 3.3: Sistema internazionale 10-20

e centrali), FT (tra frontali e temporali), CP (tra centrali e parietali) e PO (tra parietali e occipitali). In particolare, “AF” viene utilizzato per gli elettrodi tra la fila frontopolare e frontale. L’espansione si è resa necessaria poiché il sistema 10-20 non includeva elettrodi nella catena inferiore, escludendo potenzialmente attività del lobo temporale, cruciale per diagnosticare condizioni come l’epilessia del lobo temporale. Il sistema 10-10 consente di identificare 75 posizioni e rinomina alcuni elettrodi, come T3/T4 diventati T7/T8 e T5/T6 diventati P7/P8 [38].

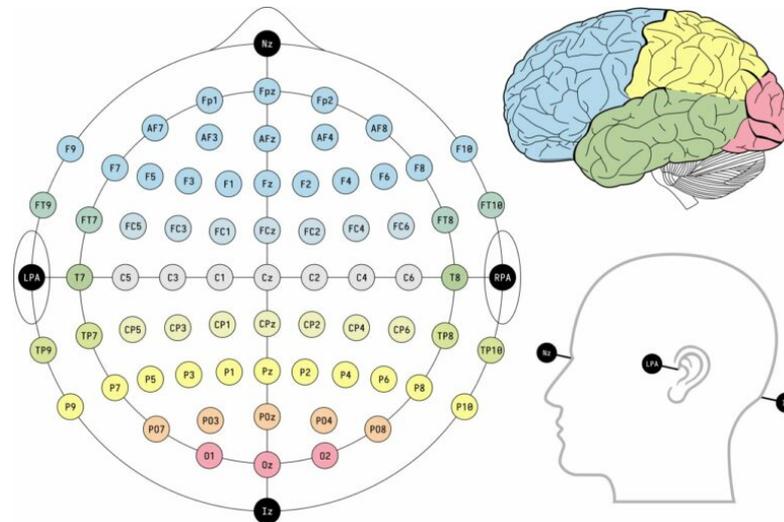


Figura 3.4: Sistema internazionale 10-10

3.1.3 Trasformata di Fourier

L'analisi di Fourier si basa sull'idea fondamentale che qualsiasi segnale periodico, per quanto complesso, può essere rappresentato come una somma di funzioni armoniche (sinusoidi) con specifiche ampiezze e frequenze. Queste frequenze sono multiple (armoniche) della frequenza fondamentale del segnale.

Come già accennato in 3.1.1, uno dei metodi più comuni e utili per analizzare i dati elettroencefalografici (EEG) consiste nel suddividere il segnale in diverse bande di frequenza funzionalmente significative.

Questa caratteristica permette di scomporre un segnale complesso, come quello EEG, nelle sue componenti sinusoidali di base, ognuna delle quali è definita da una frequenza specifica.

Uno strumento matematico chiave per questa analisi è la trasformata di Fourier (FT), che consente di passare dal dominio del tempo (dove il segnale è rappresentato in funzione del tempo) al dominio della frequenza (dove il segnale è descritto in termini delle frequenze che lo compongono). La FT è definita matematicamente dalla seguente espressione:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

L'output della FT è una funzione complessa $X(f)$, che contiene informazioni sia sull'ampiezza sia sulla fase delle frequenze che compongono il segnale. Questo approccio è largamente utilizzato per separare le informazioni di interesse (ad esempio, le bande di frequenza rilevanti nell'EEG) da eventuali componenti di disturbo o rumore.

Tuttavia, l'applicazione della FT all'analisi dei segnali EEG presenta alcuni limiti significativi, dovuti alla non stazionarietà di questi segnali. I segnali EEG, infatti, sono caratterizzati da frequenze che variano nel tempo, rendendo la FT inadatta a fornire un'analisi temporale dettagliata. Un limite intrinseco della FT è infatti la perdita di informazioni temporali: mentre descrive accuratamente le frequenze presenti nel segnale, non fornisce informazioni su quando tali frequenze si verificano. Un ulteriore problema riguarda l'assunzione che il segnale sia globalmente stazionario, il che raramente è vero per i segnali EEG, che presentano fluttuazioni dinamiche e transienti legati all'attività cerebrale.

Per affrontare questi limiti, si utilizzano tecniche avanzate come la trasformata veloce di Fourier (FFT) e la Short-Time Fourier Transform (STFT) [38].

FFT e Densità Spettrale di Potenza (PSD)

La trasformata veloce di Fourier (FFT) è una versione algoritmica ottimizzata della FT, progettata per calcolare rapidamente la trasformata discreta di Fourier (DFT) di un segnale. È ampiamente utilizzata nell'analisi spettrale dell'EEG. Applicando

la FFT, è possibile ottenere un numero complesso per ciascuna frequenza del segnale, da cui si ricavano due informazioni fondamentali:

- Ampiezza: misura dell'intensità o potenza del segnale a una data frequenza.
- Fase: indicazione di come il segnale è allineato nel tempo rispetto ad altre frequenze.

Nell'analisi spettrale, si presta particolare attenzione all'ampiezza. Per stimare la potenza del segnale a ciascuna frequenza, si calcola il quadrato dell'ampiezza derivata dalla FFT. Questo produce una rappresentazione nota come densità spettrale di potenza (PSD), espressa in micro-Volt quadrati per Hertz ($\mu\text{V}^2/\text{Hz}$), che descrive come la potenza del segnale è distribuita tra le diverse frequenze.

Un parametro sintetico spesso utilizzato è la potenza media di banda, che riassume il contributo energetico di una specifica banda di frequenza (ad esempio, theta o beta) alla potenza totale del segnale. Questo valore si ottiene integrando la densità spettrale di potenza all'interno dell'intervallo di frequenze che definisce la banda [45].

Short-Time Fourier Transform (STFT)

Per superare il limite della FT riguardante la perdita di informazioni temporali, è stata introdotta la trasformata di Fourier a breve termine (STFT). Questo approccio consiste nell'applicare la FT a segmenti temporali (finestre) del segnale, assumendo che ciascun segmento sia localmente stazionario. La STFT è definita matematicamente come:

$$\text{STFT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

dove $w(t - \tau)$ è una funzione finestra che si sovrappone parzialmente al segnale e scorre lungo il tempo. L'output della STFT è una rappresentazione tempo-frequenza, che mostra l'evoluzione delle componenti spettrali nel tempo. Il modulo quadro della STFT produce uno spettrogramma, una mappa che visualizza la potenza del segnale in funzione di tempo e frequenza.

Nonostante la sua utilità, la STFT presenta il problema della risoluzione costante: la larghezza della finestra $w(t)$ determina un compromesso tra risoluzione temporale e risoluzione in frequenza, secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg. Una finestra breve migliora la risoluzione temporale, ma peggiora quella in frequenza, e viceversa.

Trasformata di Wavelet (WT)

Un approccio alternativo e più flessibile è la trasformata di Wavelet (WT), che affronta le limitazioni della STFT utilizzando finestre di dimensioni variabili. La

WT permette di adattare la risoluzione temporale e in frequenza a seconda della scala:

- Per frequenze basse, utilizza finestre più ampie per migliorare la risoluzione in frequenza.
- Per frequenze alte, utilizza finestre più strette per migliorare la risoluzione temporale.

Questo approccio dinamico consente una rappresentazione più dettagliata dei segnali non stazionari come l'EEG. La WT utilizza una funzione base chiamata Wavelet madre, che viene traslata e scalata per analizzare il segnale a diverse risoluzioni. Questa tecnica è particolarmente utile per catturare fenomeni transitori e cambiamenti rapidi nel segnale EEG, che possono essere difficili da rilevare con la STFT o la FT classica [38].

3.2 EMOTIV

EMOTIV è un'innovativa società di neurotecnologia fondata nel 2011 da Tan Le e Geoff Mackellar, con sede a San Francisco, U.S.A. e stabilimenti a Sydney, Hanoi e Ho Chi Minh, il cui scopo è quello di far progredire la comprensione del cervello umano tramite l'elettroencefalografia (EEG) in modo da favorire nuove forme di interazione cervello-computer (BCI). L'azienda si pone come obiettivo quello di rendere accessibile e applicabile la tecnologia dell'elettroencefalografia (EEG) a una vasta gamma di campi, dalla ricerca scientifica alla riabilitazione e all'intrattenimento [46]. L'attività cerebrale in tempo reale registrata dai dispositivi Emotiv è ampiamente utilizzata in studi neuroscientifici, psicologici e ingegneristici, permettendo ai ricercatori di esplorare come il cervello elabora informazioni e come le emozioni influenzano il comportamento umano. I dispositivi Emotiv consentono agli utenti di interagire con computer e applicazioni tramite il pensiero, un'innovazione sicuramente cruciale per le persone con disabilità motorie, in quanto permette loro di interagire con la tecnologia senza l'uso delle mani, supportando dunque anche applicazioni terapeutiche e riabilitative, con programmi che permettono ai pazienti di esercitarsi nel controllo di dispositivi motorizzati o migliorare le capacità cognitive attraverso simulazioni virtuali e giochi interattivi. Attraverso il Pannello di Controllo, offerto dall'applicazione Emotiv Pro o Emotiv BCI, gli utenti possono configurare il dispositivo, osservare la variazione di diversi stati mentali e mappare comandi personalizzati per gestire specifiche azioni. Emotiv offre un'API e diversi plugin, come il plugin per Unity, che consentono agli sviluppatori di integrare facilmente le funzionalità EEG e BCI all'interno di applicazioni personalizzate e giochi, agevolando lo sviluppo di esperienze immersive. Con l'evoluzione della tecnologia, possono essere esplorate nuove ed innovative applicazioni, ampliando

l'uso dei dispositivi Emotiv in settori come istruzione, benessere mentale e gaming, aprendo nuove possibilità di utilizzo e miglioramento della qualità della vita.

3.2.1 Elaborazione dei Dati EEG di EmotivPRO

Il dispositivo BCI, inizialmente, misura l'attività cerebrale tramite elettrodi. Successivamente, il segnale rilevato viene amplificato. EmotivPRO utilizza la Trasformata di Fourier Veloce (FFT) per calcolare le potenze di banda in $\mu V^2/Hz$. I dati vengono sottoposti a una serie di passaggi di preprocessing che includono il filtraggio passa-alto, la rimozione della componente DC, l'applicazione di finestre e il calcolo delle potenze di banda.

Filtraggio Passa-Alto

I dati vengono filtrati in alta frequenza utilizzando i seguenti coefficienti:

$$\text{filter_coeffs} = \begin{cases} b = [0.9659, -1.9318, 0.9659] \\ a = [1.0000, -1.9306, 0.9329] \end{cases}$$

Rimozione della Componente DC

Per eliminare le componenti DC che possono distorcere l'analisi delle basse frequenze, viene sottratta la media dei dati per ciascuna epoca:

$$\text{eeg_norm} = \text{eeg} - \text{mean}(\text{eeg}, \text{axis} = 0)$$

Configurazione di Epoche/Finestra I dati vengono elaborati in epoche/finestra, tipicamente di 2 secondi, costituite da 256 campioni EEG.

Applicazione della Finestra Hanning

Viene applicata una finestra Hanning con dimensione di 256 campioni, scorrendo di 16 campioni per creare nuove finestre. L'implementazione è la seguente:

$$\text{hanning_window}[i] = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(i+1)}{257} \right) \right), \quad i = 0, 1, \dots, 255$$

Calcolo delle Potenze di Banda

Per calcolare le potenze di banda, i dati EEG normalizzati vengono moltiplicati per la finestra Hanning:

$$\text{hanning_window} = \text{np.hanning}(\text{eeg_norm.shape}[0]) \times 2$$

La FFT viene calcolata come:

$$\text{eeg_norm_fft} = \text{fft}(\text{eeg_norm}^T \cdot \text{hanning_window})^T / \text{eeg_norm_fft.shape}[0]$$

La magnitudine quadrata della FFT viene calcolata:

$$\text{eeg_fft_square_3d} = |\text{fourier_transform}|^2$$

Le potenze di banda per l'intervallo da 16 a 25 vengono calcolate come segue:

$$\text{band_power} = \frac{1}{\text{len}(\text{band})} \sum_{i=16}^{25} \text{eeg_fft_square_3d}[i, :, :]$$

Normalizzazione

Infine, la potenza di banda viene normalizzata per la lunghezza della finestra (256):

$$\text{band_power_norm} = \frac{\text{band_power}}{\text{hanning_window.shape}[0]}$$

Questo approccio sistematico consente di estrarre e normalizzare con precisione le caratteristiche delle potenze di banda dai segnali EEG per ulteriori analisi [47].

3.2.2 Struttura MN8

Nonostante gli avanzamenti tecnologici, i dispositivi BCI attuali presentano ancora limiti in termini di portabilità e integrazione nella vita quotidiana. Immaginiamo un futuro in cui questi dispositivi siano discreti e in grado di monitorare in tempo reale l'attività cerebrale, misurando parametri come stress, attenzione e carico cognitivo. L'MN8 è uno dei prodotti più recenti dell'azienda Emotiv, un dispositivo auricolare EEG a 2 canali che si collega all'app per il monitoraggio delle onde cerebrali Contour MN8. Il suo obiettivo è catturare i dati dell'EEG per fornire agli utenti informazioni sui loro stati cognitivi, come lo stress e la concentrazione, con l'obiettivo di migliorare la produttività e il benessere. Gli auricolari MN8 Fig. 3.5 catturano segnali EEG mentre gli utenti svolgono le loro attività lavorative [48]. Questi dati vengono poi elaborati tramite algoritmi proprietari che identificano i livelli di attenzione e stress cognitivo.



Figura 3.5: Dispositivo Emotiv MN8, dal sito Emotiv.

Gli utenti possono quindi accedere a metriche semplificate che mostrano il loro livello di attenzione e stress. Ad esempio, il sistema può suggerire pause quando i livelli di stress sono troppo elevati, incoraggiando i lavoratori a prendersi un momento per recuperare la concentrazione. L'utilizzo nelle aziende prevede che esse ricevano dati aggregati, non individuali, per comprendere le dinamiche di attenzione e stress all'interno di team o dipartimenti. Questo permette di identificare i momenti di maggiore produttività o i fattori che influenzano il benessere dei lavoratori. Il carico cognitivo rappresenta lo sforzo mentale che impieghiamo per elaborare informazioni. Un eccesso di carico può compromettere le nostre prestazioni. Comprendendo a fondo questi meccanismi, potremmo prevedere i momenti più adatti per svolgere specifiche attività e personalizzare di conseguenza la nostra giornata lavorativa. Per questo motivo vengono registrate dal sistema MN8 di Emotiv le metriche che si concentrano principalmente su due aspetti: l'attenzione e lo stress cognitivo, come si può osservare in Fig. 3.6.

- **Attenzione:** Il sistema misura il livello di attenzione del lavoratore attraverso l'analisi dei segnali EEG. Viene rappresentato da una linea che mostra le fluttuazioni dell'attenzione durante le attività lavorative. Aumenti nell'attività

delle onde cerebrali a bassa frequenza (theta e alpha) sono associati a livelli elevati di attenzione, mentre diminuzioni indicano distrazioni o cambi di compito.

- **Stress Cognitivo:** La seconda metrica riguarda il livello di stress cognitivo. Quando il lavoratore è sotto stress, si osserva un aumento dell'attività nelle onde cerebrali ad alta frequenza (beta e gamma). Questa metrica aiuta a identificare quando un lavoratore potrebbe essere sopraffatto e necessitare di una pausa.

Nel capitolo 4 verrà illustrato nel dettaglio il metodo utilizzato per il calcolo di queste misure, con particolare riferimento alla loro applicazione nell'ambito specifico di questa tesi.

Privacy e sicurezza, soprattutto in questo contesto, sono aspetti fondamentali. È inaccettabile che le informazioni cerebrali vengano utilizzate in modo improprio. Emotiv si impegna a garantire la massima trasparenza e a proteggere i dati degli utenti, collaborando con esperti del settore per assicurarsi che la tecnologia venga utilizzata in modo etico e responsabile. Le specifiche tecniche del dispositivo sono disponibili in 3.2.

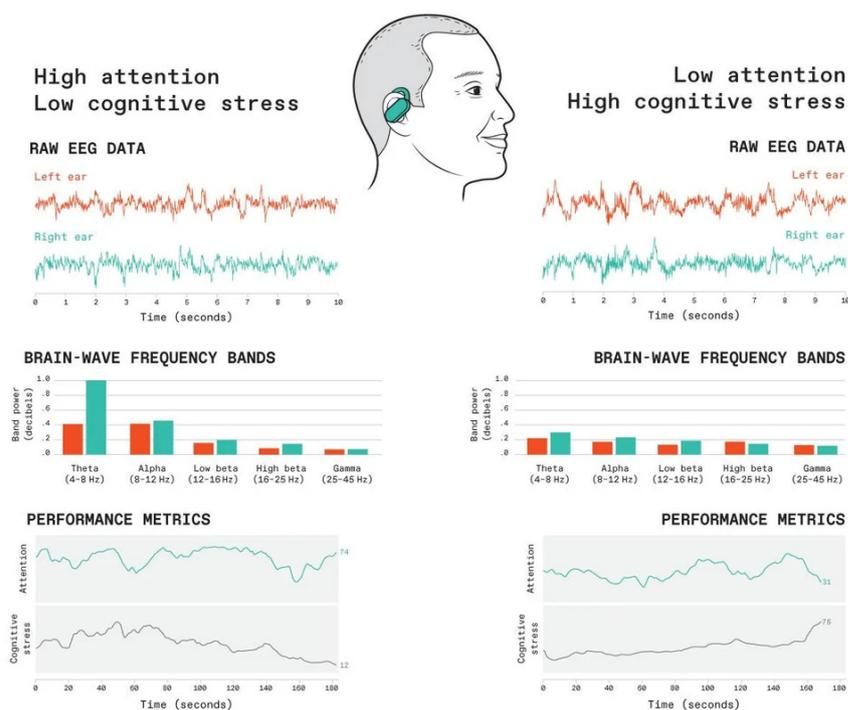


Figura 3.6: Brain Waves e Performance Metrics con MN8, ricavato da [48].

3.2.3 Struttura Insight

L'Emotiv Insight a 5 canali [49] Fig 3.7 è un neuroheadset wireless che utilizza sensori elettroencefalografici (AF3, AF4, T7, T8, Pz) per rilevare l'attività neurologica. Si tratta di un dispositivo innovativo nel campo delle BCI, proprio perché è stato progettato per rendere l'analisi dell'attività cerebrale accessibile e pratica per utenti non professionisti.



Figura 3.7: Dispositivo Emotiv Insight, dal sito Emotiv.

Caratteristiche di Emotiv Insight

Sensori EEG: Dispone di cinque canali EEG che misurano l'attività cerebrale. Questi sensori sono posizionati in aree strategiche della testa per massimizzare la qualità del segnale. Sono sensori semi-dry, vale a dire che devono essere idratati con una specifica soluzione salina prima di ogni utilizzo, risultando facili da usare e pulire e garantendo un'installazione abbastanza rapida.

Connettività: Può connettersi a computer o smartphone tramite Bluetooth o USB, fornendo feedback immediato sull'attività cerebrale, particolarmente utile in contesti di ricerca e sviluppo di applicazioni interattive. È infatti utilizzato soprattutto in giochi e applicazioni di realtà virtuale per creare esperienze immersive, in cui emozioni e reazioni degli utenti influenzano il gameplay.

Ergonomia: L'Emotiv Insight è progettato per essere indossato comodamente, anche se alcuni utenti hanno segnalato che il dispositivo può risultare un po' scomodo durante un uso prolungato.

Sensori di movimento: Include sensori di movimento a nove assi per rilevare i movimenti della testa.

Usi di Emotiv Insight

L'Emotiv Insight è utilizzato principalmente per:

- **Analisi dell'attività cerebrale:** Viene impiegato per esaminare le risposte cerebrali a stimoli visivi e uditivi, rendendolo utile in contesti videoludici e ricerca. Il dispositivo si presta ad essere utilizzato per studiare le risposte cerebrali a vari stimoli, contribuendo a una migliore comprensione delle funzioni cognitive e delle emozioni.
- **Misurazione delle emozioni:** Può misurare vari stati emotivi come interesse, coinvolgimento, stress, rilassamento, eccitazione e concentrazione, anche se la qualità del segnale può variare. Un esempio tangibile potrebbe anche essere l'utilizzo di Emotiv Insight da parte delle aziende per testare come i consumatori reagiscono a nuovi prodotti o campagne pubblicitarie, analizzando le risposte emotive in tempo reale.
- **Applicazioni ludiche:** È adatto per applicazioni di intrattenimento, per realizzare esperienze di gioco immersive, ma non è raccomandato per scopi medici o scientifici a causa di alcune limitazioni nel comfort e nella precisione del segnale.

Limitazioni

Nonostante le sue molteplici applicazioni, l'Emotiv Insight presenta alcune limitazioni:

- La qualità del segnale può variare molto anche in base a minimi movimenti, alle condizioni ambientali e alla posizione del dispositivo.
- Non è considerato adatto per applicazioni cliniche o mediche a causa delle incertezze nella qualità del segnale.

Le specifiche tecniche del dispositivo sono disponibili in 3.2.

Tabella 3.2: Specifiche Tecniche dei Dispositivi Utilizzati, dal sito Emotiv gitbook

Caratteristica	Emotiv MN8	Emotiv Insight 2
Numero di Canali	2	5 (più CMS/DRL di riferimento sulla mastoide sinistra)
Metodo di Campionamento	Synchronous	Campionamento Sequenziale, ADC singolo
Frequenza di Campionamento	128 Hz (8kHz interno)	128 SPS (2048 Hz interno)
Risoluzione EEG	14-bit	16 bit 1 LSB = 0.128V (ADC a 16 bit)
Larghezza di Banda	0.5 - 45Hz	0.5 - 45Hz, filtri digitali a notch a 50Hz e 60Hz
Filtraggio	Filtro passa-basso con cutoff a 45Hz	Filtro sinc digitale di 5° ordine
Gamma Dinamica	8400V	8400V(pp)
Modalità di Accoppiamento	AC coupled	AC coupled
Connettività	Bluetooth Low Energy (4.2), Bluetooth Classico (A2DP, HSP)	Bluetooth 5.0 retrocompatibile
Autonomia della Batteria	Fino a 6 ore (160mAh)	Fino a 20 ore (Batteria LiPo 430mAh)
Tempo di Ricarica	Fino a 2 ore	—
Sensore di Movimento	ICM-20648 (6 assi)	ICM-20948 (Accelerometro 3 assi, Giroscopio, Magnetometro)
Campionamento del Movimento	6.4 Hz	32 Hz
Risoluzione del Movimento	10-bit	16-bit BLE
Output di Quaternion	Sì	Sì
Materiale del Sensore	Elastomero conduttivo secco, non tossico, non allergico	Polimero semi-secco

3.3 EmotivUnityPlugin

L'Emotiv Unity Plugin [50] è uno strumento avanzato per gli sviluppatori interessati a integrare funzionalità di interfaccia BCI nei giochi e nelle applicazioni creati con Unity. Il plugin offre accesso e interpretazione dei dati EEG e delle varie metriche registrate mediante l'utilizzo dei dispositivi Emotiv, aprendo nuove possibilità di interazione tra utenti e sistemi digitali. Viene creato un collegamento diretto tra l'API Emotiv e Unity, con lo schema in Figura 3.8, consentendo agli sviluppatori di acquisire dati EEG e comandi BCI con facilità [51]. Gli sviluppatori possono ottenere sia i segnali EEG grezzi, previa apposita licenza, che i dati elaborati, ideali per gestire attività e acquisire informazioni sull'attività cerebrale. Il plugin supporta inoltre, nel caso in cui si volesse utilizzare la BCI per le sue funzionalità di BCI attiva, fino a quattro comandi mentali, come "spingere", "tirare", "sinistra" e "destra", che possono essere associati ad azioni specifiche all'interno di un gioco o dell'applicazione, migliorando l'interazione con l'utente.

L'installazione del plugin Emotiv per Unity viene fatta tramite il sito ufficiale di Emotiv, dalla piattaforma Unity Asset Store o dalla repository ufficiale GitHub. La connessione ai dispositivi Emotiv avviene tramite Bluetooth. Alcuni dispositivi richiedono anche un'autenticazione, mediante l'app Cortex, in modo da garantire l'accesso ai dati EEG solo a utenti autorizzati. Dopo il download, il plugin deve essere importato nel progetto Unity, permettendo di scrivere script per gestire gli eventi generati dai comandi mentali e creare interazioni più reattive .

Inoltre è possibile sottoscrivere uno o più flussi di dati tramite la funzione `SubscribeData()`. Il plugin Unity supporta attualmente vari tipi di flussi di dati, tra cui: EEG (eeg), Motion (mot), Device Information (dev), Facial Expression (fac), Mental Command (com), Performance Metrics (met), System Event (sys), Band Power (pow). È possibile accedere ai dati usando metodi specifici, come `OnBandPowerDataReceived()` e `OnPerfDataReceived()`, utilizzati per ottenere i dati relativi alle "Performance Metrics" e ai "Power Bands", indipendentemente dall'utilizzo del buffer dati.

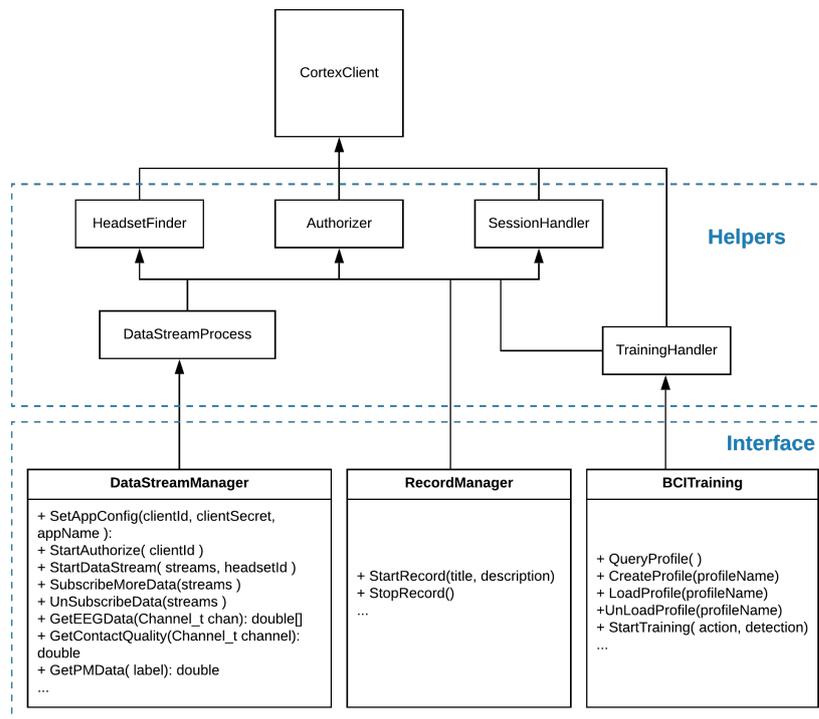


Figura 3.8: Struttura del codice del plugin Unity per Emotiv riferito a [50].

Capitolo 4

Progettazione e Sviluppo

In questo capitolo verranno approfonditi gli studi preliminari presi in esame, gli esercizi utilizzati come “Ground Truth”, lo sviluppo dell’applicativo con le relative bande di potenza registrate e come sono state gestite. Infine verrà descritto il task principale relativo all’esercizio di robotica collaborativa.

4.1 Studi preliminari

Di seguito verranno riportati gli studi preliminari più rilevanti consultati.

Lo studio [29] sottolinea l’importanza di considerare molteplici stati mentali nei sistemi di rilevamento del carico di lavoro mentale e del livello di stress basati sull’EEG per le interfacce cervello-computer (BCI) passive. La previsione simultanea di questi stati contribuisce a migliorare l’efficacia pratica e l’affidabilità delle applicazioni BCI in contesti reali.

La procedura sperimentale descritta nell’articolo si articola in diverse fasi, come indicato in Fig. 4.1, volte a indurre carico cognitivo e stati emotivi specifici nei partecipanti. In particolare, i partecipanti hanno completato una sessione sperimentale composta da blocchi alternati di compiti, progettati per evocare stati emotivi di “**Rilassamento**” e “**Stress**”. Questa alternanza è cruciale per investigare come le emozioni influenzino le risposte cognitive e fisiologiche, elementi fondamentali per la ricerca sul carico cognitivo e sullo stress. L’induzione degli stati emotivi è stata ottenuta tramite stimoli visivi e uditivi.

- Video con immagini rilassanti e musica tranquilla sono stati utilizzati per creare un ambiente favorevole al rilassamento e alla riduzione dello stress. Questi stimoli venivano presentati all’inizio di ciascun blocco di compiti, predisponendo i partecipanti a sperimentare uno stato emotivo specifico.

- Il carico cognitivo è stato invece indotto attraverso esercizi di aritmetica mentale di difficoltà variabile. Le prestazioni dei partecipanti venivano monitorate in tempo reale, permettendo di adattare la complessità delle equazioni per mantenere livelli differenti di carico cognitivo.

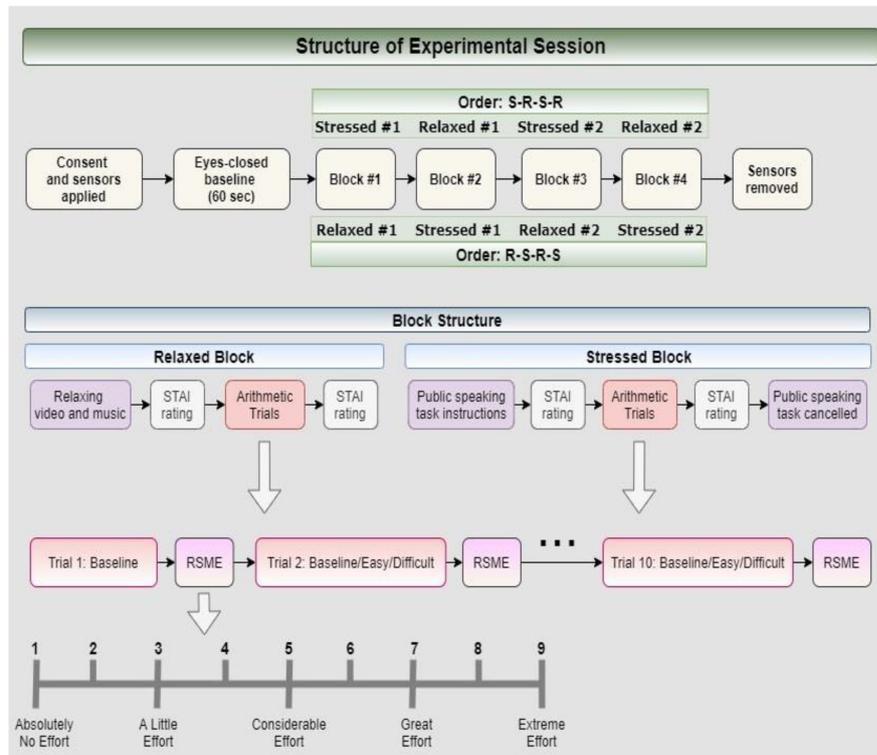


Figura 4.1: Struttura della sessione sperimentale proposta in [29]

L'obiettivo principale di questa metodologia è creare condizioni sperimentali controllate in cui i partecipanti possano vivere emozioni specifiche, consentendo ai ricercatori di esaminare come tali stati influenzino le misurazioni fisiologiche, comportamentali e cognitive. Questo approccio facilita dunque l'analisi dell'interazione tra emozioni, carico cognitivo e stress, e fornisce indicazioni utili per migliorare la classificazione simultanea di tali stati attraverso interfacce cervello-computer.

Lo studio [52] si concentra sullo sviluppo di un sistema di riconoscimento dello stress in tempo reale basato su segnali EEG. Questo sistema mira a identificare e classificare i livelli di stress nei partecipanti attraverso l'analisi delle loro reazioni fisiologiche a diversi stimoli stressanti.

In particolare, lo studio si propone di:

1. Utilizzare test psicologici, come il test di Stroop e il test di aritmetica, per indurre diversi livelli di stress nei partecipanti e misurare le loro risposte

fisiologiche tramite EEG. La selezione degli esercizi è stata guidata dalla loro capacità di indurre stress in modo misurabile e ripetibile, permettendo così di raccogliere dati significativi per l'analisi EEG e la successiva classificazione dei livelli di stress.

2. Registrare i segnali EEG durante l'esecuzione dei test per analizzare le caratteristiche associate ai diversi stati di stress.
3. Creare un modello di classificazione che utilizzi le caratteristiche estratte dai segnali EEG per identificare i livelli di stress percepiti dai partecipanti, validando così l'efficacia del sistema.
4. Personalizzare le domande dei test per adattarsi meglio alle risposte individuali e migliorare l'accuratezza del riconoscimento dello stress, considerando che la percezione dello stress è soggettiva e varia da persona a persona.

La fase di training e di testing è strutturata come segue:

- Fase di Training (Figura 4.2): i soggetti partecipano a tre sezioni distinte della durata di 3 minuti ciascuna:
 1. **Sezione di Riposo:** I partecipanti sono invitati a rilassarsi completamente con gli occhi chiusi. Questa fase serve come baseline per confrontare le altre condizioni di stress.
 2. **Test di Stroop:** Questo test è un metodo consolidato per indurre stress psicologico. Il test richiede ai partecipanti di selezionare il colore con cui sono scritte le parole, che non sempre coincide con il significato stesso delle parole. Questa discrepanza crea una situazione di conflitto cognitivo, che può quindi generare stress. È stato dimostrato che il test di Stroop è efficace nel provocare reazioni psicofisiologiche sotto stress, rendendolo così un ottimo strumento per la ricerca sulla reattività allo stress.
 3. **Test di Aritmetica Mentale:** Questo esercizio è stato scelto per indurre un livello di stress più elevato rispetto al test di Stroop. I soggetti sono sottoposti ad una serie di problemi aritmetici (come addizione, sottrazione, moltiplicazione, divisione) da svolgere entro 10 secondi. Le domande sono generate casualmente e i numeri sono compresi tra 1 e 100. La risoluzione di problemi aritmetici richiede maggiore concentrazione e può generare ansia, specialmente quando i partecipanti devono completare i problemi entro un limite di tempo. Questo tipo di test è utile per valutare la risposta allo stress in situazioni che richiedono prestazioni cognitive rapide e accurate.

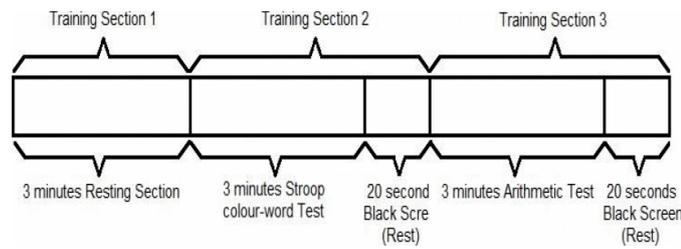


Figura 4.2: Fase di training proposta in [52].

- Fase di Testing (Figura 4.3): viene eseguita una serie di test simili a quelli della fase di training, ma con domande diverse. Anche in questa fase, i soggetti devono affrontare il test di Stroop e il test di aritmetica mentale in un ordine casuale, con intervalli di riposo di 20 secondi tra i test. Durante questa fase, vengono effettuate le registrazioni EEG per ciascun soggetto. Dopo ogni stimolo di stress, i partecipanti devono completare un questionario per valutare il livello di stress percepito, utilizzando una scala a tre punti (0 - nessun stress, 1 - basso livello di stress, 2 - alto livello di stress). Questi passaggi sono fondamentali per addestrare il modello di classificazione utilizzato per identificare i livelli di stress in base alle caratteristiche estratte dai segnali EEG.



Figura 4.3: Fase di testing proposta in [52].

Il documento [53] descrive la progettazione dei task e degli stimoli utilizzati in un sistema di riconoscimento dell'attenzione basato sull'elettroencefalogramma (EEG). Questa progettazione è fondamentale per classificare i livelli di attenzione in quattro categorie: **baseline**, **lettura**, **compiti matematici** e **attenzione sostenuta**. I task utilizzati nello studio sono:

1. Baseline (stato neutro): i soggetti si rilassano con gli occhi chiusi. Questo registra segnali EEG in uno stato mentale neutro.
2. Lettura (silenziosa): i soggetti leggono un breve paragrafo mentalmente senza vocalizzare, rappresentando un'attenzione moderata.

3. Compito matematico: I soggetti eseguono mentalmente somme e sottrazioni, rappresentando un'attenzione più elevata.
4. Compito di attenzione costante (CPT, Continuous Performance Task - SART, Sustained Attention to Response Task): I soggetti devono monitorare una sequenza di stimoli visivi e premere uno spazio quando vedono un pattern specifico ("X" seguito da "A"). Questo misura la capacità di mantenere e focalizzare l'attenzione.

Ogni compito dura 15 secondi, con cinque prove per sessione. I partecipanti sono tenuti a completare 10 sessioni per ciascun compito (200 prove totali per partecipante). Tra una sessione e l'altra, i soggetti fanno una pausa di pochi minuti per ridurre l'affaticamento. I partecipanti sono volontari sani (età: 20-32 anni) senza abitudini che possano influenzare i risultati (es. consumo di alcol o privazione di sonno).

Gli stimoli variano in complessità e richiedono livelli crescenti di concentrazione mentale. La progettazione degli stimoli mira a indurre specifici stati cognitivi che possono essere rilevati e classificati tramite l'EEG. Questa progettazione consente al sistema di raccogliere dati EEG per l'estrazione di caratteristiche utili alla classificazione e alla modellizzazione dei diversi livelli di attenzione. Il compito di attenzione costante alla risposta (SART [54]) è un test per misurare l'attenzione prolungata, una funzione mentale necessaria per svolgere compiti che richiedono concentrazione nel tempo. L'attenzione sostenuta dipende da due fattori principali: la vigilanza, che permette di notare cambiamenti nell'ambiente nel lungo periodo, ed eccitazione, che è necessaria per mantenere un livello adeguato di attenzione. La vigilanza attiva alcune aree cerebrali, mentre l'eccitazione coinvolge strutture come il talamo e il tronco cerebrale.

Nel SART, i partecipanti devono rispondere a segnali frequenti (prove GO) e non rispondere a segnali rari (prove NO-GO). Gli errori di commissione (rispondere alle prove NO-GO) e gli errori di omissione (non rispondere alle prove GO) indicano una scarsa vigilanza.

Lo studio [55] propone un framework per stimare il carico cognitivo utilizzando dati fisiologici provenienti da dati e movimenti oculari e cardiaci. Attraverso l'utilizzo di classificatori, il framework è in grado di predire con precisione i livelli basso, medio e alto di carico cognitivo. Il compito sperimentale utilizzato nello studio comprende tre fasi distinte:

- **Fase di Riposo:** Durante questa fase, i partecipanti venivano esposti a uno schermo che cambiava colore tra bianco, nero e grigio. Questo periodo di un minuto serviva per calibrare l'Eye Tracker e acquisire dati sul comportamento degli occhi e del cuore in condizioni di riposo.

- **Fase di Prova:** In questa fase, i partecipanti leggevano un'introduzione e svolgevano versioni più semplici degli stimoli rispetto a quelli presentati nella fase successiva. L'obiettivo era familiarizzare i partecipanti con il compito e raccogliere dati preliminari sulle risposte fisiologiche durante una fase di preparazione.
- **Fase del Compito Principale:** Questa fase consisteva in un gioco basato sull'individuazione di parole e frasi corrette o scorrette. I partecipanti dovevano riconoscere parole e frasi inventate e classificarle correttamente. Il compito era progettato per indurre un carico cognitivo intrinseco ed estrinseco, poiché la complessità del compito e l'ordine casuale delle parole e delle frasi generano differenti livelli di impegno cognitivo.

I diversi tipi di stimoli presentati durante le tre fasi del compito erano progettati per generare livelli variabili di carico cognitivo e per raccogliere dati fisiologici correlati a tali livelli. Questa variazione nei compiti e negli stimoli ha permesso al framework di classificare con precisione i diversi livelli di carico cognitivo attraverso l'analisi dei dati fisiologici raccolti durante l'esecuzione del compito.

In [2], lo scopo principale è identificare e classificare quando lo stress può essere positivo e negativo, in base alla risposta emotiva dell'utente con l'utilizzo dell'EEG e SVM.

Il metodo utilizzato nello studio è lo Stroop Word Colour Test in cui il soggetto è tenuto a rispondere identificando la mancata corrispondenza tra il colore del carattere della parola e il suo significato effettivo.

La fase di training utilizzata è mostrata in Figura 4.4, e comprende una sessione di riposo di 1 minuto, un test multitasking di 1 minuto con intervallo di tempo di 20 secondi (bassa tensione) e un test multitasking di 1 minuto con intervallo di tempo di 5 secondi (alta tensione), separati da un intervallo interstimolo di 20 secondi.

Dopo ogni test multitasking completato è previsto un sondaggio che richiede il feedback del soggetto sulla risposta emotiva (Figura 4.5). Questo feedback consente al sistema di classificare lo stress in eustress e distress.

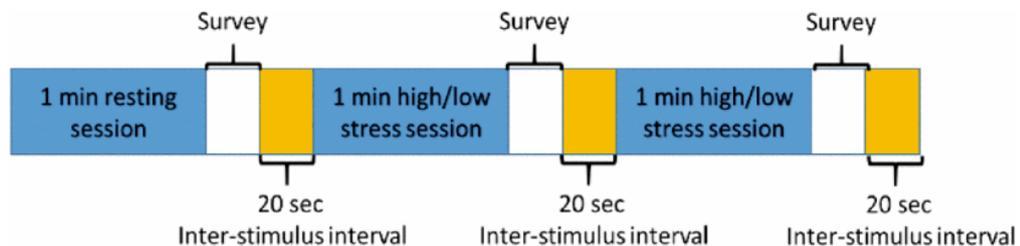


Figura 4.4: Fase di Training con fasi di bassa e alta tensione proposta in [2].

Si è notato che in generale il test multitasking ad alta tensione porta principalmente a un'emozione negativa, collettivamente definita come distress. Tuttavia, la tolleranza al livello di stress individuale è diversa e soggettiva a seconda dell'interesse e dell'approccio degli individui verso gli stressori. Lo stato di stress e la risposta emotiva specificati nel questionario di autovalutazione dai partecipanti vengono utilizzati per convalidare il livello di stress sperimentato dal soggetto.

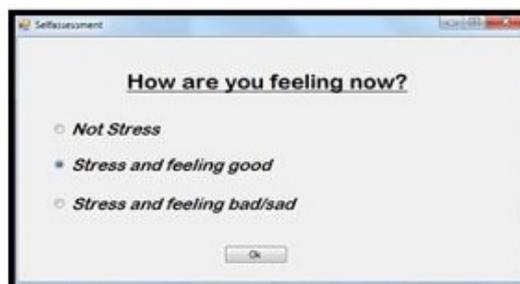


Figura 4.5: Feedback dello stress dell'utente.

La ricerca [30] pone le basi per i progressi nelle applicazioni AR, VR e MR, dimostrando il potenziale di combinare la tecnologia di rilevamento delle onde cerebrali con tecnologie immersive, con l'intento di creare esperienze più coinvolgenti, user-friendly e di impatto in vari settori. I partecipanti sono sottoposti a sei diversi compiti mentali, tre dei quali inducono l'attenzione interna e tre l'attenzione esterna.

I partecipanti vengono accolti nel laboratorio e vengono fornite loro informazioni verbali e scritte dell'esperimento. Dopo aver fornito il **consenso informato** e **compilato i questionari**, vengono calibrati il sistema EEG e il tracciamento oculare. Una volta completata la calibrazione, inizia la fase di addestramento del classificatore di attenzione. I partecipanti eseguono dieci compiti per ciascuna condizione (interna ed esterna) in ordine casuale.

Attenzione Interna:

- Task che riguardano l'attenzione: i partecipanti sono invitati a concentrarsi su pensieri o immagini mentali senza coinvolgere movimenti fisici esterni. Ad esempio, pensare a parole che iniziano con una lettera specifica o visualizzare mentalmente un oggetto.
- Task che riguardano l'elaborazione cognitiva: richiedono ai partecipanti di risolvere problemi matematici o di logica senza interagire con stimoli esterni. L'attenzione è rivolta all'elaborazione di informazioni interne.

Attenzione esterna:

- Compiti di controllo esterno: i partecipanti devono concentrarsi su stimoli esterni presentati sullo schermo dell'HoloLens 2. Ad esempio, seguire un oggetto in movimento o rispondere a segnali visivi esterni.
- Compiti di interazione con l'ambiente esterno: coinvolgono l'interazione con elementi esterni, come spostare oggetti virtuali o completare attività visive specifiche.

Dopo l'addestramento, vengono provati due sistemi: uno "attention-aware" che fornisce informazioni sull'attenzione dell'utente durante l'esecuzione dei compiti, consentendo una maggiore consapevolezza e feedback sull'orientamento dell'attenzione e uno "attention-unaware" che, al contrario, non fornisce informazioni sull'attenzione dell'utente, consentendo di confrontare l'efficacia e l'usabilità dei due approcci nell'ambito dell'interazione AR-BCI.

Durante i test, i partecipanti completano una serie di compiti di attenzione interna ed esterna, mentre il sistema registra e analizza i dati EEG e di tracciamento oculare. Al termine di ciascuna sessione, i partecipanti compilano questionari sulla distrazione durante i compiti e valutano l'usabilità complessiva del sistema. Questo setup sperimentale consente di valutare l'efficacia del sistema di attenzione e raccogliere feedback dai partecipanti sull'esperienza d'uso e sulle prestazioni del sistema.

Lo studio riportato in [56] analizza l'impatto del carico cognitivo sulle prestazioni in compiti svolti in ambienti di apprendimento reali rispetto a quelli di realtà virtuale (VR). L'obiettivo è comprendere come la VR possa influenzare l'apprendimento e la concentrazione dei partecipanti.

I partecipanti sono stati coinvolti in un compito principale, come giocare a Tetris, in due ambienti distinti: uno reale e uno in VR. Durante lo svolgimento del compito principale, veniva introdotta un'interruzione costituita da un compito secondario chiamato **Detection Response Task (DRT)**. Nel DRT, i partecipanti dovevano premere un pedale in risposta a vibrazioni percepite mentre continuavano il compito principale.

È stato proposto per l'esperimento un modello a quadrante come in Figura 4.6. Il modello prevede quattro round per ciascun partecipante in cui il compito principale (giocare a Tetris) viene eseguito in due ambienti: mondo reale e VR. Per ciascun ambiente, il compito primario viene eseguito con e senza interruzione del DRT.

Questa configurazione ha permesso di valutare in modo sistematico l'impatto della VR e del compito secondario sulle prestazioni e sul carico cognitivo dei partecipanti. Prima dell'esperimento, i partecipanti hanno completato un questionario demografico per raccogliere dati sulle loro caratteristiche personali, utili per analizzare eventuali correlazioni con le prestazioni. Successivamente, è stata fornita una spiegazione dettagliata sul compito principale e sul DRT per garantire una chiara comprensione delle attività richieste. La procedura ha incluso diverse fasi per misurare

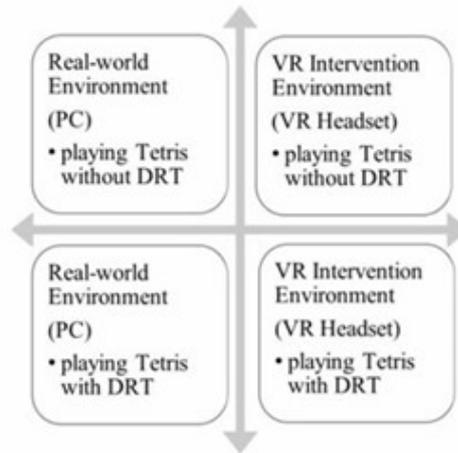


Figura 4.6: Il modello a quadrante in [56].

in modo rigoroso l’impatto della VR e del carico cognitivo sull’apprendimento. Il lavoro descritto in [21] analizza i livelli di stress durante il gameplay, con l’obiettivo di identificare cambiamenti nei pattern neurali associati a diversi livelli di stress. Lo studio si basa sull’utilizzo dell’elettroencefalogramma (EEG) per acquisire e analizzare segnali cerebrali durante l’esperienza di gioco.

Dieci volontari hanno partecipato a sessioni di gioco, strutturate come in Figura 4.7 con un’app di ricerca di parole. Ogni sessione comprendeva tre livelli di difficoltà crescente: facile, medio e difficile. Il gioco, installato su uno smartphone Android, richiedeva ai partecipanti di individuare parole nascoste in una griglia. L’ordine dei livelli è stato randomizzato per ciascun partecipante.

Durante il gioco, i partecipanti completavano i compiti ai diversi livelli di difficoltà, con brevi intervalli di relax tra una sessione e l’altra. Per garantire l’accuratezza dei dati EEG, sono state adottate misure per ridurre al minimo gli artefatti causati da movimenti oculari e facciali.

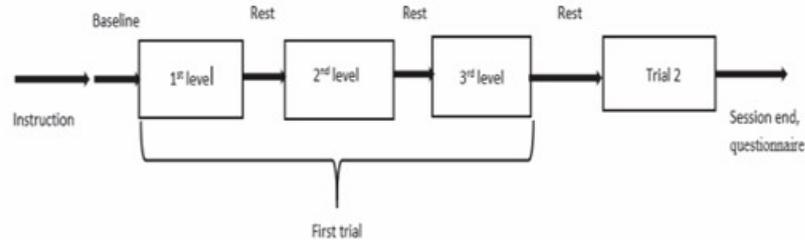


Figura 4.7: Struttura dell’esperimento descritto in [21].

Lo studio [22] si concentra sull’analisi dello stress durante il gameplay utilizzando

EEG per monitorare l'attività cerebrale. Lo studio ha selezionato vari generi di giochi videoludici per osservare le risposte neurali in situazioni stressanti. I giochi analizzati sono stati:

- Puzzle Games: giochi che richiedono logica e abilità di pensiero critico, come Tetris, Sudoku e Candy Crush.
- Strategy Games: giochi che implicano pianificazione e gestione delle risorse, ad esempio StarCraft o Final Fantasy.
- Action Games: giochi incentrati sull'azione e i riflessi, come Call of Duty o Super Mario.
- Combination Games: giochi che combinano puzzle e strategia, come Grand Theft Auto: San Andreas.

Questa suddivisione ha permesso di analizzare le risposte cerebrali in relazione a diverse dinamiche di gioco e livelli di complessità, fornendo una panoramica approfondita sugli effetti dello stress nel contesto del gaming.

4.2 Procedura

La procedura utilizzata per lo studio si basa su una serie di esercizi e tecniche, sviluppate a partire dagli Studi Preliminari descritti nella Sezione 4.1 per analizzare lo stress, l'attenzione e carico cognitivo in un contesto di robotica collaborativa.

4.2.1 Obiettivi dell'Analisi

Lo studio mira a determinare se la presenza di segnali anticipatori del movimento del braccio robotico riduca lo stress percepito e migliori la concentrazione dell'utente rispetto alla condizione in cui non vi è alcun preavviso. Più in dettaglio, si intende rispondere alle seguenti domande:

- RQ1: Lo stress percepito è influenzato dalla modalità di segnalazione?
L'obiettivo è verificare se segnali chiari e prevedibili abbiano un effetto calmante sull'utente, riducendo l'incertezza legata al movimento del robot.
- RQ2: La concentrazione e il carico cognitivo migliorano con segnali anticipatori?
Si ipotizza che una segnalazione chiara consenta all'utente di prepararsi meglio, riducendo errori e migliorando la fluidità nell'interazione.
- RQ3: Quali differenze emergono tra le tre modalità di segnalazione?
Confrontando i risultati delle tre varianti, sarà possibile comprendere quale tipo di segnale sia più efficace per garantire un'interazione collaborativa ottimale.

Questo procedimento consente un'analisi approfondita degli stati cognitivi ed emotivi degli utenti in contesti di robotica collaborativa. Confrontando i dati raccolti nelle diverse fasi, sarà infatti possibile ottenere una visione completa degli effetti che segnali anticipatori e condizioni di incertezza hanno sulla capacità dell'utente di gestire compiti complessi. I risultati dello studio potrebbero avere significative implicazioni per la progettazione di interfacce e sistemi robotici collaborativi, migliorando l'esperienza dell'utente e la sicurezza operativa.

4.2.2 Descrizione delle Fasi della Procedura

La procedura consta di un processo di raccolta ed elaborazione dei dati ricavati dall'MN8 o dall'Insight, in modo da ottenere informazioni utili e approfondite sullo stress, l'attenzione e il carico cognitivo dell'utente. La procedura segue un protocollo ben strutturato che include diverse fasi, descritte nella Figura 4.8, le quali sono progettate per stimolare specifici stati emotivi e cognitivi dell'utente.

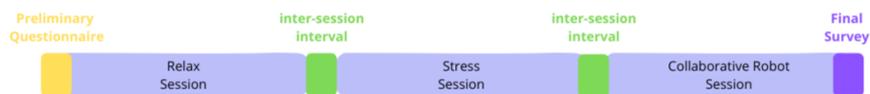


Figura 4.8: Fasi dello studio

Consenso informato

Prima dell'inizio dell'esperimento, a ogni partecipante è stato richiesto di leggere e firmare un modulo di **consenso informato**, in linea con le normative etiche e legali sulla ricerca. Il modulo descriveva in dettaglio lo scopo dello studio, le procedure previste, garantendo il pieno rispetto della privacy e l'anonimato dei dati raccolti. I partecipanti sono stati inoltre informati del loro diritto di interrompere la partecipazione in qualsiasi momento, senza alcuna conseguenza.

Raccolta Dati Iniziali: Questionario Preliminare

La prima fase prevede la compilazione di un questionario anonimo da parte dell'utente, mirato a raccogliere informazioni di carattere generale ma rilevanti per l'analisi. Tra i dati richiesti figurano:

- Informazioni demografiche: età, sesso e livello di istruzione

- Percorso accademico o professionale seguito
- Eventuale presenza di patologie neurologiche, sia pregresse sia attuali
- Storia recente di disturbi o lesioni alla testa.

Questi dati consentono di identificare eventuali fattori confondenti che potrebbero influire sui risultati dello studio, come una predisposizione a determinati livelli di stress o difficoltà cognitive.

Fase di Relax: Baseline per il Confronto

La seconda fase consiste in un esercizio di rilassamento finalizzato alla creazione di una baseline, ossia un punto di riferimento per gli esercizi successivi. Durante questa fase:

- Viene chiesto all'utente di rimanere fermo e rilassato, mantenendo gli occhi chiusi.
- Viene riprodotta una melodia rilassante, arricchita da suoni della natura, per favorire uno stato di calma.

Questo esercizio rappresenta uno stato di **bassa attivazione cognitiva ed emotiva**, che sarà confrontato con gli stati indotti dagli esercizi più impegnativi delle fasi successive. Questa baseline permette di valutare le variazioni significative nello stress, nell'attenzione e nel carico cognitivo, partendo da uno stato di calma ideale.

Esercizi di Stress, Concentrazione e Attenzione Sostenuta

In questa fase, l'utente è sottoposto a una serie di esercizi progettati per stimolare livelli crescenti di stress, concentrazione e attenzione. Gli esercizi includono:

- **Esercizio Stroop**: utilizzato per indurre alto stress. Si tratta di un compito cognitivo che richiede di indicare il colore delle parole mostrate, ignorando il significato semantico delle stesse (ad esempio, la parola "ROSSO" scritta in blu).
- **SART (Sustained Attention to Response Task)**: un esercizio che valuta l'attenzione sostenuta. L'utente deve rispondere rapidamente a stimoli visivi specifici, ignorando altri stimoli distrattori.
- **Esercizi di Aritmetica**: progettati per richiedere un'elevata concentrazione. All'utente vengono proposti problemi matematici come somme, sottrazioni, moltiplicazioni e divisioni, con un limite di tempo per risolverli.

Ogni esercizio è confrontato con i dati raccolti durante la fase di Relax per individuare variazioni negli stati cognitivi ed emotivi. Eventi particolari, come **errori** o **risposte tardive**, sono stati registrati (con il timestamp relativo) per evidenziare le variazioni nello stato mentale dell'utente durante momenti critici.

Robotica Collaborativa: Interazione Uomo-Macchina

L'ultima fase è dedicata a valutare l'impatto emotivo e cognitivo dell'interazione con un braccio robotico in un contesto di robotica collaborativa. Durante questa fase, l'utente deve eseguire un compito di assemblaggio di una morsa, con il supporto del braccio robotico. Gli eventi chiave ("inizio movimento" e "fine movimento" del robot) vengono monitorati per analizzare come il comportamento del robot influenzi lo stato mentale dell'utente. La fase include tre varianti dell'esercizio:

- Movimento senza preavviso: Il braccio robotico inizia a muoversi senza segnalazioni preventive, aumentando l'incertezza e, potenzialmente, lo stress.
- Movimento con segnale acustico: Il movimento è preceduto da un segnale sonoro, simile a quello di un veicolo in retromarcia. Questo avviso fornisce un'indicazione generica del momento di avvio.
- Movimento con doppio segnale (audio e voce): In questo caso da un messaggio vocale chiaro, che informa l'utente con la frase "Il robot sta per muoversi", seguito dal segnale acustico già utilizzato nella seconda variante. Questo schema è pensato per ridurre ulteriormente l'incertezza, fornendo un contesto esplicito e maggiore prevedibilità all'azione del robot.

Durante questa fase, viene monitorato l'impatto delle diverse modalità di segnalazione sullo stato cognitivo ed emotivo dell'utente. Le metriche analizzate includono: Livelli di stress, concentrazione e carico cognitivo: analizzati in relazione al precedente esercizio baseline 4.2.2, per valutare come la variabilità delle condizioni in cui l'utente percepisce l'inizio del movimento del robot possa influenzarlo.

Interazione uomo-robot: l'utente viene osservato in questa fase per rilevare eventuali segni di disagio, esitazione o difficoltà operative, che potrebbero essere influenzati dalla modalità di segnalazione, oltre all'accuratezza e alla tempestività delle azioni dell'utente nel completamento del compito di assemblaggio.

Questionario Finale

Al termine dell'intera procedura sperimentale, viene somministrato all'utente il questionario **NASA-TLX (Task Load Index)** (approfondito in 2.3.2), uno strumento standardizzato ampiamente utilizzato per valutare la percezione soggettiva

del carico di lavoro. Il questionario consente di raccogliere informazioni su sei dimensioni principali del carico cognitivo ed emotivo percepito: **domanda mentale**, **domanda fisica**, **domanda temporale**, **prestazione**, **sforzo** e **frustrazione**. L'obiettivo è ottenere una valutazione diretta dall'utente sulle difficoltà incontrate durante le diverse fasi dell'esperimento, con particolare attenzione agli esercizi di robotica collaborativa.

I punteggi raccolti vengono quindi confrontati con i dati oggettivi registrati durante l'esperimento, al fine di identificare eventuali discrepanze tra la percezione soggettiva dell'utente e gli indicatori rilevati strumentalmente.

Questo confronto permette di comprendere in modo più completo l'esperienza dell'utente, valutando se la sua percezione dello stress, del carico cognitivo e della concentrazione sia coerente con i risultati misurati oppure se emergano differenze significative. Inoltre, il questionario fornisce un'ulteriore prospettiva sulle modalità di segnalazione del movimento del robot, aiutando a determinare quale approccio risulti più favorevole per ridurre il carico complessivo percepito e migliorare l'interazione uomo-robot.

4.3 Applicazione Unity

L'applicazione sviluppata in Unity utilizza le capacità della piattaforma per la creazione e gestione di esercizi interattivi, tra cui Relax, Stroop, SART, Aritmetica e il test con il robot (da avviare tramite il MainMenu in Figura 4.9). Ogni esercizio (esempio in Figura 4.10) è stato progettato con una logica integrata che sfrutta le funzionalità dell'Emotiv Unity Plugin per monitorare e registrare parametri neurofisiologici in tempo reale.

All'avvio di ciascun test, tramite la funzione *onStartTest()*, vengono inizializzate e avviate le registrazioni dei segnali relativi alle potenze di banda cerebrale (Alpha, Beta High, Beta Low, Theta, Gamma) e delle metriche di performance (attenzione e stress cognitivo), entrambi corredati di timestamp per garantire una tracciabilità precisa dei dati raccolti. I file corrispondenti alle bande di potenza e alle metriche di performance sono salvati automaticamente al termine dei test nel formato `nomeUtente_nomeTask_PowerBands_data.csv` e `nomeUtente_nomeTask_PerfMetrics_data.csv` rispettivamente.

Inoltre, il sistema prevede la registrazione dettagliata degli eventi rilevanti durante l'esecuzione degli esercizi. Ad esempio, per gli esercizi Stroop, SART e Aritmetica, vengono registrati eventi come risposte errate (Wrong) o risposte tardive (TooLate), mentre per il test con il robot, vengono registrati eventi chiave come l'inizio (START_MOVE) e la fine del test (END_MOVE).

La registrazione degli eventi è gestita dalla funzione *onEventRegister()*, che salva nel file CSV denominato secondo il formato `nomeUtente_nomeTask_Event_data.csv`

il timestamp di ogni evento e il nome dell'evento stesso. Questo approccio permette di generare un log dettagliato e strutturato, utile per l'analisi post-test e per il monitoraggio delle performance dell'utente.



Figura 4.9: Pagina principale, da cui far partire la sessione e i test.



Figura 4.10: Esempi di risposte nello Stroop World Color Test.

4.3.1 La classe MyDataRecorder

La classe `MyDataRecorder` è stata progettata per gestire l'integrazione del plugin Unity con la piattaforma Emotiv, registrando e gestendo i dati EEG e altri flussi di dati provenienti dai dispositivi Emotiv. Questa classe serve come base per implementare test interattivi, come il test di *Stroop* (*StroopTest*), di *Sustained*

Attention to Response Task (SARTTest), di *Aritmetica (ArithmeticTest)* e il test con il *Robot (RobotTest)* i quali sfruttano i dati EEG per monitorare lo stato mentale dell'utente durante l'esecuzione di compiti cognitivi.

Struttura della classe MydDataRecorder

La classe è composta da diversi metodi e variabili per interagire con l'interfaccia Emotiv Unity Plugin e gestire sessioni di registrazione dati.

EmotivUnityItf_eItf = EmotivUnityItf.Instance;

L'istanza di "EmotivUnityItf" rappresenta l'interfaccia principale per interagire con il framework Emotiv. Questa è una classe singleton che permette di accedere ai metodi per inizializzare il sistema, gestire sessioni e sottoscrivere dati.

Listato 4.1: Funzione Start()

```

1 void Start ()
2 {
3     _eItf.Init (_clientId , _clientSecret , _appName, _appVersion ,
4         _isDataBufferUsing);
5     _eItf.Start ();
6 }
```

Il metodo "Start" inizializza la connessione al server Emotiv utilizzando le credenziali del client e configura il sistema per registrare i dati.

Nota: I parametri `_clientId` e `_clientSecret` sono forniti dall'utente e devono essere protetti.¹

Listato 4.2: Funzione onCreateSessionBtnClick()

```

1 public void onCreateSessionBtnClick ()
2 {
3     if (!_eItf.IsSessionCreated)
4     {
5         if (!string.IsNullOrEmpty(SessionTitle.text))
6         {
7             string sessionTitle = SessionTitle.text;
8             _eItf.CreateSessionWithHeadset(HeadsetId.text);
9         }
10    }
11 }
```

¹Questi parametri devono essere trattati come informazioni sensibili e protetti adeguatamente per garantire la sicurezza dell'applicazione.

Il metodo “onCreateSessionBtnClick()” consente di creare, monitorare e gestire una sessione associata al titolo e all’ID della cuffia. Questa funzione verifica che la sessione non sia già attiva.

Flusso: Input utente → Controllo sessione → Creazione sessione.

Listato 4.3: Funzione OnStartTest()

```

1 public void OnStartTest(string exerciseName)
2 {
3     if (_eItf.IsSessionCreated)
4     {
5         List<string> streamsToRecord = new List<string> { "met", "pow
6         " };
7         _eItf.SubscribeData(streamsToRecord);
8         _eItf.CreateFileWithSession(sessionTitle + '_' + exerciseName
9         , streamsToRecord);
10    }
11 }

```

Un elemento chiave è la capacità di sottoscrivere flussi di dati specifici, come Performance Metrics (met) e Power Bands (pow). Il metodo onStartTest() avvia la registrazione dei dati EEG durante un esercizio, salvandoli in file associati al nome della sessione e dell’esercizio.

Listato 4.4: Funzione OnEventRegister()

```

1 public void OnEventRegister(string exerciseName, string evento)
2 {
3     if (_eItf.IsSessionCreated)
4     {
5         string sessionTitle = GameManager.Instance.SessionTitle;
6         string path_name = sessionTitle + '_' + exerciseName;
7         _eItf.EventIntercepted(path_name, evento);
8     }
9 }

```

Il metodo “OnEventRegister()” viene invocato quando si verifica un evento specifico, solitamente legato a un esercizio, nell’applicazione. Viene utilizzato per registrare un evento durante la sessione corrente, permettendo al sistema di registrare o reagire a determinati eventi. Prima verifica se è stata creata una sessione (_eItf.IsSessionCreated), e, in caso positivo, costruisce un percorso per salvare l’evento combinando “sessionTitle” e “exerciseName” in una stringa di percorso (path_name).

Successivamente, viene chiamato il metodo _eItf.EventIntercepted() per gestire l’evento, passando il (path_name) e l’evento (“evento”).

Listato 4.5: Funzione OnEndTest()

```

1 public void OnEndTest()
2     {
3         if (_eItf.IsSessionCreated)
4         {
5             _eItf.DataSubLog = "";
6             _eItf.UnSubscribeData(GetStreamsList());
7         }
8     }

```

Il metodo “OnEndTest()” viene utilizzato quando il test o l’esercizio termina, ed è responsabile del “cleanup” e del termine dei flussi di dati relativi alla sessione o all’esercizio, verificando se la sessione sia ancora attiva (`_eItf.IsSessionCreated`), e pulendo in tal caso qualsiasi log di sottoscrizione dei dati impostando `_eItf.DataSubLog` su una stringa vuota. Successivamente, si disiscrive dai flussi di dati attivi (come ‘met’ e ‘pow’) chiamando `_eItf.UnSubscribeData()` e passando la lista dei flussi (`GetStreamsList()`).

Listato 4.6: Funzione OnReturnToMainMenu() e ResetUI()

```

1 public void OnReturnToMainMenu()
2     {
3         if (_eItf.IsSessionCreated)
4         {
5             ResetUI();
6         }
7     }
8
9     private void ResetUI()
10    {
11
12
13        Button createSessionBtn = GameObject.Find("SessionPart").
transform.Find("createSessionBtn").GetComponent<Button>();
14        createSessionBtn.interactable = true;
15
16
17        Button subscribeBtn_relax = GameObject.Find("Relax").
transform.Find("subscribeBtn_relax").GetComponent<Button>();
18        subscribeBtn_relax.interactable = false;
19
20        Button subscribeBtn_sart = GameObject.Find("Sustained
Attention to Response Task").transform.Find("subscribeBtn_sart").
GetComponent<Button>();
21        subscribeBtn_sart.interactable = false;
22
23        Button subscribeBtn_stroop = GameObject.Find("Stroop Color
and Word Test").transform.Find("subscribeBtn_stroop").GetComponent
<Button>();

```

```

24     subscribeBtn_stroop.interactable = false;
25
26     Button subscribeBtn_aritmetica = GameObject.Find("Quiz di
Aritmetica").transform.Find("subscribeBtn_aritmetica").
GetComponent<Button>();
27     subscribeBtn_aritmetica.interactable = false;
28
29     Button subscribeBtn_robot = GameObject.Find("Robot Test").
transform.Find("subscribeBtn_robot").GetComponent<Button>();
30     subscribeBtn_robot.interactable = false;
31
32 }

```

Il metodo “OnReturnToMainMenu()” viene chiamato quando l’utente sceglie di tornare al menu principale dell’applicazione dopo aver completato una sessione o un test, in modo da ripristinare gli elementi dell’interfaccia utente e preparare il sistema per una nuova sessione o azione, assicurando che l’interfaccia torni in uno stato in cui possa essere creata una nuova sessione o in cui l’utente possa interagire con altre opzioni del menu, concludendo di fatto le interazioni con l’interfaccia della sessione corrente.

4.3.2 La classe GameManager

La classe `GameManager` è progettata per gestire alcune funzionalità globali del gioco in Unity ed è pensata per essere sempre disponibile in qualsiasi momento durante l’esecuzione del gioco. Per fare questo, utilizza un concetto chiamato **Singleton**, che permette sia di avere una sola istanza di questa classe in tutto il gioco e quindi di poter ottenere l’istanza attuale del `GameManager` da qualsiasi parte del gioco, semplicemente usando `GameManager.Instance`.

Quando il gioco inizia e Unity carica l’oggetto che contiene questa classe, il metodo `Awake()` viene chiamato automaticamente. Questo metodo verifica se esiste già un’istanza di `GameManager`.

Grazie a `DontDestroyOnLoad`, il quale impedisce la distruzione dell’oggetto durante il cambio di scena, i dati rimangono disponibili anche passando da una scena all’altra. La classe ha due scopi principali:

1. **Memorizzare il titolo della sessione:** Attraverso la proprietà `SessionTitle` è possibile salvare e accedere al titolo della sessione attuale. Si tratta di una semplice stringa, utile per identificare la sessione avviata dal giocatore.
2. **Tenere traccia degli esercizi completati:**
 - Tramite il metodo `MarkExerciseCompleted(string exerciseName)`, usato per aggiungere il nome di un esercizio completato in un `(HashSet<string>`

completedExercises), viene controllato se un esercizio sia già stato completato o meno, assicurando che non ci siano duplicati.

- Tramite il metodo `IsExerciseCompleted(string exerciseName)`, il quale permette di verificare se un esercizio è già stato completato, restituendo `true` se l'esercizio è nell'insieme, altrimenti `false`.

4.3.3 Integrazione di MyDataRegister e GameManager agli script degli esercizi

Le classi "SARTTest", "StroopTest", "ArithmeticTest" e "RobotTest" estendono "MyDataRecorder" per integrare la registrazione dei dati EEG.

Vengono inizializzati:

EmotivUnityItf_eItf = EmotivUnityItf.Instance;

e

GameManager_gm = GameManager.Instance;

Listato 4.7: Funzione `OnStartTest()` dell'esercizio di Aritmetica.

```

1 public void StartTest ()
2     {
3     ...
4     OnStartTest ( " ArithmeticTest " );
5
6     }
```

Nella classe `StartTest()`

Listato 4.8: Funzione `CheckAnswer()`.

```

1 public void CheckAnswer ()
2     {
3     ...
4         if (userAnswer == correctAnswer)
5         {
6             ShowFeedback ( " Risposta giusta! " , Color.green );
7             correctAnswerCount++;
8         }
9         else
10        {
11            ShowFeedback ( " Risposta sbagliata! La risposta
12            corretta era " + correctAnswer , Color.red );
13            wrongAnswerCount++;
14            OnEventRegister ( " ArithmeticTest " , " Wrong " );
```

```

15     }
16   }
17   else
18   {
19     ShowFeedback( "Risposta non valida!", Color.red );
20     invalidAnswerCount++;
21     OnEventRegister( "ArithmeticTest", "Wrong" );
22   }
23   ...
24 }

```

Ogni risposta è classificata come corretta o errata, e un evento viene registrato tramite “OnEventRegister”.

Evento: Tipo di errore (es. Wrong, TooLate) viene registrato nel file dati.

Listato 4.9: Funzione EndQuiz().

```

1 void EndQuiz()
2 {
3     OnEndTest();
4     GameManager.Instance.MarkExerciseCompleted( "ArithmeticTest" );
5     ...
6     resultText.gameObject.SetActive(true);
7     ...
8     mainMenuButton.gameObject.SetActive(true);
9 }

```

Alla fine del test, la registrazione EEG termina, richiamando la funzione onEndTest(). Viene aggiunto l'esercizio nella lista degli esercizi completati in modo che non sia più cliccabile, vengono mostrati i risultati e viene infine reso visibile e cliccabile il mainMenuButton, in modo da poter tornare alla lista degli esercizi.

4.4 Esercizio di robotica collaborativa

Dopo aver raccolto i dati preliminari dell'utente e aver verificato una corrispondenza corretta tra il suo stato d'animo e i risultati graficati, viene introdotto l'esercizio di robotica collaborativa. L'esecuzione dell'esercizio di robotica collaborativa segue lo stesso iter dello svolgimento nello studio [57], in cui la sezione dedicata agli user test pone il focus sull'usabilità e sull'esperienza diretta degli utenti durante compiti di assemblaggio.

L'obiettivo dell'esercizio è simulare una collaborazione tra un individuo e un robot in un ambiente controllato, analizzando le dinamiche di interazione durante un compito di assemblaggio. L'esercizio mira a valutare il livello di comfort, attenzione e percezione del carico di lavoro del partecipante in diverse condizioni operative.

L'esercizio è suddiviso in tre modalità operative, progettate per esplorare differenti tipologie di interazione tra l'individuo e il robot:

Movimenti senza preavviso

In questa modalità, il robot si muove autonomamente per eseguire il suo compito senza fornire alcun avviso al partecipante prima di spostarsi. Questo scenario permette di:

- Osservare le reazioni del partecipante ai movimenti improvvisi e non segnalati del robot.
- Misurare il livello di attenzione e la capacità di adattamento del partecipante.

Movimenti con avviso sonoro

In questa modalità, il robot emette un segnale acustico specifico (es. un beep) prima di eseguire un movimento. L'obiettivo è:

- Valutare se l'avviso sonoro migliora il coordinamento e riduce durante l'interazione.
- Analizzare l'effetto dell'introduzione di un avviso sul livello di comfort del partecipante.

Movimenti con messaggio vocale

In questa modalità, il robot utilizza sia un messaggio vocale per segnalare il movimento imminente, che l'effetto sonoro. Il messaggio è: *"Il robot sta per muoversi"*.

L'obiettivo è:

- Esaminare se la comunicazione verbale migliora la comprensione delle intenzioni del robot.
- Valutare l'efficacia di informazioni dettagliate nel facilitare il completamento del compito.

4.4.1 Il Compito di Assemblaggio

Durante l'esercizio, il partecipante deve completare un compito di un semplice assemblaggio di una morsa, con l'aiuto del robot. Le funzioni del robot includono:

- Consegnare un pezzo al partecipante.

- Posizionare un componente in un'area specifica.

Il partecipante deve collaborare attivamente con il robot, completando la propria parte del compito.

4.4.2 Raccolta di Dati

Durante l'interazione, i dati verranno raccolti attraverso:

1. **Strumento MN8 e Insight:** Raccolta delle bande di potenza significative per misurare lo stato psicofisico del partecipante durante il compito.
2. **Questionari post-esercizio:** Valutazione del carico di lavoro percepito (fisico, mentale ed emotivo), con il NASA-TLX per ciascuna modalità operativa.
3. **Osservazioni dirette:** Registrazione delle reazioni del partecipante ai movimenti del robot, della rapidità nel rispondere e della fluidità dell'interazione.

Al termine dell'esercizio, verranno raccolti i feedback del partecipante su ciascuna modalità operativa, e saranno analizzati e paragonati insieme ai dati cerebrali raccolti, per determinare quale strategia di interazione risulta più efficace e confortevole.

4.5 Tracciamento dei Grafici

Il codice utilizzato per l'elaborazione, l'analisi e la visualizzazione dei dati EEG si concentra sulla stima degli stati cognitivi, come attenzione, stress e carico cognitivo, durante specifiche attività. Inizialmente, il codice carica i dati da file CSV e li sottopone a un processo di pulizia per gestire eventuali valori anomali (outlier). Successivamente, calcola una baseline di riferimento, definita come la mediana delle bande di potenza in un periodo di rilassamento, che funge da punto di partenza per le successive analisi. Le variazioni percentuali delle bande di potenza (Theta, Alpha, Beta bassa e Beta alta) vengono poi calcolate rispetto a questa baseline. Per migliorare l'affidabilità delle misurazioni e ridurre il rumore dei segnali EEG, viene applicato uno smoothing attraverso una finestra mobile.

Una volta ottenute le variazioni percentuali smussate, gli stati cognitivi vengono identificati utilizzando regole predefinite basate sui livelli di potenza nelle bande EEG, misurati su due elettrodi (T7 e T8). Questi livelli vengono mappati in categorie descrittive, come "Relaxed", "High Focus" (alta concentrazione) e "Mental Fatigue" (fatica mentale), che riflettono vari aspetti dell'attività cognitiva. Il codice, inoltre, permette di salvare i risultati ottenuti in un file CSV, facilitando l'archiviazione e la successiva analisi dei dati.

Per una comprensione visiva dell'andamento degli stati cognitivi durante il test, il codice genera grafici che rappresentano le variazioni nel tempo, con l'inclusione di eventi specifici, come errori o risposte tardive, che possono influenzare l'attenzione o lo stress. Questa capacità di visualizzare i dati offre una panoramica immediata dell'evoluzione dell'attenzione, dello stress e del carico cognitivo durante l'intero esperimento.

Le funzioni sono strutturate in maniera modulare, consentendo una facile applicazione a diversi utenti e test, e garantendo così un'analisi completa e personalizzabile.

4.5.1 Il metodo in dettaglio

Il metodo esegue i seguenti passaggi principali:

1. **Caricamento e Pulizia dei Dati:** Il codice carica i dati EEG da file CSV e pulisce eventuali anomalie nelle bande di potenza.
2. **Calcolo della Baseline e Variazione:** Viene calcolata una baseline per ciascuna banda di frequenza e viene misurata la variazione dei dati rispetto a questa baseline.
3. **Identificazione degli Stati Cognitivi:** In base alle variazioni rispetto alla baseline, vengono identificati e classificati gli stati cognitivi, come il carico cognitivo, lo stress e l'attenzione.
4. **Visualizzazione:** Vengono plottati i risultati degli stati cognitivi nel tempo per ogni banda di frequenza e per ciascun elettrodo (T7 e T8).

Con riferimento alla tabella 3.1 e agli approfondimenti consultabili nel paragrafo 3.1.1 del Capitolo 3, nello studio sono state considerate diverse bande di frequenza, che sono suddivise come segue:

1. **Banda Theta:** Frequenze tra 4-8 Hz.
 - **Associazione Cognitiva:** Viene generalmente associata a uno stato di rilassamento e riflessione. La presenza di alta potenza nella banda Theta è spesso correlata a stati di rilassamento profondo o sonno leggero.
 - **Ruolo nel Codice:** La banda Theta è utilizzata per calcolare il **carico cognitivo**, con valori più alti associati a un maggiore carico cognitivo.
2. **Banda Alpha:** Frequenze tra 8-13 Hz.
 - **Associazione Cognitiva:** La banda alpha è un indicatore di rilassamento e di stato di non attivazione mentale. La potenza alpha tende a diminuire con l'aumento dell'attività mentale.

- **Ruolo nel Codice:** Viene utilizzata per monitorare lo **stress**, con livelli più bassi di alpha indicativi di maggiore stress e il carico cognitivo.
3. **Banda Beta L (Beta Low):** Frequenze tra 13-20 Hz.
 - **Associazione Cognitiva:** La banda beta è associata a stati di concentrazione e attenzione attiva. La **Beta L** (Beta Lenta) è tipicamente correlata con il focus moderato.
 - **Ruolo nel Codice:** Utilizzata per analizzare la **concentrazione**. Un aumento della potenza in questa banda potrebbe indicare maggiore attenzione o sforzo cognitivo.
 4. **Banda Beta H (Beta High):** Frequenze tra 20-30 Hz.
 - **Associazione Cognitiva:** La Beta alta è legata a situazioni di tensione mentale, ansia o stress. Un aumento di questa banda è spesso associato a stati di forte attenzione o stress.
 - **Ruolo nel Codice:** Viene combinata con altre bande per monitorare lo **stress**. Una maggiore potenza in Beta H suggerisce stati di ansia o stress elevato.
 5. **Banda Gamma:** Frequenze oltre 30 Hz (anche se non direttamente utilizzata nel codice, può essere menzionata come informazione aggiuntiva). È associata con attività cognitivamente intensa, come l'elaborazione di informazioni complesse.

Funzioni principali in relazione alle bande di potenza

Calcolo della Baseline (Funzione `calculate_baseline`)

La funzione `calculate_baseline` calcola la **mediana** dei valori delle bande di potenza per ciascun elettrodo (T7 e T8) in ciascuna delle bande di frequenza: Theta, Alpha, Beta L, Beta H. Questa mediana rappresenta un valore di riferimento, una baseline che sarà utilizzata per calcolare la **variazione** dei segnali EEG durante l'esercizio.

Calcolo delle Variazioni (Funzione `calculate_variation`)

La funzione `calculate_variation` calcola la variazione percentuale dei valori delle bande di potenza rispetto alla baseline. La variazione viene poi utilizzata per classificare i dati in base agli **stati cognitivi**.

Identificazione degli Stati Cognitivi (Funzione `identify_cognitive_load`)

Gli stati cognitivi sono identificati in base alla variazione percentuale di ciascuna banda di potenza rispetto alla baseline. Gli stati cognitivi sono classificati in quattro categorie principali per ogni banda:

- **Theta:** Associa valori bassi a uno stato di **rilassamento** e valori alti a un **carico cognitivo elevato**.
- **Alpha:** Associa valori bassi a uno stato di **stress elevato** e valori alti a uno stato di **rilassamento**.
- **Beta L:** Viene utilizzata per definire lo stato di **concentrazione**, con valori bassi associati a uno stato di **bassa concentrazione** e valori alti a **concentrazione intensa**.
- **Beta H:** Relazionata con **stress elevato** o **ansia**.

Smoothing dei Dati (Funzione `smooth_data`)

Una volta calcolate le variazioni, i dati vengono **smussati** utilizzando una finestra mobile (`window_size=5`). Questo serve a ridurre il rumore e ottenere un segnale più fluido.

Plottaggio dei Dati (Funzione `plot_smooth_cognitive_states`)

La funzione di plottaggio visualizza gli stati cognitivi per ciascuna banda di frequenza, separando l'analisi in tre categorie principali:

- **Attenzione:** Utilizza le bande **Beta L** e **Beta H**.
- **Stress:** Usa le bande **Alpha** e **Beta H**.
- **Carico Cognitivo:** Utilizza la **Banda Theta** e **Alpha**, considerando con peso maggiore Theta rispetto ad Alpha, visto quanto considerato nell'approfondimento 3.1.1.

Ogni stato cognitivo (ad esempio, "Relaxed", "Moderate Focus", "High Cognitive Load", etc.) è visualizzato in un grafico temporale, che mostra l'evoluzione degli stati cognitivi durante il test.

Le bande di potenza vengono utilizzate per analizzare tre aspetti principali della cognizione:

- **Attenzione:** Monitorata principalmente tramite le bande Beta L (Beta Lenta) e Beta H (Beta Alta).
- **Stress:** Calcolato utilizzando le bande Alpha e Beta H.
- **Carico Cognitivo:** Derivato principalmente dalle bande Theta e Alpha, che forniscono un'indicazione del livello di attenzione e stress mentale.

Ogni banda di potenza fornisce un insight sullo stato cognitivo del soggetto, e la combinazione di queste bande permette una valutazione completa delle diverse dimensioni cognitive (attività mentale, stress, focus).

4.5.2 Analisi EEG con TLI, Engagement Index e Beta/Alpha Ratio

Sono state considerate anche le metriche cognitive:

- **TLI (Theta/Alpha Ratio)**: Indicatore di carico cognitivo 3.1.1.
- **Engagement Index (Beta / (Alpha + Theta))**: Misura del coinvolgimento cognitivo 3.1.1.
- **Beta/Alpha Ratio**: Indicatore di stress e attivazione mentale.

La pipeline elabora dati raccolti durante sessioni di relax e compiti (task), calcola variazioni rispetto a una baseline e identifica stati cognitivi. Include anche una visualizzazione grafica con sovrapposizione di eventi significativi.

La funzione `calculate_tli_and_engagement_and_beta_alpha_baseline()` calcola le seguenti metriche per i canali T7 e T8.

La funzione `calculate_tli_and_engagement_and_beta_alpha_variation()` calcola le variazioni delle metriche durante il task rispetto ai valori medi della sessione di relax (`baseline`). La funzione

`identify_cognitive_load_with_tli_engagement_and_beta_alpha()` assegna uno stato cognitivo a ciascuna metrica, utilizzando soglie configurabili:

- **TLI**: *Low Engagement, Moderate Engagement, High Engagement, Cognitive Overload.*
- **Beta/Alpha**: *Low Focus, Moderate Focus, High Focus, Intense Focus.*
- **Engagement Index**: *Relaxed, Focused, Hyper Engagement.*

La funzione `process_eeg_data_and_save_TLI_EI_BA()`, infine, esegue i seguenti passi:

1. Carica i dati EEG delle sessioni di relax e task.
2. Calcola la baseline sui dati di relax.
3. Calcola variazioni delle metriche rispetto alla baseline.
4. Identifica gli stati cognitivi per ciascuna metrica.
5. Salva i risultati in formato CSV.
6. Genera grafici per l'analisi visiva.

Capitolo 5

Validazione

5.1 Procedura

La procedura seguita nei test è la seguente:

1. **Benvenuto e introduzione:** L'utente viene accolto e introdotto al contesto e agli obiettivi del test. L'obiettivo principale è comprendere come le persone reagiscono all'interazione con un robot collaborativo, sia quando l'aiuto fornito dal robot è segnalato in anticipo, sia quando non lo è. L'utente viene rassicurato sul fatto che l'intera esperienza sarà guidata, con istruzioni chiare per ogni fase del test, e che sarà supportato in ogni momento per garantire un'esperienza serena e positiva.
2. **Questionario preliminare:** Il test inizia con una breve raccolta di informazioni personali, come l'età, il livello di studio e una verifica di eventuali condizioni di salute che potrebbero influenzare i risultati. Queste domande servono a contestualizzare i dati raccolti. Le risposte sono completamente anonime e l'utente può interrompere il test in qualsiasi momento se non si sente a proprio agio.
3. **Fase di rilassamento:** Prima di iniziare le attività, l'utente viene invitato a sedersi comodamente e a chiudere gli occhi mentre ascolta suoni rilassanti della natura. Questa fase serve a stabilire un punto di riferimento del suo stato di calma, utile per confrontare i livelli di attenzione e stress che potrebbero emergere durante i compiti successivi.
4. **Esercizi cognitivi:** All'utente vengono proposti tre brevi esercizi progettati per stimolare il livello di attenzione e coinvolgimento:

- **Lettura sfidante di parole:** all'utente viene mostrata una serie di parole o frasi con caratteristiche particolari (ad esempio, colori o formati inusuali) che richiedono uno sforzo cognitivo per essere lette correttamente.
 - **Esercizio di attenzione:** all'utente vengono presentati stimoli visivi o sonori. L'utente deve reagire solo a quelli corretti e ignorare gli altri, per misurare la capacità di concentrazione.
 - **Calcoli matematici semplici:** vengono proposte operazioni aritmetiche di base per valutare la capacità di concentrazione sotto pressione.
5. **Interazione con il robot collaborativo:** Questa è la parte principale del test. All'utente viene richiesto di lavorare con un robot per completare un compito di assemblaggio. L'interazione è suddivisa in tre modalità:
- **Movimenti senza preavviso:** Il robot si muove autonomamente, senza fornire alcun segnale preventivo.
 - **Movimenti con avviso sonoro:** Il robot emette un suono specifico per anticipare i suoi movimenti.
 - **Movimenti con messaggio vocale:** Il robot utilizza un messaggio vocale per spiegare il movimento imminente, ad esempio indicando dove si sposterà o quale azione eseguirà.
- Queste modalità permettono di valutare come cambia la percezione dell'utente nei confronti del robot e la sua efficacia nel completare il compito in base al tipo di segnale ricevuto.
6. **Questionario finale:** Al termine del compito di assemblaggio, all'utente viene richiesto di compilare un breve questionario per misurare il carico di lavoro percepito, utilizzando una scala standardizzata come il NASA-TLX in 5.1. Questo strumento consente di confrontare lo stato mentale e fisico dell'utente durante le diverse modalità operative, per determinare quale interazione è risultata più confortevole e intuitiva.
7. **Conclusione e feedback:** L'utente ha la possibilità di porre domande o condividere le proprie impressioni. Se richiesto, vengono discussi brevemente i risultati preliminari. Il contributo dell'utente è considerato fondamentale per migliorare l'efficacia e l'usabilità dei robot collaborativi.

5.2 Test e Risultati

Sono stati effettuati dei test controllati seguendo la procedura precedentemente descritta (5.1). I risultati ottenuti evidenziano una diminuzione della potenza delle

Tabella 5.1: NASA TLX Rating Table

Dimension	Description
Mental Demand	How mentally demanding was the task?
Physical Demand	How physically demanding was the task?
Temporal Demand	How hurried or rushed was the pace of the task?
Performance	How successful were you in accomplishing what you were asked to do?
Effort	How hard did you have to work to accomplish your level of performance?
Frustration	How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

bande associate agli stati di stress elevato, fatica mentale, tra il primo scenario corrispondente all'esercizio di robotica collaborativa senza segnalazione audio e con una segnalazione (5).

Di seguito verranno forniti alcuni esempi per gli esercizi preliminari e per quelli di robotica collaborativa.

I grafici mostrano i **livelli cognitivi** in base a diverse bande di potenza cerebrale misurate (*BetaL*, *BetaH*, *Alpha*, *Theta*) e combinate per identificare i livelli di attenzione, stress e carico cognitivo durante un determinato periodo di tempo.

Attenzione (BetaL e BetaH Bands)

- **Descrizione:** Rappresenta i livelli di attenzione basati sulle bande BetaL (bassa frequenza beta) e BetaH (alta frequenza beta).
- **Livelli:**
 - *High Cognitive Load/Anxiety*: Alti livelli di carico cognitivo o ansia.
 - *Moderate Stress/Focus*: Stress moderato o attenzione focalizzata.
 - *Low Effort/Focus*: Basso sforzo o concentrazione.
 - *Relaxed/Calm*: Stato rilassato e calmo.

Stress (Alpha e BetaH Bands)

- **Descrizione:** Misura dello stress utilizzando le bande Alpha e BetaH.
- **Livelli:**
 - *High Cognitive Load/Anxiety*: Indica stress o ansia elevata.

- *Moderate Stress/Focus*: Stress moderato.
- *Low Effort/Focus*: Minore livello di sforzo.
- *Relaxed/Calm*: Rilassamento.

Carico Cognitivo (Theta Band)

- **Descrizione:** Rappresenta il carico cognitivo basato sulla banda Theta.
- **Livelli:**
 - *High Cognitive Load/Anxiety*: Alti livelli di carico cognitivo o ansia.
 - *Moderate Stress/Focus*: Focalizzazione e stress moderati.
 - *Low Effort/Focus*: Minore impegno cognitivo.
 - *Relaxed/Calm*: Calma o stato di rilassamento.

Marcatori Temporal

- **Linee Verticali tratteggiate Blu (TooLate):** eventi in cui la risposta era troppo lenta.
- **Linee Verticali tratteggiate Rosse (Wrong):** errori commessi.

I grafici di seguito analizzano le risposte cognitive durante il **SART - Sustained Attention to Response Task**. Le bande combinano segnali da diversi elettrodi (*T7*, *T8*) per offrire un quadro del comportamento cerebrale. Durante periodi di alta attenzione o stress (es. errori o risposte lente), si osservano picchi nei segnali, mentre in momenti di calma il grafico si appiattisce.

Esercizio SART

Nel grafico 5.2 si osservano picchi di attenzione significativi tra i minuti **18:58** e **18:59**, corrispondenti a situazioni ad alta attenzione. Tra i momenti di bassa attività, si alternano intervalli di attenzione bassa e rilassamento.

Si nota un aumento evidente dello stress verso i minuti **18:58-19:00**, suggerendo un compito o una situazione stressante in quel momento, in seguito ad errori ripetuti. Si nota un ritorno graduale a livelli di calma verso la fine dell'esercizio.

Picchi evidenti di carico cognitivo tra **18:56-18:58**, con una fluttuazione tra un carico moderato ed elevato. Segue un progressivo calo, che indica un possibile rilassamento dovuto completamento del compito.

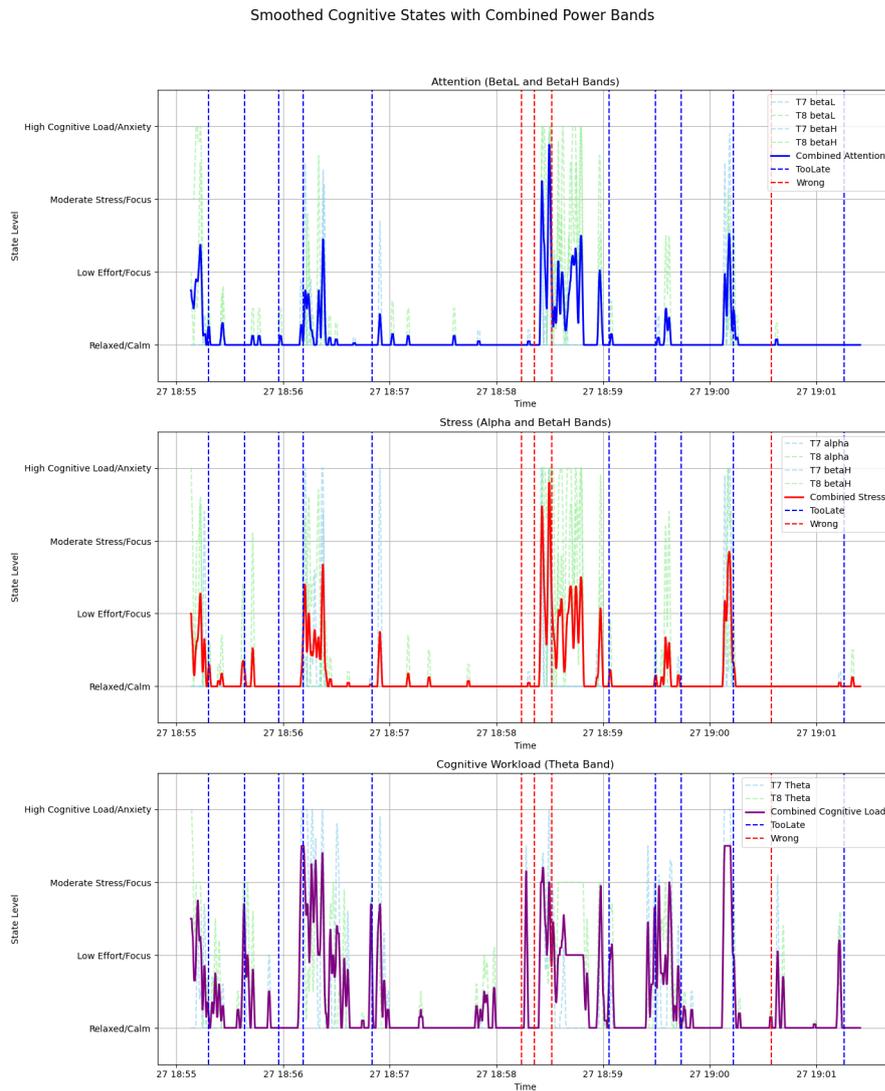


Figura 5.1: Esercizio di Sustained Attention To Response Task.

Esercizio Stroop

Nel grafico 5.2 si osserva un picco di attenzione significativo al minuto **10:00**, dovuto agli errori consecutivi all'inizio del task e dei picchi meno pronunciati dal minuto **10:35** in poi, corrispondenti all'errore successivo.

Si nota uno stress in aumento evidente nei primi minuti, da **09:45** a **10:05**, suggerendo una situazione stressante, in seguito agli errori ripetuti. Si nota un ritorno graduale a livelli di calma verso la fine dell'esercizio, con qualche picco successivi in seguito all'errore. L'ultima risposta tardiva, non sembra aver causato

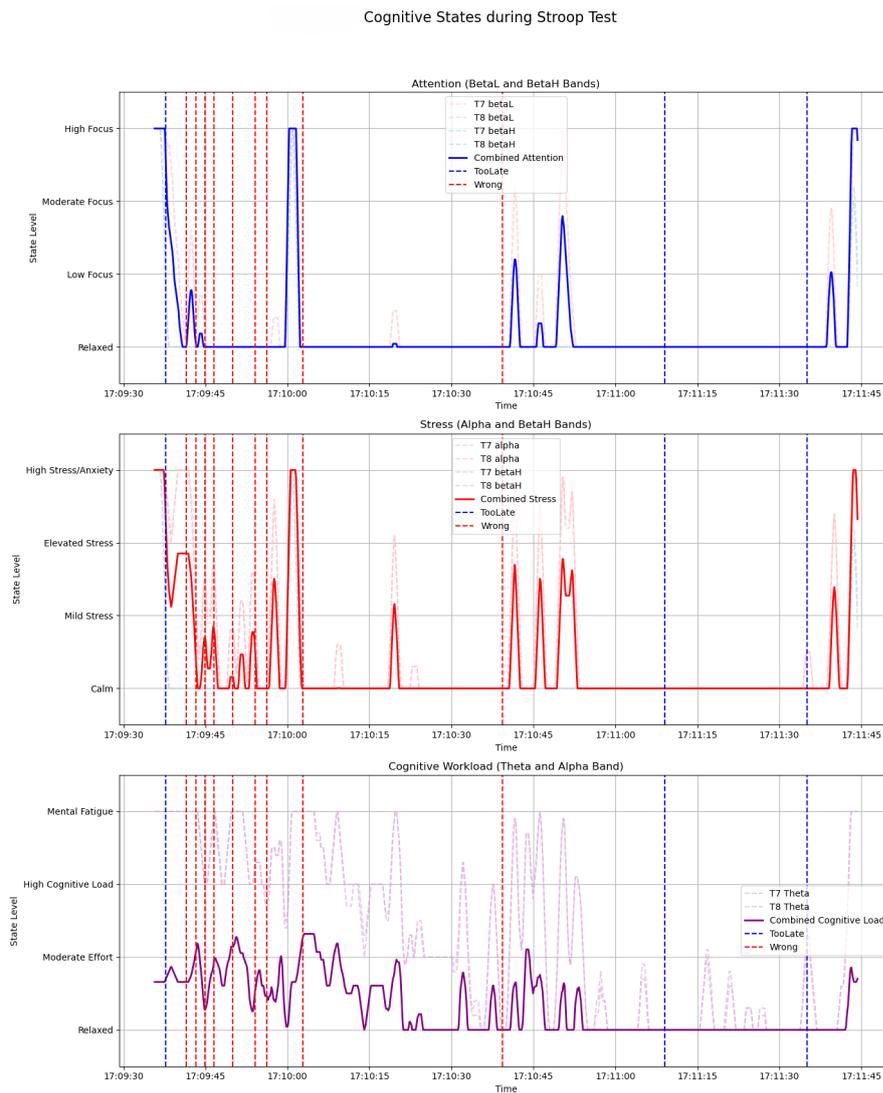


Figura 5.2: Esercizio di Stroop Word Color Test.

particolare stress.

Il carico cognitivo rimane moderato per quasi tutto l'esercizio. Segue un progressivo calo, che indica un possibile rilassamento dovuto al completamento del compito.

Esercizio Aritmetica

Nel grafico 5.3 si possono notare dei picchi continui di attenzione, dovuti alla costante attenzione che bisogna prestare durante un esercizio che prevede calcoli consecutivi.

Smoothed Cognitive States during Arithmetic Test

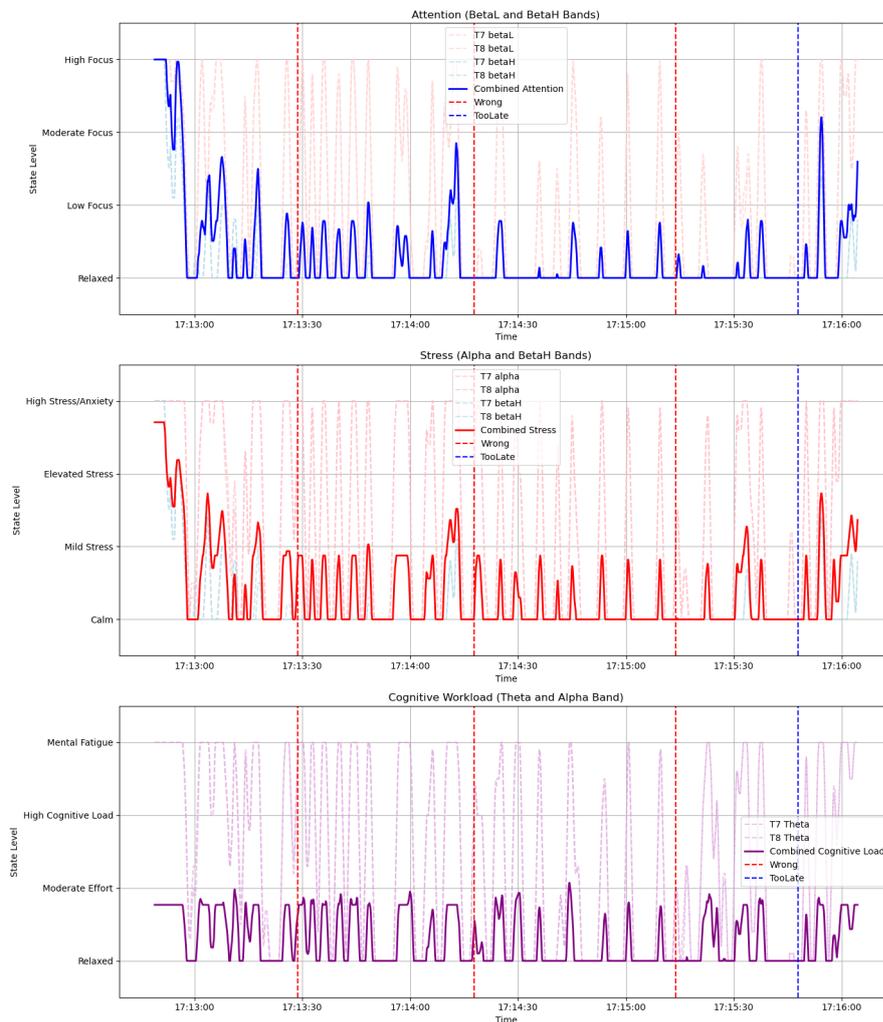


Figura 5.3: Esercizio di Aritmetica.

Anche un lieve stress è mantenuto durante il corso di tutto l'esercizio, suggerendo una situazione di eustress dovuto al ragionamento nei calcoli. I secondi precedenti all'errore tra il minuto 14:00 e 14:30 ha causato un aumento sia di attenzione che di stress, verosimilmente attribuibili ad un ragionamento più intensivo in una corrispondenza di calcolo più complicato e difficile da risolvere.

Il carico cognitivo rimane moderato per quasi tutto l'esercizio.

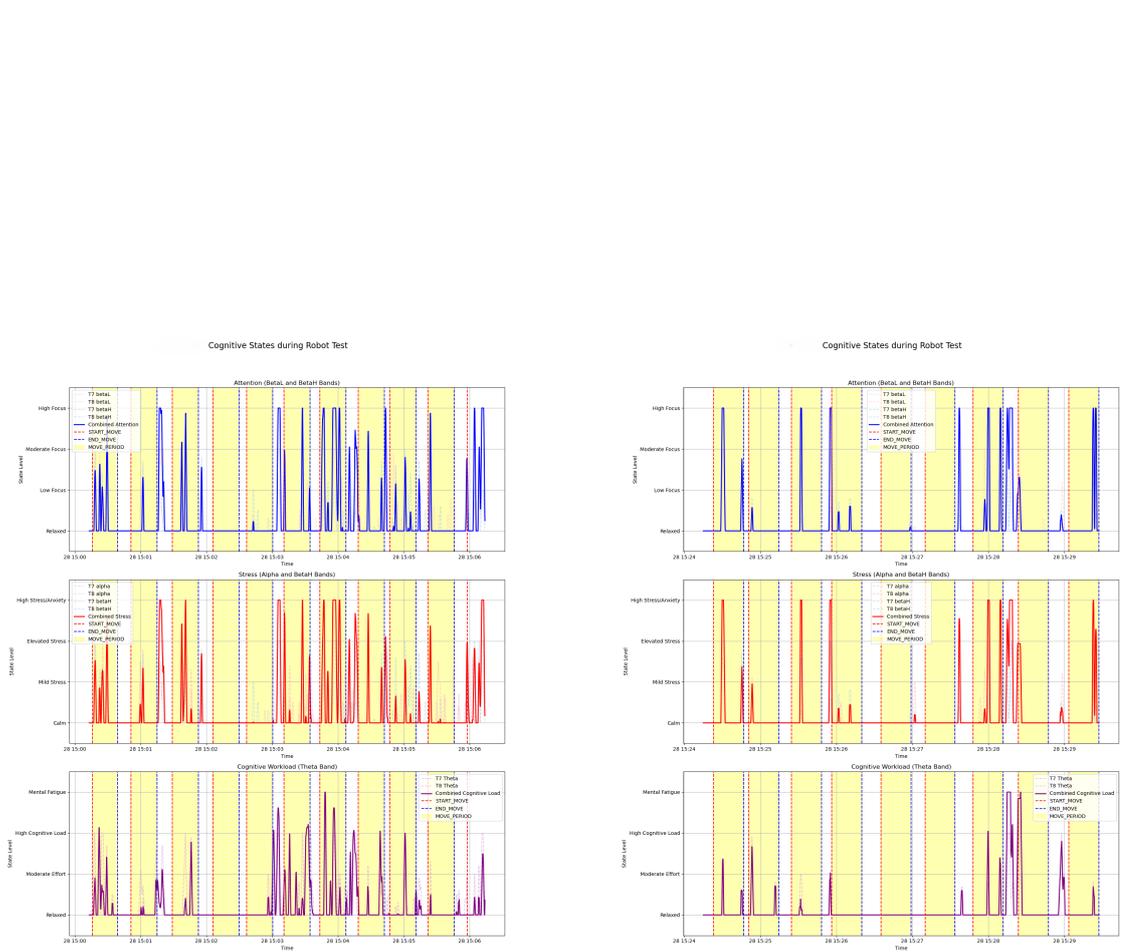


Figura 5.4: Confronto tra esercizi di robotica collaborativa con e senza segnalazione acustica (Utente 1).

Esercizio di Robotica Collaborativa

I marcatori temporali nel caso dell'esercizio di robotica collaborativa sono:

- **START_MOVE** (linea blu tratteggiata)
- **END_MOVE** (linea rossa tratteggiata)
- **MOVE_PERIOD** (zona gialla).

Utente 1

Paragonando i due grafici 5.4, relativi all'Utente 1, possiamo notare come tutte e tre le misure di attenzione, stress e carico cognitivo siano differenti:

- La **prima casistica**, ovvero quella che prevede l'esercizio di robotica collaborativa senza segnalazione del movimento del braccio robotico, mostra maggiore variabilità degli stati cognitivi, con attenzione intermittente e tendenzialmente elevata, stress elevato e carico cognitivo molto variabile.
- La **seconda casistica**, con la dovuta segnalazione degli eventi di inizio del movimento del robot, riflette uno scenario più controllato e stabile, con attenzione sostenuta, stress inferiore e carico cognitivo ridotto, probabilmente indicativo di un miglior adattamento.

Nel primo caso l'attenzione subisce fluttuazioni rapide tra **alta attenzione** e stati di **bassa attenzione**, mentre nel secondo caso, l'attenzione è più stabile, con periodi di **alta attenzione** più prolungati e meno transizioni nette tra gli stati attentivi.

Lo stress è caratterizzato da picchi frequenti e intensi, con numerosi momenti di **stress elevato** nel primo esercizio. Mentre nella seconda casistica lo stress è meno intenso, con prevalenza di stati di **calma** o **stress lieve**.

Il carico cognitivo varia frequentemente nel primo caso, con diversi momenti di **carico elevato** e alcuni episodi di **fatica mentale**, mostrando un impegno cognitivo intenso e instabile. Nel secondo caso, il carico cognitivo è meno intenso, prevalentemente concentrato su **sforzi moderati**.

Utente 2

Paragonando i due grafici 5.5, relativi all'Utente 2, possiamo osservare come, anche in questo caso, tutte e tre le misure di attenzione, stress e carico cognitivo presentino differenze significative:

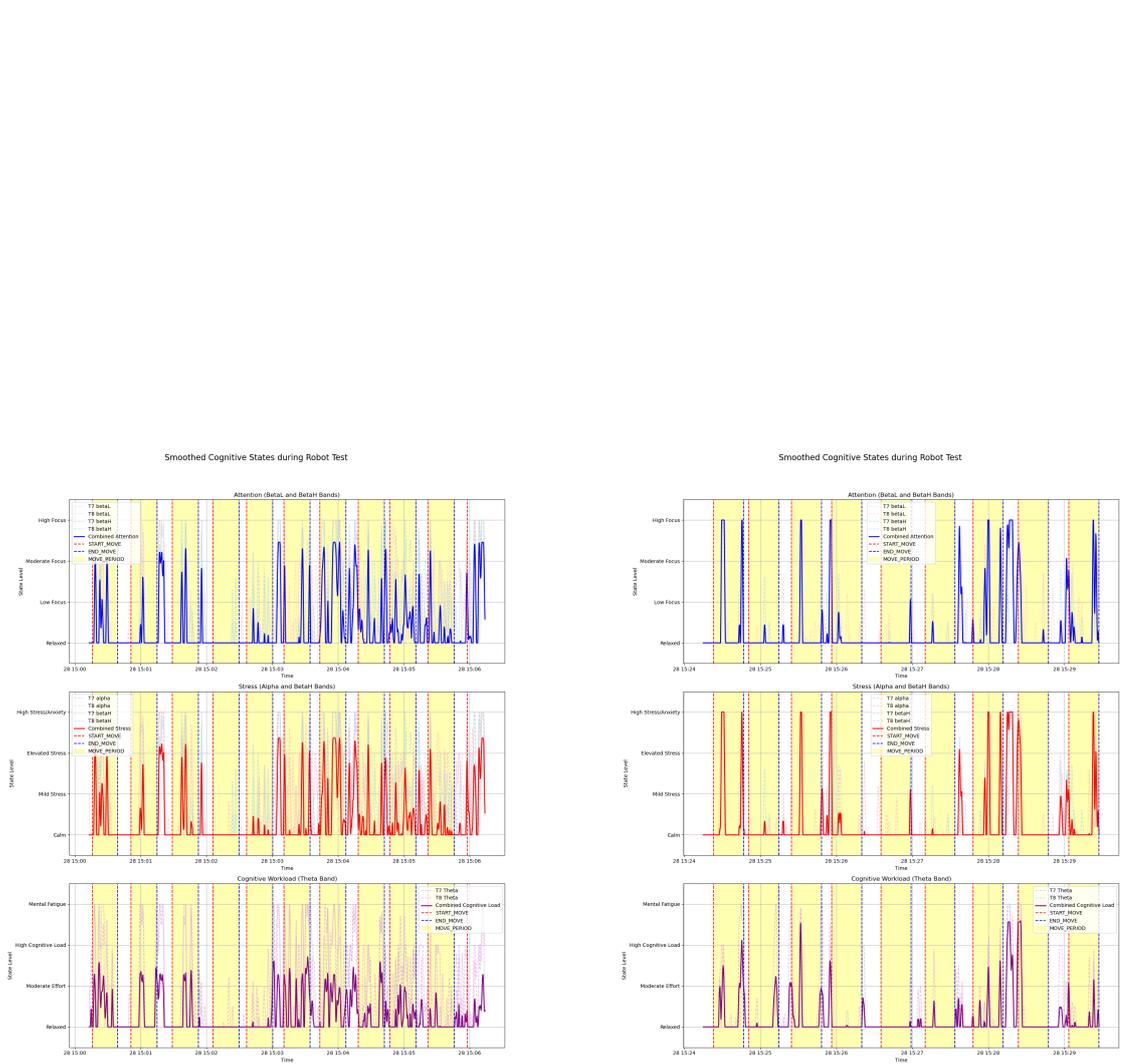


Figura 5.5: Confronto tra esercizi di robotica collaborativa con e senza segnalazione acustica (Utente 2).

- La **prima situazione**, ovvero quella in cui l'esercizio di robotica collaborativa è svolto senza segnalazione del movimento del braccio robotico, evidenzia una maggiore instabilità degli stati cognitivi, con attenzione discontinua, livelli elevati di stress e carico cognitivo variabile.
- La **seconda situazione**, in cui viene fornita una segnalazione acustica per gli eventi di inizio del movimento del robot, mostra uno scenario più equilibrato, con attenzione mantenuta nel tempo, livelli di stress contenuti e carico cognitivo moderato, suggerendo una migliore capacità di adattamento.

Nella prima situazione, l'attenzione oscilla frequentemente tra stati di **alta concentrazione** e momenti di **disattenzione**, mentre nella seconda situazione l'attenzione risulta più costante, con periodi prolungati di **alta concentrazione** e meno variazioni brusche tra gli stati attentivi.

Lo stress nella prima casistica è caratterizzato da frequenti e intensi picchi, con diversi momenti di **stress elevato**. Al contrario, nella seconda situazione, lo stress risulta meno pronunciato, con prevalenza di stati di **rilassamento** o **stress lieve**. Il carico cognitivo nella prima situazione mostra variazioni considerevoli, con episodi di **carico intenso** e momenti di **affaticamento mentale**, segnalando un impegno cognitivo impegnativo e irregolare. Nella seconda casistica, invece, il carico cognitivo appare più gestibile, con sforzi prevalentemente **moderati** e una maggiore continuità.

Capitolo 6

Conclusione

Questo lavoro di tesi ha approfondito l'interazione tra esseri umani e robot nel contesto della robotica collaborativa, concentrandosi sull'analisi dello stress e del carico cognitivo degli utenti tramite dispositivi Brain-Computer Interface (BCI). L'obiettivo principale era indagare come l'integrazione tra BCI e realtà aumentata possa migliorare l'esperienza degli utenti, riducendo incertezza e stress durante l'interazione con sistemi robotici. I risultati ottenuti aprono nuove prospettive nella progettazione di ambienti collaborativi più intuitivi, sicuri ed efficienti.

Gli esperimenti hanno evidenziato come l'utilizzo dei dispositivi Emotiv (MN8 e Insight) e di segnali anticipatori per comunicare le intenzioni del robot possano ridurre significativamente il carico cognitivo e lo stress percepito dagli utenti. Le analisi EEG e i questionari soggettivi hanno confermato che questi approcci migliorano sia la comunicazione uomo-robot sia la soddisfazione degli utenti, contribuendo a ottimizzare le interazioni e la performance complessiva nei contesti collaborativi.

La letteratura e i dati sperimentali confermano l'importanza della BCI passiva come strumento per monitorare in tempo reale le condizioni cognitive degli operatori, con applicazioni che spaziano dal lavoro alla sicurezza, dalla sanità al gaming. Queste tecnologie, integrando realtà aumentata, si rivelano particolarmente versatili e adatte a migliorare l'interazione con i cobot, offrendo soluzioni promettenti per migliorare sia la comunicazione che la sicurezza nei sistemi collaborativi.

Inoltre, lo studio ha dimostrato che l'utilizzo combinato di BCI e AR favorisce una maggiore comprensione delle intenzioni robotiche, migliorando non solo l'efficienza dei processi, ma anche il benessere degli operatori. Questo lavoro rappresenta un passo concreto verso l'integrazione di tecnologie avanzate come il monitoraggio EEG e gli strumenti AR, con l'obiettivo di rendere l'interazione uomo-robot più naturale, efficace e confortevole.

Limiti e Sviluppi Futuri

Nonostante i risultati incoraggianti, lo studio presenta alcune limitazioni. La dimensione del campione sperimentale, sebbene adeguata per il contesto, è relativamente contenuta, limitando la generalizzabilità dei risultati. Inoltre, il contesto sperimentale controllato non riflette pienamente le complessità operative di scenari reali. Infine, l'uso di dispositivi BCI commerciali come Emotiv MN8 e Insight, pur fornendo dati affidabili, comporta compromessi in termini di precisione rispetto a soluzioni EEG professionali, che potrebbero migliorare ulteriormente l'accuratezza delle misurazioni.

Sulla base di queste osservazioni, si delineano diverse opportunità per futuri approfondimenti:

- **Espansione del campione:** coinvolgere un numero maggiore di partecipanti con profili eterogenei per aumentare la rappresentatività dei dati raccolti.
- **Miglioramento delle tecnologie:** la dipendenza dei dati raccolti dai dispositivi commerciali Emotiv, sebbene affidabili e adatti all'utilizzo quotidiano, implica compromessi in termini di precisione rispetto a soluzioni EEG professionali e potrebbe essere migliorata integrando altre tecnologie più robuste e che forniscano più livelli di misurazione.
- **Analisi in tempo reale:** integrare una soluzione che possa analizzare in tempo reale gli stati cognitivi dell'utente così da modulare e personalizzare i movimenti del braccio robotico.
- **Scenari sperimentali complessi:** testare interazioni e situazioni operative più dinamiche per valutare le variazioni cognitive in contesti più realistici.
- **Integrazione di AR visiva:** sviluppare sistemi che utilizzino la realtà aumentata visiva e per rendere la comunicazione uomo-robot più adattiva e predittiva.
- **Applicazioni trasversali:** esplorare l'uso combinato di BCI e robotica collaborativa in settori come l'assistenza sanitaria personalizzata e la formazione immersiva.

L'evoluzione delle tecnologie BCI e robotiche promette di trasformare radicalmente l'interazione tra esseri umani e macchine. Questa ricerca rappresenta un passo importante verso sistemi collaborativi che si adattano in modo dinamico alle esigenze cognitive ed emotive degli utenti, garantendo al contempo sicurezza ed efficienza. L'adozione di queste tecnologie nei processi industriali, medici e quotidiani non solo aumenterà la produttività, ma contribuirà a creare un ecosistema tecnologico più umano e accessibile.

In conclusione, questo studio ha fornito risposte significative agli interrogativi iniziali, contribuendo alla comprensione e all'ottimizzazione delle interazioni uomo-robot. Le analisi e i risultati ottenuti rappresentano una base solida per sviluppi futuri e applicazioni innovative nel campo della robotica collaborativa e delle tecnologie cognitive, aprendo la strada a nuove soluzioni capaci di migliorare il benessere e l'efficienza degli utenti in diversi contesti.

Appendice A

Connessione Robot

Di seguito lo script Unity per interfacciarsi con un robot tramite una connessione socket TCP/IP.

Listato A.1: Script di collegamento tra l'applicazione Unity e il robot.

```
1
2 public class RobotTest : MyDataRecorder
3 {
4     ...
5
6     // Creazione connessione socket verso il robot
7     private TcpClient clientSocket;
8     private NetworkStream stream;
9     // Thread separato per gestire la comunicazione socket senza
10    bloccare il thread principale di Unity.
11    private Thread socketThread;
12
13    EmotivUnityItf _eItf = EmotivUnityItf.Instance;
14    GameManager _gm = GameManager.Instance;
15
16    void Start()
17    {
18        ...
19        // Avvio del thread per la comunicazione con il server e
20        poter leggere i messaggi.
21        socketThread = new Thread(SetupSocketConnection);
22        socketThread.IsBackground = true;
23        socketThread.Start();
24        ...
25    }
26    ...
27
```

```

28 void StartRobotTest ()
29 {
30     if (isV1)
31     {
32         OnStartTest ("RobotTestV1");
33     }
34     else if (isV2)
35     {
36         OnStartTest ("RobotTestV2");
37     }
38     else
39     {
40         OnStartTest ("RobotTestV0");
41     }
42
43     isStarted = true;
44
45     SendCommand("EMOTIV;START_TEST");
46 }
47
48
49 void SetupSocketConnection ()
50 {
51     try
52     {
53         clientSocket = new TcpClient("192.168.1.58", 8585);
54         stream = clientSocket.GetStream();
55
56         Debug.Log("Connesso al server socket");
57
58         while (true)
59         {
60             if (stream != null && stream.DataAvailable)
61             {
62                 byte [] buffer = new byte[1024];
63                 int bytesRead = stream.Read(buffer, 0, buffer.
64 Length);
65                 string serverMessage = Encoding.ASCII.GetString(
66 buffer, 0, bytesRead);
67
68                 Debug.Log("Messaggio ricevuto: " + serverMessage)
69 ;
70
71                 HandleRobotEvent(serverMessage);
72             }
73         }
74     }
75     catch (Exception e)
76     {
77

```

```

74         Debug.LogError("Errore socket: " + e.Message);
75     }
76 }
77
78 void SendCommand(string command)
79 {
80     try
81     {
82         if (stream != null && clientSocket.Connected)
83         {
84             byte[] data = Encoding.ASCII.GetBytes(command);
85             stream.Write(data, 0, data.Length);
86             Debug.Log("Comando inviato: " + command);
87         }
88     }
89     catch (Exception e)
90     {
91         Debug.LogError("Errore durante l'invio del comando: " + e
92 .Message);
93     }
94 }
95
96 void HandleRobotEvent(string eventMessage)
97 {
98     if (eventMessage.Contains("002"))
99     {
100         isMoving = true;
101         Debug.Log($"Evento registrato: {eventMessage}");
102         if (isV1)
103         {
104             OnEventRegister("RobotTestV1", "START_MOVE");
105         }
106         else if (isV2)
107         {
108             OnEventRegister("RobotTestV2", "START_MOVE");
109         }
110         else
111         {
112             OnEventRegister("RobotTestV0", "START_MOVE");
113         }
114     }
115     else if (eventMessage.Contains("003"))
116     {
117         Debug.Log($"Evento registrato: {eventMessage}");
118         if (isV1)
119         {
120             OnEventRegister("RobotTestV1", "END_MOVE");
121         }

```

```

122         else if (isV2)
123         {
124             OnEventRegister("RobotTestV2", "END_MOVE");
125         }
126         else
127         {
128             OnEventRegister("RobotTestV0", "END_MOVE");
129         }
130     }
131 }
132
133
134 new void OnReturnToMainMenu()
135 {
136     CloseSocketConnection();
137     SceneManager.LoadScene("MainMenu");
138 }
139
140 void CloseSocketConnection()
141 {
142     try
143     {
144         // Invio del comando END_TEST al robot
145         if (stream != null && clientSocket.Connected)
146         {
147             SendCommand("EMOTIV;END_TEST");
148         }
149
150         // Chiusura dello stream e del socket
151         if (stream != null) stream.Close();
152         if (clientSocket != null) clientSocket.Close();
153
154         Debug.Log("Connessione socket chiusa correttamente");
155     }
156     catch (Exception e)
157     {
158         Debug.LogError("Errore durante la chiusura della
159         connessione: " + e.Message);
160     }
161 }
162
163 private void OnApplicationQuit()
164 {
165     CloseSocketConnection();
166 }
167 }

```

Questo script Unity, denominato RobotTest, è progettato per gestire un test

interattivo con un robot tramite una connessione TCP/IP. Consente l'invio di comandi e la ricezione di risposte dal robot, gestendo un flusso di dati in tempo reale.

Socket TCP/IP

- **Client Socket (`clientSocket`):** Connessione al robot.
- **NetworkStream (`stream`):** Legge e scrive dati sulla connessione socket.

I comandi vengono inviati tramite socket al robot, mentre gli eventi che vengono presi dal robot dal robot vengono analizzati e gestiti.

Integrazione con Emotiv: Lo script si interfaccia con la piattaforma Emotiv per registrare eventi e gestire i dati del test tramite metodi come `OnEventRegister` e `OnEndTest`.

Funzioni principali

`Start()`:

- Configura l'interfaccia utente.
- Avvia il thread di comunicazione TCP con il robot (`SetupSocketConnection`).

`StartTest()`:

- Prepara l'interfaccia per il test, in base a che versione del test viene utilizzata.
- Invia un comando al robot per avviare il test (`EMOTIV;START_TEST`).
- Registra l'inizio del test tramite `OnStartTest()`.

`SetupSocketConnection()`:

- Crea una connessione TCP al robot.
- Legge continuamente i messaggi inviati dal robot:
 - Se un messaggio è disponibile, viene gestito da `HandleRobotEvent()`.

`SendCommand(string command)`: invia comandi al robot tramite la connessione socket.

`HandleRobotEvent(string eventMessage)`: gestisce gli eventi ricevuti dal robot:

- Se il messaggio contiene "002", segnala l'inizio del movimento e registra l'evento (`START_MOVE`).
- Se il messaggio contiene "003", segnala la fine del movimento e registra l'evento (`END_MOVE`).

- Gli eventi vengono registrati tramite `OnEventRegister()` in base alla versione dell'esercizio scelta.

`EndTest()`: termina il test.

- Registra la fine del test tramite `OnEndTest()`.
- Marca il test come completato nel `GameManager`.

`OnReturnToMainMenu()`: torna al menu principale e chiude la connessione socket.

`CloseSocketConnection()`

- Metodo progettato per chiudere correttamente la connessione socket TCP, garantendo che tutte le risorse associate vengano liberate e che il robot riceva un segnale di chiusura adeguato prima di terminare la comunicazione.
- Se la connessione socket è attiva (`stream != null` e `clientSocket.Connected`), viene inviato un comando `EMOTIV;END_TEST`.
- Viene verificato che lo stream (`stream`) e il socket client (`clientSocket`) non siano null.
- Se esistono, vengono chiusi utilizzando rispettivamente `stream.Close()` e `clientSocket.Close()`.
- In caso di successo, il metodo registra un messaggio di debug: "Connessione socket chiusa correttamente".

`OnApplicationQuit()`: chiude la connessione socket se l'applicazione viene chiusa.

Flusso di esecuzione dell'esercizio.

1. L'utente avvia lo script.
2. Viene mostrata l'interfaccia iniziale con opzioni per selezionare la versione del test e avviarlo.
3. Una volta avviato il test:
 - La connessione socket è attiva.
 - I comandi e gli eventi vengono scambiati in tempo reale con il robot.
 - Gli eventi significativi (inizio/fine movimento) vengono registrati.
4. Alla fine dell'esercizio l'utente può terminare il test o tornare al menu principale.
5. La connessione socket viene chiusa.

Bibliografia

- [1] *What Is the Virtuality Continuum? — updated 2024*. en. <https://www.interaction-design.org/literature/topics/virtuality-continuum>. Accessed: 2024-8-27. Gen. 2022 (cit. a p. 5).
- [2] K.G. Smitha, Ng Yu Xin, Seah Sze Lian e Neethu Robinson. «Classifying subjective emotional stress response evoked by multitasking using EEG». In: *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2017, pp. 3036–3041. DOI: 10.1109/SMC.2017.8123091 (cit. alle pp. 5, 48).
- [3] Seyyed Abed Hosseini e Mohammad Ali Khalilzadeh. «Emotional Stress Recognition System Using EEG and Psychophysiological Signals: Using New Labelling Process of EEG Signals in Emotional Stress State». In: *2010 International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science*. 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICBECS.2010.5462520 (cit. a p. 5).
- [4] Ssang Hee Seo e Jung-Tae Lee. «Stress and EEG». In: mar. 2010. ISBN: 978-953-307-068-1. DOI: 10.5772/9651 (cit. a p. 5).
- [5] Roxana Quintero-Manes, Camilo Vieira e Natalia Hernandez-Vargas. «Measuring Cognitive Loads while Learning Computational Statistics». In: *2022 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/FIE56618.2022.9962606 (cit. a p. 6).
- [6] Nina Minkley, Kate M. Xu e Moritz Krell. «Analyzing Relationships Between Causal and Assessment Factors of Cognitive Load: Associations Between Objective and Subjective Measures of Cognitive Load, Stress, Interest, and Self-Concept». In: *Frontiers in Education* 6 (2021). ISSN: 2504-284X. DOI: 10.3389/feduc.2021.632907. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2021.632907> (cit. alle pp. 6, 8).
- [7] Norah H. Alsuraykh, Max L. Wilson, Paul Tennent e Sarah Sharples. «How Stress and Mental Workload are Connected». In: *Proceedings of the 13th EAI International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*. PervasiveHealth'19. Trento, Italy: Association for Computing Machinery, 2019,

- pp. 371–376. ISBN: 9781450361262. DOI: 10.1145/3329189.3329235. URL: <https://doi.org/10.1145/3329189.3329235> (cit. alle pp. 6, 9).
- [8] Pavlo Antonenko, Fred Paas, Roland Grabner e Tamara van Gog. «Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load». In: *Educational Psychology Review* 22.4 (dic. 2010), pp. 425–438. ISSN: 1573-336X. DOI: 10.1007/s10648-010-9130-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y> (cit. a p. 8).
- [9] Mohammed Basheer Ahmed, Shamsah Alotaibi, Atta Rahman, Sujata Dash, Majed Nabil e Abdullah AlTurki. «A Review on Machine Learning Approaches in Identification of Pediatric Epilepsy». In: *SN Computer Science* 3 (ago. 2022). DOI: 10.1007/s42979-022-01358-9 (cit. a p. 8).
- [10] Emotiv. *Why Use EEG for Research?* Accessed: 2024-12-01. 2024. URL: <https://www.emotiv.com/blogs/news/why-use-eeeg-for-research> (cit. a p. 9).
- [11] Joy Lee, Nynke Jong, Jeroen Donkers, Halszka Jarodzka e Jeroen Merriënboer. «Measuring Cognitive Load in Virtual Reality Training via Pupillometry». In: *IEEE Transactions on Learning Technologies* PP (gen. 2023), pp. 1–7. DOI: 10.1109/TLT.2023.3326473 (cit. a p. 10).
- [12] P. Archana Hebbar, Sanjana Vinod, Aumkar Kishore Shah, Abhay A. Pashilkar e Pradipta Biswas. «Cognitive Load Estimation in VR Flight Simulator». In: *JOURNAL OF EYE MOVEMENT RESEARCH* 15.3, SI (2022). ISSN: 1995-8692. DOI: 10.16910/jemr.15.3.11 (cit. alle pp. 10, 12, 13).
- [13] Manne Hannula, Jukka Koskelo, Kerttu Huttunen, Martti Sorri e Tuomo Leino. «Artificial neural network analysis of heart rate under cognitive load in a flight simulator». In: *PROCEEDINGS OF THE IASTED INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND APPLICATIONS*. A cura di V Devedzic. IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, Innsbruck, AUSTRIA, FEB 12-14, 2007. Int Assoc Sci & Technol Dev. 2007, pp. 75+. ISBN: 978-0-88986-629-4 (cit. a p. 10).
- [14] Mohammad Ahmadi, Huidong Bai, Alex Chatburn, Burkhard Wuensche e Mark Billingham. «PlayMeBack - Cognitive Load Measurement using Different Physiological Cues in a VR Game». In: *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022. ISBN: 9781450398893. DOI: 10.1145/3562939.3565648. URL: <https://doi.org/10.1145/3562939.3565648> (cit. a p. 10).

- [15] R D Dias, M C Ngo-Howard, M T Boskovski, M A Zenati e S J Yule. «Systematic review of measurement tools to assess surgeons' intraoperative cognitive workload». In: *British Journal of Surgery* 105.5 (feb. 2018), pp. 491–501. ISSN: 0007-1323. DOI: 10.1002/bjs.10795. eprint: <https://academic.oup.com/bjs/article-pdf/105/5/491/36206722/bjs10795.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1002/bjs.10795> (cit. alle pp. 11, 12).
- [16] Gianluca Borghini, Laura Astolfi, Giovanni Vecchiato, Donatella Mattia e Fabio Babiloni. «Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness». In: *NEUROSCIENCE AND BIOBEHAVIORAL REVIEWS* 44.SI (lug. 2014), pp. 58–75. ISSN: 0149-7634. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2012.10.003 (cit. a p. 11).
- [17] K. Mohanavelu, S. Poonguzhali, D. Ravis, Pushpendar K. Singh, Mistu Mahajabin, K. Ramachandran, Upendra K. Singh e Srinivasan Jayarama. «Cognitive Workload Analysis of Fighter Aircraft Pilots in Flight Simulator Environment». In: *DEFENCE SCIENCE JOURNAL* 70.2 (mar. 2020), pp. 131–139. ISSN: 0011-748X. DOI: 10.14429/dsj.70.14539 (cit. alle pp. 12, 13).
- [18] Joni Lamsa et al. «Capturing cognitive load management during authentic virtual reality flight training with behavioural and physiological indicators». In: *JOURNAL OF COMPUTER ASSISTED LEARNING* 39.5 (ott. 2023), pp. 1553–1563. ISSN: 0266-4909. DOI: 10.1111/jcal.12817 (cit. a p. 13).
- [19] Faisal M. Alessa, Mohammed H. Alhaag, Ibrahim M. Al-harkan, Mustafa M. Nasr, Husam Kaid e Nacereddine Hammami. «Evaluating Physical Stress across Task Difficulty Levels in Augmented Reality-Assisted Industrial Maintenance». In: *APPLIED SCIENCES-BASEL* 14.1 (gen. 2024). DOI: 10.3390/app14010363 (cit. a p. 13).
- [20] Avinash Gupta, J. Cecil e Miguel Pirela-Cruz. «Role of Dynamic Affordance and Cognitive Load in the Design of Extended Reality based Simulation Environments for Surgical Contexts». In: *2022 IEEE CONFERENCE ON VIRTUAL REALITY AND 3D USER INTERFACES ABSTRACTS AND WORKSHOPS (VRW 2022)*. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR), ELECTR NETWORK, MAR 12-16, 2022. IEEE; IEEE Comp Soc; ChristchurchNZ; Virbela; Univ Canterbury; Immers Learning Res Network; Qualcomm; HIT Lab NZ, Appl Immers Gaming Initiat. 2022, pp. 643–644. ISBN: 978-1-6654-8402-2. DOI: 10.1109/VRW55335.2022.00177 (cit. a p. 14).

- [21] Priyadarsini Samal e Rajesh Singla. «EEG Based Stress Level Detection During Gameplay». In: *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/GCAT52182.2021.9587468 (cit. alle pp. 14, 51).
- [22] Shidhartho Roy, Monira Islam, Salah Uddin Yusuf e Nushrat Jahan. «EEG based stress analysis using rhythm specific spectral feature for video game play». In: *COMPUTERS IN BIOLOGY AND MEDICINE* 148 (set. 2022). ISSN: 0010-4825. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2022.105849 (cit. alle pp. 14, 15, 51).
- [23] EMOTIV. *Brain-Computer Interface Guide*. URL: <https://www.emotiv.com/blogs/glossary/brain-computer-interface-guide> (cit. alle pp. 15, 17).
- [24] Yunying Zhang. «Invasive BCI and Noninvasive BCI with VR/AR technology». In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, VIRTUAL REALITY, AND VISUALIZATION (AIVRV 2021)*. A cura di T Li e G Gao. Vol. 12153. Proceedings of SPIE. International Conference on Artificial Intelligence, Virtual Reality, and Visualization (AIVRV), Sanya, PEOPLES R CHINA, NOV 19-21, 2021. Xian Shiyu Univ; Guangzhou Comp Soc; Acad Exchange Informat Ctr. 2021. ISBN: 978-1-5106-5183-8; 978-1-5106-5182-1. DOI: 10.1117/12.2626640 (cit. a p. 15).
- [25] Kip Ludwig, Martin Emeritus, David Anderson e Michael Mayer. «NEUROPROSTHETIC DEVICES: INPUTS AND OUTPUTS». In: () (cit. a p. 16).
- [26] Ali Hossaini, Davide Valeriani, Chang Nam, Raffaele Ferrante e Mufti Mahmud. «A Functional BCI Model by the P2731 working group: Physiology». In: *Brain-Computer Interfaces* 8 (set. 2021), pp. 1–28. DOI: 10.1080/2326263X.2021.1968665 (cit. a p. 16).
- [27] Medikal.org. *Elettroencefalografi (EEG) Dispositivi*. Accessed: 2024-12-01. 2024. URL: <https://www.medikal.org/it/biyomedikal-cihazlar/biyomedikal-test-ve-olcum-cihazlari/elektroensefalograf-eeg-cihazlari/> (cit. a p. 17).
- [28] *Brain-Computer Interface per dispositivi indossabili: un alleato per lavoro, riabilitazione e formazione 4.0*. URL: <https://www.cirmis.unina.it/index.php/press/95-brain-computer-interface-per-dispositivi-indossabili-un-alleato-per-lavoro-riabilitazione-e-formazione-4-0> (cit. a p. 17).

- [29] Mahsa Bagheri e Sarah D. Power. «Simultaneous Classification of Both Mental Workload and Stress Level Suitable for an Online Passive Brain-Computer Interface». In: *SENSORS* 22.2 (gen. 2022). DOI: 10.3390/s22020535 (cit. alle pp. 17, 43, 44).
- [30] Nataliya Kosmyna e Pattie Maes. «Assessing internal, external and covert visuospatial attention in AR using brain sensing: a pilot study». In: *OPTICAL ARCHITECTURES FOR DISPLAYS AND SENSING IN AUGMENTED, VIRTUAL, AND MIXED REALITY (AR, VR, MR) III*. A cura di BC Kress e C Peroz. Vol. 11931. Proceedings of SPIE. Conference on Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) III, San Francisco, CA, JAN 23-25, 2022. SPIE. 2022. ISBN: 978-1-5106-4733-6; 978-1-5106-4732-9. DOI: 10.1117/12.2613493 (cit. alle pp. 18, 19, 49).
- [31] Zhengdong Zhou, Lingwei Zhang, Shisong Wei, Xuling Zhang e Mao Ling. «Development and evaluation of BCI for operating VR flight simulator based on desktop VR equipment». In: *ADVANCED ENGINEERING INFORMATION* 51 (gen. 2022). ISSN: 1474-0346. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101499 (cit. alle pp. 18, 19).
- [32] Bingyi Su, SeHee Jung, Lu Lu, Hanwen Wang, Liwei Qing e Xu Xu. «Exploring the impact of human-robot interaction on workers' mental stress in collaborative assembly tasks». In: *APPLIED ERGONOMICS* 116 (apr. 2024). ISSN: 0003-6870. DOI: 10.1016/j.apergo.2024.104224 (cit. a p. 20).
- [33] Lu Lu, Ziyang Xie, Hanwen Wang, Bingyi Su, Sehee Jung e Xu Xu. «Factors Affecting Workers' Mental Stress in Handover Activities During Human-Robot Collaboration». In: *HUMAN FACTORS* (2024 JAN 12 2024). ISSN: 0018-7208. DOI: 10.1177/00187208241226823 (cit. a p. 20).
- [34] Tommaso Panchetti, Luca Pietrantoni, Gabriele Puzzo, Luca Gualtieri e Federico Fraboni. «Assessing the Relationship between Cognitive Workload, Workstation Design, User Acceptance and Trust in Collaborative Robots». In: *APPLIED SCIENCES-BASEL* 13.3 (feb. 2023). DOI: 10.3390/app13031720 (cit. a p. 20).
- [35] Miguel A. Mariscal, Sergio Ortiz Barcina, Susana Garcia Herrero e Eva Maria Lopez Perea. «Working with collaborative robots and its influence on levels of working stress». In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING* (2023 OCT 2 2023). ISSN: 0951-192X. DOI: 10.1080/0951192X.2023.2263428 (cit. a p. 21).

- [36] Claudia Carissoli, Luca Negri, Marta Bassi, Fabio Alexander Storm e Antonella Delle Fave. «Mental workload and human-robot interaction in collaborative tasks: A scoping review». en. In: *Int. J. Hum. Comput. Interact.* (set. 2023), pp. 1–20 (cit. a p. 21).
- [37] Emotiv. *Electroencephalogram (EEG)*. Accessed: 2023-11-03. 2023. URL: <https://www.emotiv.com/blogs/glossary/electroencephalogram> (cit. a p. 23).
- [38] Gianluca Federici. «Analisi in frequenza del tracciato elettroencefalografico nell'epilessia tramite EEGLab. Frequency analysis of the electroencephalographic tracing in epilepsy through EEGLab». Correlatore: Marcantoni, Ilaria. Rapporto Finale. Anno Accademico 2019/2020: Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Ingegneria, 2020 (cit. alle pp. 23, 24, 28–31, 33).
- [39] Udeshika C. Dissanayake, Volker Steuber e Farshid Amirabdollahian. «EEG Spectral Feature Modulations Associated With Fatigue in Robot-Mediated Upper Limb Gross and Fine Motor Interactions». In: *Frontiers in Neurobotics* 15 (2022). ISSN: 1662-5218. DOI: 10.3389/fnbot.2021.788494. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neurobotics/articles/10.3389/fnbot.2021.788494> (cit. a p. 25).
- [40] Bujar Raufi e Luca Longo. «An Evaluation of the EEG Alpha-to-Theta and Theta-to-Alpha Band Ratios as Indexes of Mental Workload». In: *Frontiers in Neuroinformatics* 16 (2022). ISSN: 1662-5196. DOI: 10.3389/fninf.2022.861967. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroinformatics/articles/10.3389/fninf.2022.861967> (cit. a p. 25).
- [41] Raul Fernandez Rojas, Essam Debie, Justin Fidock, Michael Barlow, Kathryn Kasmarik, Sreenatha Anavatti, Matthew Garratt e Hussein Abbass. «Electroencephalographic Workload Indicators During Teleoperation of an Unmanned Aerial Vehicle Shepherding a Swarm of Unmanned Ground Vehicles in Contested Environments». In: *Frontiers in Neuroscience* 14 (2020). ISSN: 1662-453X. DOI: 10.3389/fnins.2020.00040. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2020.00040> (cit. a p. 25).
- [42] Sébastien Puma, Nadine Matton, Pierre-Vincent Paubel, Eric Raufaste e Radouane El-Yagoubi. «Using theta and alpha band power to assess cognitive workload in multitasking environments.» In: *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology* 123 (2018), pp. 111–120. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:205353645> (cit. a p. 26).

- [43] Raul Fernandez Rojas, Essam Debie, Justin Fidock, Michael Barlow, Kathryn Kasmarik, S.G. Anavatti, Matt Garratt e Hussein Abbass. «Electroencephalographic Workload Indicators During Teleoperation of an Unmanned Aerial Vehicle Shepherding a Swarm of Unmanned Ground Vehicles in Contested Environments». In: *Frontiers in Neuroscience* 14 (feb. 2020). DOI: 10.3389/fnins.2020.00040 (cit. a p. 26).
- [44] ScienceDirect. *Evoked Potential*. Accessed: 2024-11-03. n.d. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/psychology/evoked-potential> (cit. a p. 28).
- [45] Raphael Vallat. *Computing band power in Python*. 2024. URL: <https://raphaelvallat.com/bandpower.html> (cit. a p. 32).
- [46] Rolf-Magnus Hjørungdal, Filippo Sanfilippo, Ottar Osen, Adrian Rutle e Robin Bye. «A Game-Based Learning Framework For Controlling Brain-Actuated Wheelchairs». In: *mag*. 2016. DOI: 10.7148/2016-0554 (cit. a p. 33).
- [47] ScienceDirect. *Evoked Potential*. Accessed: 2024-11-03. n.d. URL: <https://www.emotiv.com/tools/knowledge-base/research-information/how-are-band-powers-calculated> (cit. a p. 35).
- [48] IEEE Foundation. *IEEE Foundation Memorial Fund*. Accessed: 2024-11-03. 2024. URL: <https://spectrum.ieee.org/neurotech-workplace-innereye-emotiv> (cit. alle pp. 35, 37).
- [49] Zabcikova, Martina. «Visual and Auditory Stimuli Response, Measured by Emotiv Insight Headset». In: *MATEC Web Conf.* 292 (2019), p. 01024. DOI: 10.1051/mateconf/201929201024. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929201024> (cit. a p. 38).
- [50] Emotiv. *Unity Plugin*. <https://github.com/Emotiv/unity-plugin>. Accessed: 2024-11-03. 2024 (cit. alle pp. 41, 42).
- [51] Priyanka Datta, Amanpreet Kaur, Najla Sassi, Yonis Gulzar e Wassim Jaziri. «An evaluation of intelligent and immersive digital applications in eliciting cognitive states in humans through the utilization of Emotiv Insight». In: *Methods X* 12 (giu. 2024). Accessed: 2024-11-03, p. 102748. DOI: 10.1016/j.mex.2024.102748. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102748> (cit. a p. 41).
- [52] Guo Jun e K. G. Smitha. «EEG based stress level identification». In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2016, pp. 003270–003274. DOI: 10.1109/SMC.2016.7844738 (cit. alle pp. 44, 46).

- [53] Mostafa Mohammadpour e Saeed Mozaffari. «Classification of EEG-based attention for brain computer interface». In: *2017 3rd Iranian Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ICSPIS)*. 2017, pp. 34–37. DOI: 10.1109/ICSPIS.2017.8311585 (cit. a p. 46).
- [54] Rossella Rizzo, Silvin P Knight, James R C Davis, Louise Newman, Eoin Duggan, Rose Anne Kenny e Roman Romero-Ortuno. «Longitudinal study on Sustained Attention to Response Task (SART): Clustering approach for mobility and cognitive decline». en. In: *Geriatrics (Basel)* 7.3 (apr. 2022), p. 51 (cit. a p. 47).
- [55] Muneeb Imtiaz Ahmad, Ingo Keller, David A. Robb e Katrin S. Lohan. «A framework to estimate cognitive load using physiological data». In: *Personal and Ubiquitous Computing* 27.6 (dic. 2023), pp. 2027–2041. ISSN: 1617-4917. DOI: 10.1007/s00779-020-01455-7. URL: <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01455-7> (cit. a p. 47).
- [56] Chunping Li, Soonja Yeom, Julian Dermoudy e Kristy de Salas. «Cognitive Load Measurement in the Impact of VR Intervention in Learning». In: *2022 International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*. 2022, pp. 325–329. DOI: 10.1109/ICALT55010.2022.00103 (cit. alle pp. 50, 51).
- [57] Andrea Sanna, Federico Manuri, Jacopo Fiorenza e Francesco De Pace. «BARI: An Affordable Brain-Augmented Reality Interface to Support Human–Robot Collaboration in Assembly Tasks». In: *Information* 13 (set. 2022), p. 460. DOI: 10.3390/info13100460 (cit. a p. 63).