



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Ottobre 2023

**Eye-tracking e analisi del carico
cognitivo: esplorazione ed
implementazione nella
Human-Robot Collaboration**

Relatore:

Prof. Fiorenzo Franceschini

Correlatore:

Dott. Riccardo Gervasi

Candidato:

Maria Chiara Guaiana

Indice

Indice degli acronimi	4
Abstract	6
Introduzione.....	8
1. Human Robot Collaboration	10
2. Cosa è l'Eye tracking?.....	14
2.1 Cosa l'Eye-tracking può e non può dirci:	17
2.2 Utilizzo dei dispositivi mobili:.....	18
2.3 Cosa provano gli utenti?	18
2.4 Esperimenti in letteratura con utilizzo dell'Eye Tracking.....	19
3. Strumenti di supporto per misurare i parametri fisiologici e il carico cognitivo	22
3.1 I parametri fisiologici.....	22
3.2 Il carico cognitivo	23
3.3 Strumenti di supporto	25
3.3.1 EMPATICA E4.....	25
3.3.2 TOBI PRO GLASSES 3.....	27
3.4 Prove con Eyetracking per sollecitare il carico cognitivo.....	30
4. Metriche di tracciamento oculare.....	32
4.1 Dimensione della pupilla:.....	32
4.2 Frequenza ammiccamenti	34
4.3 Durata ammiccamento	35
4.4 Frequenza di fissazione	36
4.5 Durata della fissazione:	37
4.6 Diffusione di fissazione:.....	37
4.7 Durata della saccade:.....	38
4.8 Ampiezza della saccade:	38
4.9 Velocità saccade:.....	39
4.10 Rapporto durata fissazione/Saccade:	40
4.11 Lunghezza del percorso di scansione:.....	40
5. Esperimento N-back con Eyetracking	44
5.1 Descrizione esperimento N-back e fasi operative	44
5.1.1 Metriche Eyetracking misurate	53

5.2 Analisi dei risultati esperimento base	56
5.2.1 Analisi dell'accuracy durante la fase di Training al variare dell'N-back	57
5.2.2 Analisi della difficoltà percepita (VAS) durante le prove effettive al variare dell'N-back	58
5.2.3 Analisi dell'accuracy durante le prove effettive al variare dell'N-back	59
5.2.4 Analisi dell'AOI	61
5.3 Analisi dei dati: Metriche Eyetracking	62
5.3.1 Metriche Eyetracking vs N-back	64
5.3.2 Metriche Eyetracking vs TRIAL	74
6. Esperimento prove assemblaggio manuale e in HRC	80
6.1 Descrizione esperimento assemblaggio	80
6.2 Analisi dei dati: risultati metriche eyetracking durante le prove di assemblaggio manuale e HRC	86
7. Conclusioni	112
Elenco figure	114
Elenco tabelle	116
Bibliografia e Sitografia	117
APPENDICE	122
Ringraziamenti	134

Indice degli acronimi

AI - Artificial Intelligence (Intelligenza Artificiale)

AOI – Area of interest (area di interesse)

ECG - Electrocardiogram (Elettrocardiogramma)

EDA - Electrodermal Activity (Attività Elettrodermica)

EEG - Electroencephalography (Elettroencefalografia)

ENG - Electronystagmography (Elettronistagmografia)

HRC - Human-Robot Collaboration (Collaborazione Uomo-Robot)

HRV - Heart Rate Variability (Variabilità della Frequenza Cardiaca)

ISO - International Organization for Standardization (Organizzazione internazionale per la standardizzazione)

MWL – Mental workload (Carico di lavoro mentale)

NASA-TLX - National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (Indice di Carico di Lavoro dell'Agenzia Spaziale Americana)

RMSSD - Root Mean Square of Successive Difference (Radice Quadrata Media della Differenza Successiva)

RTP - Real time Protocol (Protocollo di trasporto in tempo reale)

RTSP - Real Time Streaming Protocol (Protocollo di Streaming in Tempo Reale)

SCR - Skin Conductance Response (Risposta di Conduttanza della Pelle)

SDNN - Standard Deviation of NN interval (Deviazione Standard dell'intervallo NN)

SI – Intrusion Saccades (Intrusioni Saccadi)

UX - User Experience (Esperienza Utente)

VAS – Visual Analogue Scale (Scala Visiva Analogica)

Abstract

L'obiettivo generale di questo lavoro di tesi è studiare come strumenti e sensori di supporto possono essere utilizzati per l'analisi dei parametri fisiologici degli operatori della Human Robot Collaboration. In particolare, si è focalizzato sul carico di lavoro mentale in relazione al tracciamento oculare, grazie all'utilizzo dell'eye-tracking. Nel rapporto uomo-macchina è fondamentale capire cosa può influenzare il loro modo di interagire.

Dopo una revisione della letteratura pertinente, è stato condotto un primo esperimento in laboratorio al fine di raccogliere dati, analizzarli e stabilire se ci fossero delle correlazioni tra le metriche. Inoltre, è avvenuta una seconda analisi dei dati riguardanti un ulteriore esperimento che coinvolgeva un robot collaborativo per valutare come i parametri cambiassero con la presenza o l'assenza del robot. Durante lo studio, l'eye-tracking è stato utilizzato per analizzare i parametri fisiologici degli operatori al variare del carico cognitivo. L'attività oculare degli operatori è stata monitorata mentre completavano compiti cognitivamente impegnativi.

Il primo esperimento (N-back) è servito ad esplorare come variassero le metriche analizzate in funzione di livelli di difficoltà controllati e in condizioni diverse, ma statiche (tipologie di prove: audio, visuale, visuospatiale). Il secondo esperimento è stato indirizzato ad implementare l'uso degli eye-tracking in una condizione "dinamica" in task di assemblaggio, per valutare l'impatto dal punto di vista cognitivo del cobot (interpretando i risultati in base a ciò che si è evidenziato dal primo esperimento e da ciò che è presente in letteratura).

I risultati ottenuti hanno mostrato come l'aumento del carico cognitivo influenzi specifici parametri, come il diametro della pupilla, il tempo di fissazione, il numero di fissazioni e il numero di saccadi, misurati utilizzando gli occhiali Tobii Pro Glasses 3. Questi risultati suggeriscono come l'eye-tracking possa essere implementato e fornire supporto per l'analisi dei parametri fisiologici degli operatori in situazioni di carico cognitivo variabile.

Introduzione

La Human-Robot Collaboration (HRC) è un campo in crescita che riguarda l'interazione diretta tra esseri umani e robot nello svolgimento di compiti comuni.

La HRC è considerata importante perché permette di sfruttare i vantaggi dei robot, come la precisione e la ripetibilità, per migliorare la produttività e la qualità del lavoro.

I parametri fisiologici sono importanti perché possono fornire informazioni sullo stato di benessere e sicurezza degli operatori in ambienti di HRC. Ad esempio, la rilevazione della frequenza cardiaca e della respirazione può fornire informazioni sullo stress e sull'affaticamento degli operatori, mentre l'elettroencefalografia (EEG) può fornire informazioni sull'attività cerebrale e sull'elaborazione delle informazioni (Bergstrom and Schall, 2014). L'Eye-tracking può essere utilizzato per analizzare l'attività oculare e fornire informazioni sull'attenzione e sull'elaborazione visiva.

In HRC, la valutazione del benessere e della sicurezza degli operatori è cruciale per garantire che essi possano lavorare in modo efficace e sicuro con i robot. L'utilizzo di strumenti e sensori di supporto per l'analisi dei parametri fisiologici degli operatori può fornire informazioni dettagliate sullo stato di benessere e sicurezza degli operatori e consentire di prendere misure per migliorare la loro esperienza di lavoro in HRC.

Per questo lavoro di tesi è stato condotto un primo esperimento N-back presso il laboratorio Mind4Lab del Politecnico di Torino, dove in prima fase sono stati raccolti numerosi dati e attraverso l'analisi di quest'ultimi è stato possibile studiare la correlazione che esiste tra le metriche di tracciamento oculare e la variazione del carico cognitivo.

Utilizzando le correlazioni pervenute dai risultati di questo esperimento, si è svolta un'ulteriore analisi di dati di un secondo esperimento in laboratorio in cui gli operatori sono stati sottoposti all'assemblaggio di 3 elementi differenti per complessità di montaggio sia manuale sia con il supporto del robot. Per questo secondo esperimento il focus è stato quello di analizzare se i parametri venissero influenzati dalla presenza del robot e dalla complessità dell'elemento, e valutare l'andamento delle metriche rispetto all'esperimento N-back.

1. Human Robot Collaboration

La collaborazione uomo-uomo è sicuramente diversa da quella uomo-macchina, ma cosa fa la differenza? Nelle relazioni umane ci sono numerosi aspetti che non possono essere paragonati di certo a quelle con una macchina, come le emozioni, la spontaneità, il modo di dialogare ecc. Nel rapporto uomo-macchina si parla di una coordinazione pianificata, perché non può avvenire spontaneamente. Grazie all'Industria 4.0, i robot iniziano a comprendere il linguaggio, apprenderlo e riescono a comportarsi in maniera sempre più simile all'uomo; per questo adesso si punta ad una collaborazione diretta uomo-macchina ("Human-robot collaboration," 2023).

L'Human Robot Collaboration (HRC) è una forma di interazione uomo-macchina in cui l'uomo e il robot lavorano insieme per raggiungere un obiettivo comune.



Figura 1. 1. Human Robot Collaboration (www.reliableplant.com/Read/31352/human-robot-collaboration)

Col termine HRC si intende l'insieme delle tecniche di studio, progettazione, costruzione e valutazione di un sistema uomo-robot ("Human-robot collaboration," 2023). Si è cercato di combinare le capacità dei robot con quelle dell'uomo: si unisce la forza, ripetibilità, precisione, l'assenza di affaticamento e indifferenza al pericolo del robot alla flessibilità, intelligenza e adattabilità alle contingenze, grazie all'elaborazione visiva dell'uomo.

L'HRC è diventata sempre più importante negli ultimi anni a causa della crescente presenza dei robot in molti ambiti, come la produzione, la logistica e il settore sanitario.

Le ragioni per cui l'HRC è considerata importante sono diverse:

1. Efficienza: i robot possono essere programmati per svolgere compiti ripetitivi in modo più veloce e accurato rispetto agli esseri umani. Inoltre, l'HRC permette di sfruttare al meglio le capacità di entrambi gli operatori, umani e robot, per ottenere il massimo rendimento.
2. Costi: l'utilizzo dei robot può ridurre i costi aziendali legati al personale.
3. Sicurezza: in molti casi, l'HRC può ridurre il rischio di infortuni per gli operatori, soprattutto in situazioni in cui sono richieste attività fisicamente pericolose.
4. Qualità del lavoro: l'HRC può contribuire a ridurre la fatica e lo stress degli operatori umani.
5. Innovazione: l'HRC può stimolare la creatività e l'innovazione poiché gli operatori umani e i robot collaborando possono sviluppare nuove idee e soluzioni.

Quando si parla di HRC, è automatico fare riferimento ai Cobot: robot collaborativi, che vengono descritti dalla Federazione Internazionale della Robotica come una classe di robot che permette lo svolgimento di attività in collaborazione con gli operatori ("Il Ruolo dei Cobot nell'Industria 4.0 - Esa Automation," 2019). Un robot collaborativo è definito "un robot che è destinato ad interagire fisicamente con l'uomo in uno spazio di lavoro condiviso" (www.iso.org/standard/51330.html).

I Cobot possono eseguire diverse attività ed infatti sono utilizzati in diversi settori dell'industria. La loro utilità emerge quando non tutte le attività delle linee produttive possono essere automatizzate, ma devono comunque essere svolte sequenzialmente. La produttività, però, viene diminuita in altri casi dalla completa automazione, perché gli operatori possono ottenere risultati più proficui se svolgono alcune attività. I robot collaborativi possono essere utilizzati per svolgere lavori pesanti e pericolosi, o anche per svolgere compiti troppo noiosi per l'uomo (Macri, 2019).

Dalla collaborazione di General Motors, uno dei più importanti gruppi automobilistici al mondo, e Northwestern e California Berkeley, due università americane, è nato il primo prototipo di cobot. Nel 1996 due professori della Northwestern University, J. Edward Colgate e Michael Peshkin (robot.omitech.it/cobot-storia-applicazioni-robot-collaborativi/), inventarono i primi cobot. L'obiettivo della loro ricerca era quello di trovare un'automazione che

potesse ridurre il carico di lavoro degli operatori senza determinare una riduzione della produttività.



Figura 1. 2. Cobot (www.universal-robots.com/it/quali-sono-le-differenze-tra-cobot-e-robot-tradizionali/)

Inizialmente in nessun cobot era presente una forma di forza motrice interna, poiché questa veniva fornita dall'operatore. L'unica funzione che aveva la macchina era di permettere il controllo computerizzato dei movimenti, così da garantire la guida del carico durante il movimento. Con l'aumento della forza motrice generata internamente c'è stata l'evoluzione dei Cobot.

Per collaborazione tra Cobot e operatore si intende che entrambi svolgono la medesima attività nella stessa postazione di lavoro. L'operato dell'uno ha conseguenze immediate sulle attività svolte dall'altro.

Lo scopo dell'HRC è quello di combinare le capacità robot con quelle umane, in modo da garantire l'interazione fisica all'interno di un contesto industriale (Gervasi et al., 2020). Nell'ottica dell'industria 5.0 emergente, l'HRC è una soluzione per rendere i processi produttivi più flessibili, in quanto l'esperienza acquisita attraverso l'interazione influenza l'esperienza dell'utente nell'HRC insieme a diversi fattori di configurazione, come la velocità e la vicinanza del robot (Gervasi et al., 2023b). È importante che il risultato dell'interazione deve essere apprezzabile per quanto riguarda la qualità della vita dei lavoratori. Le dimensioni legate alla qualità e alla salute psicofisica dei lavoratori sono dipendenti tra loro: un momento di stress fisico o mentale di sicuro influisce sull'aumento di difettosità, portando una produzione di scarsa qualità (Arai et al., 2010).

Infatti, nell'ambito manifatturiero si fa sempre riferimento al carico mentale, allo stress, allo sforzo e alla fatica e per questo quest'ultimi sono trattati dalla letteratura scientifica. Molte volte questi fattori vengono misurati attraverso strumenti come il NASA-TLX (Hart and Staveland, 1988), un questionario che viene compilato dall'operatore stesso alla fine dell'esperimento. Un limite principale però che non è in grado di cogliere le fluttuazioni dello stato fisico e

mentale dell'operatore durante le prove, e quindi non permette di distinguere in maniera specifica le determinanti di tale stato. Questo ha spinto i ricercatori a focalizzare la propria attenzione sull'utilizzo dei parametri fisiologici come determinanti dello stato fisico e mentale degli operatori.

Kulić e Croft, per misurare cosa comporti il movimento di un robot sullo stato fisico e mentale dell'uomo hanno proposto due parametri fisiologici: l'attività elettrodermica (EDA) e la variazione della frequenza cardiaca (HRV). È stato visto che lo stress mentale è superiore quando in robot compie atti veloci con traiettorie vicine all'operatore. (Kulić and Croft, 2007)

Anche Arai et al. hanno condotto uno studio molto simile, ma in realtà hanno valutato le differenze nei parametri fisiologici per la movimentazione a diverse velocità e traiettorie di un manipolatore industriale. (Arai et al., 2010)

Gli studi citati però sono stati condotti avendo soltanto una semplice interazione uomo-robot (HRI), e non una collaborazione.

Uno studio di Franceschini, Gervasi, Capponi e Mastrogiacomo ha mostrato l'evidenza di una riduzione dello sforzo mentale, dello stress e la diminuzione del numero di difetti di un processo nell'ambiente HRC, evidenziando quindi come la robotica collaborativa possa migliorare la qualità dei processi ripetitivi (Gervasi et al., 2023a).

Un ulteriore esperimento, attraverso l'analisi di dati soggettivi (questionari) e oggettivi (come l'attività elettrodermica e frequenza cardiaca), ha studiato l'impatto dell'HRC industriale sull'esperienza dell'utente. I risultati hanno mostrato che la velocità di movimento del robot e la possibilità di personalizzare l'HRC influenzano i dati raccolti (Gervasi et al., 2022).

L'EDA e l'HRV sono stati successivamente utilizzati in moltissimi campi di ricerca. Il primo ha trovato come campo di applicazione la psicologia (Prokasy and Raskin, 1973). Un indicatore che determina l'EDA è l'SCR (la SCR è una misura legata all'attività autonoma simpatica associata sia all'emozione che all'attenzione. L'EDA comprende sia l'attività fasica che tonica del sistema nervoso simpatico) che misura l'attività del sistema simpatico, il quale è legato allo stress fisico e mentale e ad uno stato di allarme.

Due misure che contribuiscono a trovare l'HRV sono il Root Mean Square of Successive Difference (RMSSD) e lo Standard Deviation of NN interval (SDNN), ed entrambi vengono utilizzati per determinare la fatica fisica e mentale, perché sono indicatori dell'attività del sistema parasimpatico (Minarini, 2020).

2. Cosa è l'Eye tracking?

L'Eye tracking è un processo di misurazione che aiuta a capire dove si concentra l'attenzione visiva: si può osservare dove l'utente guarda in tempo reale, per quanto tempo fissa un determinato punto e riesce a riconoscere la traiettoria dello sguardo (Bergstrom and Schall, 2014).

Questa metodologia serve a capire dei comportamenti che l'utente stesso non riesce a descrivere. Ma come può un flusso di dati dei punti di sguardo visivo di un utente valutare l'UX (User Experience)? Perché il rilevamento degli occhi è importante?

Molto spesso spostiamo la nostra attenzione su un determinato punto, anche se solo per un brevissimo momento. Pertanto, possiamo presumere che se siamo in grado di tracciare i movimenti oculari di qualcuno, possiamo seguire il percorso di attenzione di quell'osservatore. Questo potrebbe farci capire ciò che l'osservatore ha trovato interessante, cioè ciò che ha attirato la sua attenzione, e forse anche fornire un indizio su come quella persona ha percepito la scena che stava guardando.

In generale, ci sono due tipi tecniche di monitoraggio del movimento oculare: quelle che misurano la posizione dell'occhio rispetto alla testa e quelle che misurano l'orientamento dell'occhio nello spazio.

Esistono quattro grandi categorie di metodologie di misurazione del movimento oculare: Elettro-oculografia, Lenti a contatti sclerali, Foto-OculoGrafia/Video-OculoGrafia, Riflessione Pupilla/Corneale Combinata basata su Video.

Elettro-oculografia (Electrooculography):

Si basa sulla misurazione della differenza di potenziale dell'elettricità della pelle con degli elettrodi posti intorno all'occhio. Questa tecnica misura i movimenti oculari rispetto alla posizione della testa, ma non è generalmente adatto per misurazioni del punto di riferimento a meno che non lo sia anche la posizione della testa.

Lenti a contatto sclerali (Scleral contact lenses):

È uno dei metodi di misurazione più precisi che consiste nell'attaccare un riferimento ottico su una lente a contatto che viene poi indossata direttamente sull'occhio. L'uso della lente provoca disagio.

Foto-OculoGrafica o Video-OculoGrafica (Photo-Oculography/Video-Oculography):

Questa categoria raggruppa un'ampia varietà di tecniche di registrazione dei movimenti oculari che implicano la misurazione di: rotazione/traslazione, la forma apparente della pupilla, la posizione del limbus (il confine dell'iride-sclera) e riflessi corneali di una sorgente luminosa (spesso infrarossa). Sebbene diverse nell'approccio, queste tecniche spesso non forniscono la misurazione del punto di riferimento. Molti di questi metodi richiedono di fissare la testa.

Riflessione Pupilla/Corneale Combinata basata su Video (Combined Pupil/Corneal Reflection Video-based):

Sebbene le tecniche di cui sopra siano generalmente adatte per la misurazione del movimento oculare, spesso non forniscono misurazioni del punto di riferimento. Per fornire questa misura, o la testa deve essere fissata in modo che la posizione dell'occhio rispetto alla testa e il punto di vista coincidono, oppure è necessario misurare più caratteristiche oculari per chiarire il movimento della testa dalla rotazione degli occhi. Due di queste caratteristiche sono la cornea riflessione (di una sorgente luminosa, solitamente infrarossa) e il centro della pupilla. I tracker basati su video utilizzano fotocamere ed elaborazione delle immagini per calcolare il punto di riferimento in tempo reale. La riflessione corneale della sorgente luminosa (tipicamente infrarossa) viene misurata in modo relativo alla posizione del centro della pupilla.

Gran parte dei moderni Eye tracker si basa sul metodo di riflessione corneale (figura 2.1) per rilevare e tracciare la posizione della pupilla mentre è in movimento. Questo metodo utilizza una fonte che illumina l'occhio e il riflesso viene rilevato da una fotocamera ad alta risoluzione (Bergstrom and Schall, 2014).

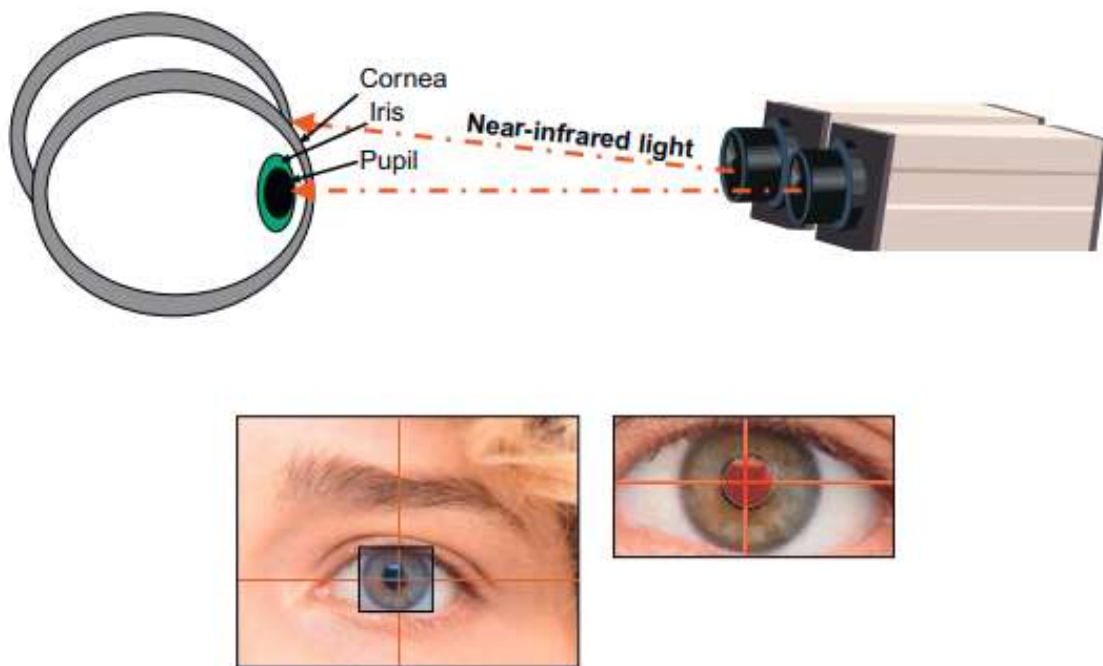


Figura 2. 1. Riflessione Corneale (Bergstrom and Schall, 2014)

Gli Eye tracker in genere si basano sulla misurazione delle caratteristiche visibili dell'occhio, ad esempio la pupilla, il confine iride-sclera o un riflesso corneale di una sorgente di luce diretta e posizionata ravvicinata. Queste tecniche spesso comportano l'analisi manuale o automatica (su computer) delle registrazioni video dei movimenti degli occhi, off-line o in tempo reale.

Molte volte lo sguardo sembra essere stabile, ma in realtà l'occhio è sempre in movimento: ci sono momenti di fissazione e di saccadi (movimenti rapidi da una fissazione all'altra, in media 3/4 al secondo). L'Eye tracking tiene traccia delle fissazioni, che hanno luogo nella fovea, ovvero una porzione di 1 o 2 gradi al centro del campo visivo. Per questo motivo rappresenta meno dell'8% di tutto il campo visivo. Le altre zone di visione (figura 2.2) servono soltanto per dare un senso a quello che sta succedendo attorno. Circa il 90% del tempo di visualizzazione è speso in fissazioni. La mente umana riesce ad elaborare tutte le informazioni ricevute dallo sguardo in pochi secondi (Bergstrom and Schall, 2014).



Figura 2. 2. Zone di visione (Bergstrom and Schall, 2014)

2.1 Cosa l'Eye-tracking può e non può dirci:

Le fissazioni possono essere mappate su una griglia per individuare la traiettoria, ma ovviamente rileva solo dove l'utente ha guardato e **non il perché**. A volte si guarda non intenzionalmente qualcosa, l'attenzione magari è rivolta a qualcos'altro, ma i dati dell'Eye tracking non possono rivelarlo.

Un indice possibile di attenzione potrebbe essere il periodo di tempo durante il quale un utente fissa una determinata area. Però ci sono diverse ragioni per cui l'utente può fissare una determinata area (Confusione? Coinvolgente?).

Per quanto riguarda il movimento, invece, potrebbe rilevare una gerarchia di importanza delle informazioni da rilevare (ad esempio: perché si guardano prima le figure più grandi?).

2.2 Utilizzo dei dispositivi mobili:

Negli ultimi anni gli Eye tracker sono diventati disponibili in commercio come dispositivi mobili. Il più grande ostacolo pratico con questi dispositivi è il tempo necessario per l'elaborazione e la segmentazione dei dati da analizzare.

Gli Eye tracker possono essere classificati in tre categorie:

- Unità portatili di dimensioni maggiori come il Tobii X60 e X120. Questi due primi dispositivi consentivano il tracciamento oculare di un cellulare. A causa delle loro dimensioni devono essere posizionati sopra il dispositivo mobile, il che può influire sulla fedeltà del tracciamento.
- Unità portatili a forma di "barretta di cioccolato", come il Tobii X2 e SensoMotoric Instrument Red-m. Questi dispositivi sono leggeri, più comodi da utilizzare e sono anche molto precisi. Questi dispositivi possono essere utilizzati per monitorare e registrare i movimenti degli occhi durante l'interazione con un'interfaccia, un dispositivo o un ambiente. Sono spesso impiegati in ambiti come la ricerca sull'usabilità, lo sviluppo di interfacce utente, lo studio dell'attenzione visiva e altre applicazioni simili.
- Unità portatili a forma di occhiali: come gli occhiali Tobii e gli occhiali SMI Eye Tracking. Questi sono prodotti leggeri, e consentono libertà di movimento. Il quadro di riferimento dell'utente è in continua evoluzione. Sono strumenti utili a creare grafici dello sguardo e mappe di calore per capire dove si presta maggiore attenzione.

2.3 Cosa provano gli utenti?

Le persone in realtà non sono sempre consapevoli di quello che sta accadendo nella loro mente. Molte volte non riescono a ricordare completamente le loro interazioni con un prodotto. Le misurazioni della risposta fisiologica consentono ai ricercatori di ottenere dei dati oggettivi di performance. Un mix tra i dati sulla conduttanza cutanea e i dati di Eye tracking può fornire informazioni utili a capire quali sensazioni si provano quando si vede qualcosa.

Quando si lavora in laboratorio, è importante creare una situazione di prova il più naturale e realistico possibile, per cercare di non alterare lo studio che si vuole fare.

Sono nati nuovi apparecchi portatili (piuttosto che l'EDA fisso sul pc ad esempio) che riescono ad essere più efficienti perché possono essere utilizzati in più situazioni in contesti reali.

2.4 Esperimenti in letteratura con utilizzo dell'Eye Tracking

L'eye-tracking è stato utilizzato in una vasta gamma di esperimenti in molti campi differenti, tra cui psicologia, neuroscienze, marketing e design. Di seguito alcuni esempi di esperimenti che hanno utilizzato l'eye-tracking:

1. Psicologia: gli psicologi utilizzano l'eye-tracking per studiare la percezione visiva e l'elaborazione delle informazioni visive. Ad esempio, gli psicologi possono utilizzare l'eye-tracking per studiare come le persone percepiscono e processano le immagini o i video.
2. Neuroscienze: gli scienziati delle neuroscienze utilizzano l'eye-tracking per studiare come il cervello controlla i movimenti oculari e come questi movimenti sono correlati alle attività cerebrali.
3. Marketing: i ricercatori del marketing utilizzano l'eye-tracking per studiare come le persone reagiscono a determinati messaggi pubblicitari o a determinati design di siti web.
4. Design: i designer utilizzano l'eye-tracking per studiare come le persone interagiscono con i prodotti o i design, e come questi possono essere migliorati.
5. Studi sull'usabilità: gli esperti di usabilità utilizzano l'eye-tracking per valutare come gli utenti interagiscono con un'interfaccia utente, per identificare eventuali problemi o aree di miglioramento.

Lo studio del carico cognitivo nelle operazioni di produzione è un nuovo argomento e la letteratura è limitata rispetto a questo tipo di valutazione cognitiva. Andare a studiare l'interazione tra un operatore e un compito assegnato è importante per valutare come eventuali aumenti delle richieste di attività potrebbe portare un impatto negativo sulla prestazione dell'uomo.

È stato svolto un esperimento dove veniva richiesto all'utente di costruire qualcosa con i lego, in modo ripetitivo (Bommer and Fendley, 2018). Sono stati

utilizzati gli occhiali Tobii-Eyetracker T120 per registrare la fisiologia visiva durante l'esperimento.

Le variabili sperimentali erano: la complessità del task (indipendente) e il mental workload (dipendente).

La complessità del task poteva essere: assemblaggio con utensili, assemblaggio e ispezione, solo assemblaggio, assemblaggio e ispezione con utensili.

Il mental workload poteva essere misurato in maniera soggettiva, psicologica e in base alle performance.

Questo studio ha simulato un processo di produzione ripetitivo manuale con compiti di ispezione e i risultati hanno dimostrato l'influenza dell'attività di ispezione sull'operatore: sebbene l'attività di produzione fosse semplice, l'ispezione ha aggiunto picchi di carico cognitivo dell'operatore.

In ambito Industry 4.0, uno studio interessante riportato in letteratura è quello in cui sono stati valutati dei dispositivi di navigazione utilizzando gli occhiali Tobii-Pro 2 (van Lopik et al., 2020).

Muovendosi verso catene di approvvigionamento sempre più sostenibili, la consegna potrebbe essere completata da un corriere in bici o a piedi e può essere supportata da dispositivi di navigazione.

I dispositivi analizzati erano un display portatile che presentava la mappa e le istruzioni e un display a vista che presentava istruzioni di testo e le frecce.

I risultati indicano che il dispositivo portatile ha fornito un supporto migliore per una navigazione accurata (ora e luogo giusti), con interazioni dello sguardo più lunghe ma meno frequenti e una maggiore usabilità percepita. Il display a vista ha supportato, invece, una migliore consapevolezza della situazione con un maggior numero di pericoli riconosciuti, quindi una navigazione più sicura.

In ambito psicologico, invece, un altro esperimento presente in letteratura voleva misurare in che modo la complessità dell'interfaccia influenzasse la ricerca di un elemento visivo specifico nell'interfaccia (Wu et al., 2016).

Anche qui è stato utilizzato l'eye-tracking per misurare i comportamenti visivi. Sono state considerate le seguenti variabili indipendenti: la complessità dell'interfaccia e il background dell'utente. Per le variabili dipendenti hanno fatto riferimento al tempo alla prima fissazione e al numero di fissazioni precedenti riferiti a un AOI. Il tempo alla prima fissazione, misurato in secondi, misurava il tempo necessario affinché il partecipante fissasse l'AOI per la prima volta. Le fissazioni prima, misurate in conteggi, misuravano quante volte il partecipante avesse effettuato delle fissazioni prima di visualizzare l'AOI.

L'esperimento ha misurato l'esperienza dell'utente raccogliendo i suoi dati psicofisiologici combinati questionari soggettivi basati su una scala Likert, in modo da correlare i dati.

Questo studio ha evidenziato come la complessità dell'interfaccia dovrebbe essere quanto più schematica e semplice possibile, rendendo più agevole l'utilizzo all'utente, il quale può impiegare meno tempo per individuare il pulsante di interesse.

Uno altro studio importante è stato svolto su degli alunni per misurare con l'utilizzo dell'eye-tracking il grado di difficoltà di un compito (Bergstrom and Schall, 2014). Grazie a questo studio, è stata dimostrata la correlazione positiva tra il diametro della pupilla col grado di difficoltà percepito. Si è scoperto che la dimensione della pupilla tende a diminuire nel momento in cui lo studente fornisce la giusta soluzione al compito, come una sorta di indice di sollievo.

Un'altra ricerca interessante è quella in cui sono stati analizzati i comportamenti visivi degli operatori in risposta a situazioni anomale a età diverse e con carichi di attività, complessità e dispositivi diversi (Shi and Rothrock, 2022). Si è scoperto che i partecipanti avevano durate medie di fissazione, numeri totali di fissazione e rapporti fissazione/saccadi inferiori quando si trovavano nelle condizioni di un dispositivo touchscreen. Inoltre, gli anziani avevano durate saccadiche medie e ampiezze saccadiche più elevate quando erano nelle condizioni di un dispositivo touchscreen. I risultati hanno mostrato che i comportamenti visivi possono indicare specifici stati interni dei partecipanti, incluso il loro carico di lavoro cognitivo, l'attenzione e la consapevolezza della situazione in tempo reale.

3. Strumenti di supporto per misurare i parametri fisiologici e il carico cognitivo

3.1 I parametri fisiologici

I parametri fisiologici sono misure biologiche che indicano lo stato di salute e il benessere di un individuo. Alcuni esempi di parametri fisiologici comunemente utilizzati per valutare lo stato in cui si trovano gli operatori sono:

1. Frequenza cardiaca (*heart rate*): può essere utilizzata per valutare lo stato di stress o di affaticamento di un individuo. Un aumento della frequenza cardiaca può indicare un elevato livello di stress o di un'attività fisica intensa.
2. Pressione arteriosa (*blood pressure*): può essere utilizzata per valutare il rischio di problemi cardiovascolari o di ipertensione.
3. Livello di stress (*stress level*): può essere misurato attraverso test psicologici o attraverso la rilevazione di altri parametri fisiologici, come la frequenza cardiaca o la sudorazione.
4. Ritmo del sonno (*sleep rhythm*): può essere valutato attraverso la rilevazione di parametri come la quantità di sonno, la qualità del sonno e il numero di risvegli notturni.

In generale, la valutazione dei parametri fisiologici può fornire informazioni utili per comprendere lo stato di benessere degli operatori e, di conseguenza, per adottare eventuali misure preventive o correttive. Tuttavia, è importante considerare che tali parametri non devono essere utilizzati in modo isolato, ma in combinazione con altre informazioni, come ad esempio i feedback degli operatori o le osservazioni dei loro comportamenti.

Di seguito alcuni esempi di strumenti e sensori che possono essere utilizzati per l'analisi dei parametri fisiologici:

1. Misuratore di pressione arteriosa: è uno strumento che viene utilizzato per misurare la pressione arteriosa sistolica (massima) e diastolica (minima).

2. **Cardiotachimetro:** è uno strumento che viene utilizzato per misurare la frequenza cardiaca. Esistono diverse modalità di rilevamento, come ad esempio il battito del polso, l'elettrocardiogramma (ECG) o la rilevazione della quantità di ossigeno presente nel sangue.
3. **Sensori di sudorazione:** sono sensori che vengono utilizzati per misurare la quantità di sudorazione prodotta dall'organismo.
4. **Sensori di movimento:** sono sensori che vengono utilizzati per rilevare i movimenti dell'organismo, come ad esempio il numero di passi compiuti o il tempo trascorso seduti. I sensori di movimento possono essere utilizzati per valutare l'attività fisica di un individuo.
5. **Sensori del sonno:** sono sensori che vengono utilizzati per rilevare il ritmo del sonno, come ad esempio la durata del sonno, la qualità del sonno e il numero di risvegli notturni.

In questo percorso di tesi, nei capitoli successivi, faremo riferimento al carico cognitivo in relazione ai movimenti oculari registrati grazie alla misurazione attraverso gli occhiali Tobii Pro Glasses 3.

3.2 Il carico cognitivo

Per carico cognitivo si definisce il carico di lavoro mentale necessario per l'esecuzione di un compito in termini di utilizzo di memoria di lavoro, ed è un parametro utile soprattutto per la User Experience (UX) in quanto il suo monitoraggio permette di strutturare un'interfaccia il più possibile fruibile (Bazzan, 2016).

John Sweller ("La teoria del carico cognitivo di John Sweller," 2019) suggerisce nella sua teoria del carico cognitivo che l'apprendimento si verifica meglio nelle condizioni che si allineano all'architettura cognitiva umana. Il carico cognitivo dipende dalla quantità di informazioni che la memoria di lavoro può immagazzinare contemporaneamente. Lo psicologo Sweller disse che, data la capacità limitata della memoria di lavoro, non si dovrebbe sovraccaricare la memoria con attività aggiuntive che non contribuiscono direttamente all'apprendimento.

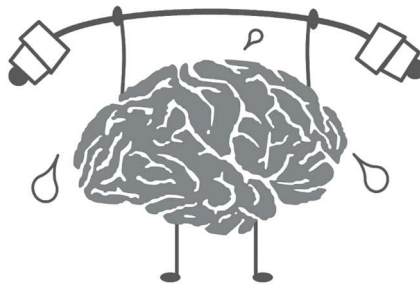


Figura 3. 1. Carico cognitivo (breakeducation.org/2020/06/09/pensiamo-mai-al-carico-cognitivo/)

Sweller fonda così una teoria che ha come base della conoscenza di un individuo strutture cognitive come gli schemi, o combinazioni di elementi. Fece ciò dopo la ricerca di George Miller sull'elaborazione delle informazioni, che dimostra che la memoria a breve termine ha un massimo numero di elementi che può contenere simultaneamente.

Lo psicologo Sweller sosteneva che la pianificazione didattica poteva essere usata per ridurre il carico mentale negli studenti. Molti anni dopo, alcuni ricercatori hanno sviluppato un metodo per misurare lo sforzo mentale percepito, indicativo del carico emotivo.

La *teoria del carico cognitivo* di John Sweller evidenzia un punto fondamentale, cioè che un carico cognitivo pesante può avere effetti negativi sul completamento di un'attività. Inoltre, mostra l'importanza di considerare che l'esperienza del carico cognitivo non è la stessa in tutti gli individui, infatti gli anziani, gli studenti e i bambini ne sperimentano diverse e maggiori quantità.

È utile distinguere tra carico cognitivo intrinseco, relativo allo sforzo che l'utente compie per elaborare le informazioni che sta volontariamente ricercando, e carico cognitivo estraneo, legato alla presenza di barriere che ostacolano la User Experience (es. immagini poco chiare, font diversi, rumori).

Attraverso il monitoraggio della sudorazione con la rilevazione della conduttanza cutanea (GSR) si può valutare l'attivazione pura del sistema nervoso simpatico: l'aumento della sudorazione è direttamente proporzionale all'aumento del carico cognitivo.

Per quanto riguarda l'elettroencefalografia (EEG), invece, consente di stimare l'aumento del carico cognitivo attraverso la rilevazione dell'attività delle aree prefrontali e frontali. L'EEG può essere utilizzato anche per valutare il coinvolgimento emotivo durante interazione con i prodotti. L'EEG misura

l'emozione grazie alle bande elettriche e al software che calcola automaticamente queste bande, indicando con precisione lo stato emotivo che una persona sta vivendo.

Il tracciamento di movimenti oculari (Eye-Tracking) consente di rilevare numerosi parametri direttamente legati al carico cognitivo, tra i quali la dilatazione pupillare e l'ammiccamento (Tao et al., 2019; Young et al., 2015). Se da un lato il numero di ammiccamenti diminuisce all'aumentare del carico cognitivo, la pupilla tende a dilatarsi proporzionalmente all'aumento del carico cognitivo, per poi diminuire quando il carico eccede il limite delle risorse cognitive disponibili (Gawron, 2008; Marinescu et al., 2018).

L'obiettivo della misurazione e dell'analisi del movimento oculare è quello di ottenere informazioni dettagliate sul comportamento dello spettatore. I dati grezzi sui movimenti oculari possono sembrare informativi, tuttavia, senza ulteriori analisi, i dati grezzi sono per la maggior parte privi di significato. Intuitivamente (e dalla conoscenza della circostanza), è possibile indovinare dove il soggetto si trovasse a prestare attenzione nell'ambiente.

3.3 Strumenti di supporto

3.3.1 EMPATICA E4

Uno strumento fondamentale per la raccolta di dati è il braccialetto E4 di Empatica. La mission aziendale di Empatica è quella di creare dispositivi che permettano di monitorare la salute mentale e fisica delle persone attraverso la raccolta, in tempo reale, di dati corporei. Questi vengono poi analizzati e infine clusterizzati per poter generare una fotografia dettagliata dell'evoluzione dello stato psicofisico dell'utente durante il tempo. Questo "orologio" ha un sensore di attività elettrodermica e un sensore fotopleletismografico ("Empatica | Medical devices, AI and algorithms for remote patient monitoring")

Empatica E4 Specifications

E4

Battery life

Streaming Mode: 24+hrs
Memory mode: 48+hrs

Data Management

Flash memory



Bluetooth LE (Smart)



Form Factor

Small and comfortable

Case: 44 mm x 40mm, height 16 mm
Weight: 25 gr

Event Mark Button

Certification

CE certification
FCC certification

Sensors



Photoplethysmography (PPG)
Continuous Heart Rate (HRV, Stress, Relaxation)



3-axis Accelerometer
Movement, Activity



Temperature + Heat flux
Activity, Context



Electrodermal Activity (EDA)
Skin conductance (Arousal, Excitement)



Figura 3. 2. Sensori Empatica E4 (support.empatica.com/hc/en-us/articles/202581999-E4-wristband-technical-specifications)



Figura 3. 3. Empatica E4 (e4.empatica.com/e4-wristband)

3.3.2 TOBII PRO GLASSES 3

Un altro strumento che si utilizza è il dispositivo Tobii pro glasses, cioè degli occhiali indossati dall'operatore che tracciano la direzione dello sguardo, la dimensione e l'accelerazione dei moti della pupilla.

Questa tesi si basa principalmente sull'utilizzo di quest'ultimi.



Figura 3. 4. Tobii Pro Glasses 3 (www.brainproducts.com/solutions/tobii-pro-wearable/)

Tobii Pro, leader mondiale nelle soluzioni di ricerca con tecnologia eye tracking, ha lanciato nel 2020 Tobii Pro Glasses 3, gli occhiali utilizzati in laboratorio.

Tramite il loro utilizzo, i ricercatori possono ottenere più facilmente informazioni oggettive sul comportamento umano.

Questo significa avere più informazioni a disposizione, si ha maggiore conoscenza dell'ambiente di lavoro, e quindi le imprese possono prendere decisioni sul come migliorare la produttività e la sicurezza e sul fare investimenti nell'ambito della progettazione e del marketing (capendo dove si concentra di più l'attenzione).

I ricercatori ottengono un punto di vista oggettivo sul comportamento umano. I Glasses 3 sono molto utili perché riescono a portare la ricerca fuori dal laboratorio nei contesti reali ("TOBII PRO GLASSES3," 2020). Rendono possibile la ricerca in molti ambiti di applicazione come: interazioni sociali, interazioni con interfacce, sicurezza del traffico e altro ancora.

I ricercatori UX e i professionisti dell'analisi del comportamento dei consumatori possono visualizzare e misurare l'oggettiva esperienza del cliente in qualsiasi contesto, come ad esempio: quale design attirerà maggiormente l'attenzione e si

convertirà in acquisto con più probabilità? Quale prodotto viene ignorato e cosa viene notato?

3.3.2.1 Come funziona

I Tobii Pro Glasses 3 registrano un video con l'audio dell'ambiente circostante e raccolgono i dati visivi di chi li indossa ("TOBII PRO GLASSES3," 2020).

Gli occhiali sono dotati di:

- quattro telecamere oculari, estremamente piccole, e 16 illuminatori inseriti nelle lenti che offrono una combinazione unica di prestazioni di tracciamento oculare e nessuna ostruzione dal campo visivo dell'utilizzatore.
- videocamera grandangolare che cattura un'area maggiore dell'ambiente circostante.

I Tobii Pro Glasses 3 hanno un peso di circa 77 grammi; quindi, sono molto leggeri e poco invasivi, e per questo possono essere utilizzati anche sotto i dispositivi di protezione individuale. Sono dotati di batterie ricaricabili, ciascuna con tempo di registrazione pari a 105 minuti.

Tramite Wi-Fi o un cavo HDMI si riesce a trasmettere al computer la registrazione e si visualizza il rilevamento dello sguardo. Il sistema deduce la direzione dello sguardo con una precisione di 0,6 gradi elaborando il riflesso corneale prodotto dagli illuminatori ad infrarossi posti sugli occhi (sono 8 per occhio). Tobii emette i dati di rilevamento degli occhi in una struttura di dati dello sguardo che include:

- la posizione dello sguardo 2D nel fotogramma del video della scena di visualizzazione;
- la posizione dello sguardo 3D per entrambi gli occhi
- diametri della pupilla
- direzioni dello sguardo destro o sinistro

Il campo visivo della telecamera di scena è di 95 e 63 gradi di direzione orizzontale e verticale. Anche quando gli occhiali si muovono rispetto alla loro posizione originaria o vengono tolti e rimessi, la tecnologia di slippage compensation consente di avere dati robusti di tracciamento oculare.

Questi dati di tracciamento oculare vengono raccolti a 50 o 100 hertz.

Esiste un software Python che crea una connessione wireless con gli occhiali sfruttando continuamente i dati ricevuti in formati numerici, poi li elabora e li imposta graficamente. È un'applicazione installabile nei dispositivi Android e

Windows che consente il controllo wireless delle registrazioni facilmente e in modo flessibile.

Tobii Pro Glasses 3 tramite wireless tramite il protocollo RTSP (Real Time Streaming Protocol) trasmette più pacchetti multimediali digitali alle applicazioni. I pacchetti di dati sono specificati dal protocollo di trasporto in tempo reale (RTP) in cui le modalità di dati distinte sono assegnate a uno specifico identificatore di carico utile. Gli identificatori del carico utile contengono informazioni relative alla dimensione di campionamento, al formato di codifica e alla frequenza di campionamento dei pacchetti di dati trasmessi (Nasrabadi and Alonso, 2022). Nelle tabelle 1 e 2 sono riportati i sensori del Tobii Pro Glasses 3 e Gaze Data structure.

Tabella 1: Embedded sensors of Tobii Pro Glasses 3 (Nasrabadi and Alonso, 2022)

SENSORS	SAMPLEING FREQUENCY	DETAILS	RTP PAYLOAD	ENCODING FORMAT
SCENE CAMERA	25 Hz	1920x1080 pixels, YUV420p format	96 and 97	H.264
EYE CAMERA	50Hz or 100Hz	Two cameras per eye each 256x256 pixels, Single channel	98	H.264
ACCELEROMETER	100Hz	3 axes	100	ASCII
GYROSCOPE	100Hz	3 axes	100	ASCII
MAGNETOMETER	10Hz	3 axes	100	ASCII

Tabella 2: Gaze Data structure (Nasrabadi and Alonso, 2022)

GAZE DATA			
TYPE	GAZE DATA	Variable Keyword	Details
MEASUREMENTS FOR BOTH EYES	2D Gaze point	Gaze2D	Gaze location in the scene video frame coordinates
	3D Gaze point	Gaze3D	Gaze location in egocentric space mm
MEASUREMENTS FOR EACH EYE	Pupil diameter (mm)	Pupildiameter	Pupil diameter for each eye
	3D Gaze direction	Gaze direction	A unit 3D vector signaling the gaze direction of each eye
	3D gaze origin	Gazeorigin	Location of each eye in mm in egocentric space



Figura 3. 5. Occhiali Tobii Pro Glasses 3 (2) (www.srlabs.it/tobii-pro-glasses3-understanding-human-behaviour/)

3.4 Prove con Eyetracking per sollecitare il carico cognitivo

Questo lavoro di tesi si concentra prevalentemente sull'utilizzo della tecnologia Eyetracking per misurare i parametri fisiologici sottoponendo i soggetti a carichi cognitivi differenti.

Gli occhiali Tobii Pro Glasses possono essere utilizzati per misurare il carico cognitivo dell'uomo attraverso l'analisi dei movimenti oculari e della fissazione degli occhi durante lo svolgimento di una determinata attività. Durante la sperimentazione, si può registrare il tempo impiegato dai partecipanti per completare un determinato compito, nonché il numero di errori commessi. Inoltre, gli occhiali Tobii possono essere utilizzati per tracciare i movimenti oculari dei partecipanti e identificare le aree dello schermo su cui si concentrano maggiormente, le AOI. Queste informazioni possono essere utilizzate per valutare il carico cognitivo dei partecipanti durante lo svolgimento del compito.

È stato condotto un esperimento in laboratorio prendendo spunto da altre prove presenti in letteratura, in particolare quella di Zhonh e al. e di Tokuda e al. del 2011.

Zhong e al. hanno condotto un esperimento per studiare come la forma di esposizione di informazioni statistiche impattasse sul tempo di lettura, sull'accuratezza e sul diametro della pupilla. (Zhong et al., 2011). Si voleva quindi studiare rispettivamente l'efficienza della lettura, l'accuratezza e il carico cognitivo, murando i parametri con il tracker oculare Tobii T120.

Le informazioni statistiche si potevano presentare sottoforma di testo, grafico o grafico e testo, identificate come AOI. Ovviamente, ogni forma ha un impatto differente su chi la legge.

L'esperimento ha mostrato che il tempo di lettura, quindi l'efficienza, è senza dubbio più breve nel grafico piuttosto che nel testo o nel grafico con testo, perché è immediatamente più intuitivo.

Per quanto riguarda l'accuratezza non ci sono state differenze significative tra le forme. Il carico cognitivo invece, misurato tramite la dilatazione della pupilla, risulta inferiore nel caso del grafico e del grafico con testo piuttosto del solo testo. Questo è un motivo per cui le persone preferiscono i grafici ai lunghi testi.

L'altro esperimento da cui si è preso spunto è quello di Tokueda et al. in cui si propone un nuovo metodo per stimare il carico di lavoro mentale (MWL) di una persona utilizzando le intrusioni saccadiche (Tokuda et al., 2011).

In precedenza, il metodo esistente più accurato per stimare il carico di lavoro mentale era la misura del diametro della pupilla. Tuttavia, il diametro della pupilla non è pratico nell'ambiente di guida di un veicolo perché è eccessivamente sensibile ai cambiamenti di luminosità.

Questo studio ha dimostrato che le SI e il MWL sono correlati.

I partecipanti dovevano condurre un compito uditivo N-back, in modo da aumentare il carico cognitivo, e contemporaneamente dovevano fissare un'immagine che rappresentava una scena di guida. Durante la prova un eye tracker Tobii rilevava i dati oculari.

La prova N-back consisteva nel ricordare la posizione dei numeri ripetuti nella posizione N precedente. Le N utilizzate erano 1, 2, 3 e 4, con un livello di difficoltà sempre crescente. Dopo ogni prova, ogni partecipante esprimeva la propria difficoltà percepita attraverso la scala VAS.

Tutti i partecipanti hanno percepito che il compito ad alto MWL era il più difficile, come previsto. MWL sembrava essere sistematicamente controllato. Si è registrato inoltre che con carichi di lavoro più intensi ci sono state più SI. Anche il diametro della pupilla era correlato all'MWL, ma con meno precisione delle SI.

4. Metriche di tracciamento oculare

Esaminando la letteratura sono emerse delle metriche di tracciamento oculare per misurare il carico cognitivo. Le misure per il carico di lavoro sono esaminate nella tabella 3, indicando per ciascuna la relazione col carico di lavoro, come e/o cosa viene misurata, alcuni studi di esempio come prove a sostegno e i limiti noti.

Tabella 3: metriche di tracciamento oculare correlate al carico cognitivo

Metriche	Misura:	Riferimento paragrafo:
Dimensione della pupilla	Area / mm	4.1
Frequenza ammiccamenti	Conteggio	4.2
Durata ammiccamento	Tempo	4.3
Frequenza di fissazione	Conteggio	4.4
Durata della fissazione	Tempo	4.5
Diffusione di fissazione	Deviazione standard della diffusione	4.6
Durata della saccade	Tempo	4.7
Ampiezza della saccade	Gradi dell'arco visivo	4.8
Velocità saccade	Gradi/tempo	4.9
Rapporto durata fissazione / saccade	Tempo/tempo	4.10
Lunghezza del percorso di scansione	Gradi dell'arco visivo	4.11
Somiglianza del percorso di scansione	Conteggio	4.12
Sguardo all'interno dell'Area di interesse (AOI) / regione di interesse (ROI).	Tempo	4.13
Intrusioni Saccadi	Frequenza	4.14

4.1 Dimensione della pupilla:

- Relazione: con l'aumento del carico di lavoro aumentano le dimensioni della pupilla
- Misurazione (area o mm):_solitamente possono essere utilizzate unità di misura come la larghezza e l'altezza, oppure può essere calcolata come

l'area di un'ellisse ($area = \pi * larghezza * altezza$). Oppure ancora, il diametro della pupilla (Figura 4.1).

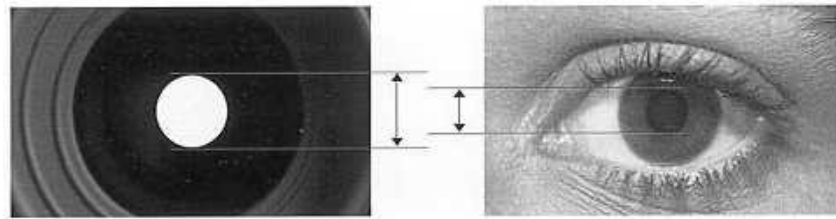


Figura 4. 1. Diametro della pupilla (www.grattavetro.it/la-pupilla-delloccchio-e-la-sua-misura/)

- **Evidenza:** La dilatazione della pupilla è un sistema nervoso simpatico autonomo che riesce ad esprimere indici di attenzione, stress, interesse o emozione ed è correlato al carico di lavoro mentale e all'eccitazione. È stato fatto uno studio su degli alunni con la tecnologia in questione per misurare il grado di difficoltà di un compito: chi ha mostrato maggiore difficoltà ha avuto una maggiore dilatazione della pupilla (Bergstrom and Schall, 2014). Nel 1966 Beatty e Kahneman condussero due compiti di memoria, uno a breve termine e uno a lungo termine, e trovarono per entrambi che le pupille si dilatavano all'aumentare del carico cognitivo (Beatty and Kahneman, 1966). Da allora, molti ricercatori hanno confermato questa relazione. Ciò si è dimostrato vero per: compiti di controllo del traffico aereo (Ahlstrom and Friedman-Berg, 2006), compiti anti-guerra aerea (Van Orden et al., 2001), compiti di volo simulato (Yang et al., 2014), compiti di guida simulati (Palinko et al., 2010), compiti aritmetici (Marshall, 2002; Stone and Lee, 2004), risoluzione di problemi di ragionamento fisico (Muldner et al., 2009), compiti di elaborazione testi e lettura (Gwizdka, 2014), compiti con dispositivi mobili (Szulewski et al., 2014) e altri compiti di stimolo del computer (Pomplun and Sunkara, n.d.). Poiché la dimensione della pupilla ha dimostrato di essere una misura affidabile correlata ai cambiamenti del carico di lavoro, i produttori di eye-tracking come SensoMotoric Instruments (SMI) hanno incorporato una misura diretta dello sforzo cognitivo dell'utente utilizzando l'Indice di attività cognitiva (Marshall, 2002) – sviluppato da EyeTracking, Inc.– come misura del carico di lavoro basato sulle variazioni di dilatazione della pupilla.
- **Limitazioni:** le pupille si restringono e si dilatano per motivi naturali, anche non correlati al carico di lavoro. I due motivi principali sono la regolazione della luce e la profondità visiva (Zhong et al., 2011)(Kramer, 1990). Le differenze individuali, poiché le persone hanno una fisiologia variabile, fanno sì che le persone abbiano la dimensione della pupilla diversa. L'apparecchiatura di tracciamento oculare può anche presentare dei

problemi nei dati grezzi, ad esempio a causa delle diverse angolazioni della telecamera e dei riflessi degli occhiali.

4.2 Frequenza ammiccamenti

- Relazione 1: la frequenza degli ammiccamenti diminuisce con l'aumento del carico percettivo.
- Relazione 1: La frequenza degli ammiccamenti aumenta con l'aumento del carico cognitivo.
- Misurazione: (conteggio) Poiché le pupille non possono essere registrate durante un ammiccamento, gli ammiccamenti vengono conteggiati come istanze nel tempo in cui non vengono registrati i dati della pupilla. Tipicamente, la stima della pupilla contiene anche criteri sulle dimensioni in modo da rilevare meglio gli effettivi ammiccamenti. Questo è chiamato criterio dell'aspetto della pupilla, il rapporto tra la larghezza e l'altezza, dove un'impostazione di 0,60 è un buon punto di partenza. La durata di un battito di ciglia è di 100-300 ms (Bodala et al., 2014).
- Evidenza: La ricerca mostra prove dell'esistenza di entrambe le relazioni (Recarte et al., 2008). In un'attività anti-guerra aerea, principalmente come attività di memoria di identificazione del bersaglio, Orden et al. hanno scoperto che la frequenza degli ammiccamenti diminuisce all'aumentare del carico di lavoro (Van Orden et al., 2001). Il loro studio presentava un carico percettivo significativo poiché utilizzavano un compito di memoria visuospatiale. Questa relazione per la diminuzione della frequenza degli ammiccamenti per l'aumento del carico visivo è stata trovata in altri compiti visivamente impegnativi, come pilotare un aereo (Wilson, 2002) e condurre interventi chirurgici (Zheng et al., 2012). D'altra parte, quando il carico cognitivo (definito come processi mentali a parte il sistema visivo) aumenta, è stato riscontrato che le frequenze degli ammiccamenti aumentano. Ad esempio, Savage et al. hanno trovato questa relazione per un'attività di guida in cui i conducenti avevano il compito di rilevare i pericoli della strada in funzione della preoccupazione per un problema di una precedente conversazione telefonica (Savage et al., 2013). Benedetto e coll. hanno riscontrato risultati simili durante un'attività di cambio di corsia in cui il carico cognitivo è stato aumentato introducendo un sistema informativo all'interno del veicolo (Benedetto et al., 2011).
- Limitazioni: Il problema principale è con le due relazioni in competizione, dove la frequenza degli ammiccamenti diminuisce per il carico di lavoro visivo e aumenta per il carico di lavoro cognitivo (elaborazione esecutiva). Questo può essere difficile da differenziare poiché l'elaborazione visiva si

verifica spesso insieme ad altre forme di elaborazione. Successivamente, poiché gli ammiccamenti vengono calcolati in funzione dei dati della pupilla persa, l'algoritmo utilizzato può influenzare la metrica. Ciò è particolarmente problematico quando l'eye-tracker non è in grado di rilevare in modo accurato e coerente le pupille durante periodi di tempo senza ammiccamento, con il risultato di raggruppare dati scadenti. L'impostazione delle soglie di durata minima e massima dell'ammicciamento può alleviare parte di questo tipo di problema. Anche le differenze individuali, dovute alla fisiologia e ad altri fattori, influenzano la frequenza degli ammiccamenti. Infine, i tassi di ammicciamento sono stati attribuiti anche ad altri fattori come l'affaticamento (Stern et al., 1994) e la vigilanza (Mallis and Dinges, 2004)

4.3 Durata ammicciamento

- Relazione 1: con l'aumento del carico cognitivo si nota una diminuzione della durata dell'ammicciamento
- Relazione 2: con l'aumento del carico cognitivo si nota un aumento della durata dell'ammicciamento
- Misurazione (tempo): si misura il periodo di tempo in cui non è stato possibile registrare la pupilla.
- Evidenza: In un compito di controllo del traffico aereo, Ahlstrom et al. hanno trovato durate di ammicciamento più brevi per la condizione di carico di lavoro più elevato in cui aumentavano la difficoltà del compito rimuovendo informazioni, un display meteorologico (Ahlstrom and Friedman-Berg, 2006). In un'attività anti-guerra aerea, un'attività di memoria di identificazione del bersaglio, Orden et al. hanno anche scoperto che la durata dell'ammicciamento diminuisce con l'aumentare del carico di lavoro (con una maggiore densità di target) (Van Orden et al., 2001). Infine, in un compito di volo simulato in cui il carico di lavoro è stato aumentato introducendo un compito aggiuntivo e variando la difficoltà dello scenario, Veltman e Gaillard hanno trovato risultati in accordo con i due studi su menzionati (Veltman and Gaillard, 1996). La durata dell'ammicciamento è diminuita con un carico di lavoro più elevato. D'altra parte, ci sono alcune prove che mostrano la relazione opposta, dove la durata dell'ammicciamento aumenta per le condizioni di carico cognitivo più elevato (Benedetto et al., 2011). Benedetto e colleghi hanno scoperto che l'interazione con un sistema informativo all'interno del veicolo accorcia i battiti di ciglia, ma che la durata dei battiti di ciglia aumenta con l'aumentare del tempo trascorso alla guida.

- Limitazioni: L'apparente contraddizione nelle due relazioni è la principale preoccupazione nell'usare la durata dell'ammicciamento come indicatore del carico di lavoro. Non è ancora chiaro come i battiti di ciglia siano influenzati dal carico di lavoro cognitivo (Benedetto et al., 2011). Oltre a questa sfida, la durata degli ammiccamenti subisce i limiti della metrica della frequenza degli ammiccamenti.

4.4 Frequenza di fissazione

- Relazione: aumentando il carico cognitivo si ha un aumento della frequenza di fissazione
- Misurazione (conteggio): Le fissazioni vengono calcolate come eventi di fissazione dai dati. Un evento di fissazione contiene un centroide (solitamente in coordinate normalizzate), un'ora di inizio e un'ora di fine. Le fissazioni possono essere derivate utilizzando 2 metodi più comuni: o con un algoritmo basato sulla dispersione o con uno basato sulla velocità. Basato sulla dispersione è più adatto per eye-tracker a bassa frequenza (inferiore a 200 Hz) (Martinez-Conde et al., 2000). L'algoritmo basato sulla dispersione utilizza due parametri di soglia: il tempo minimo di una fissazione (durata della fissazione, tipicamente impostato a 100 ms) e la distanza di dispersione tra i singoli punti dati dello sguardo (tipicamente impostata su un grado d'arco) (Holmqvist et al., 2011). In breve, l'algoritmo prima raggruppa dati sufficienti in modo che entrambe le soglie siano soddisfatte.
- Evidenza: Mentre le fissazioni possono essere utilizzate come metrica di conteggio generale per approssimare l'allocazione dell'attenzione visiva, il consenso generale è che più fissazioni equivalgono a un aumento del carico di lavoro. In un compito anti-guerra aerea, un compito di memoria di identificazione del bersaglio, Orden et al. hanno scoperto che si verificavano più fissazioni all'aumentare del carico di lavoro (con una maggiore densità di target) (Van Orden et al., 2001). Allo stesso modo, Wang et al. hanno rilevato che i partecipanti si fissavano di più durante lo svolgimento di attività di shopping online su siti Web con maggiore complessità (Wang et al., 2014). Le fissazioni possono essere correlate al carico di lavoro poiché una maggiore ricerca visiva o attenzione focalizzata si svolge all'interno di aree specifiche di importanza percepita (Goldberg and Kotval, 1999).
- Limitazioni: la sfida principale è capire che le fissazioni si verificano naturalmente per dirigere l'attenzione visiva. Pertanto, si consiglia vivamente di controllare gli stimoli visivi tra le condizioni (ad esempio, colori più accesi potrebbero aumentare le fissazioni).

4.5 Durata della fissazione:

- Relazione: aumentano il carico di lavoro aumenta anche la durata della fissazione
- Misurazione (tempo): si misura da quando inizia a quando finisce la fissazione. Si solito si calcola la media di tutte le fissazioni.
- Evidenza: La letteratura è coerente nel rilevare che le persone tendono a fissarsi per periodi di tempo più lunghi quando la complessità aumenta, aumentando la difficoltà di estrazione delle informazioni (Holmqvist et al., 2011; Jacob and Karn, 2003; Just and Carpenter, 1976). Questa relazione è stata trovata in: compiti di memoria di identificazione del bersaglio (Van Orden et al., 2001), compiti di guida pericolosa (Underwood et al., 2002), compiti di shopping online (Wang et al., 2014), e compiti di volo simulato (Yang et al., 2014). Sono state fatte alcune altre interpretazioni sul significato di fissazioni più lunghe. Mentre fissazioni più lunghe potrebbero indicare un'elaborazione più profonda, potrebbero anche indicare un'elaborazione superficiale, come nel sogno ad occhi aperti (Holmqvist et al., 2011), o potrebbero essere un'indicazione di una strategia più efficiente durante gli stimoli in rapido movimento. Infine, come per la frequenza di fissazione, la durata della fissazione potrebbe essere utilizzata per determinare l'allocazione dell'attenzione in specifiche aree di interesse (Breslow et al., 2014).
- Limitazioni: La durata della fissazione contiene limitazioni simili alle misure della frequenza di fissazione. Più tempo trascorso a guardare un'area potrebbe essere semplicemente dovuto al fatto che è più saliente. L'altra sfida è fare attenzione a non equiparare la fissazione alla cognizione, poiché il sogno ad occhi aperti può indurre un individuo a fissare un posto senza scopo.

4.6 Diffusione di fissazione:

- Relazione: aumentando il carico cognitivo diminuisce la diffusione della fissazione.
- Misurazione (deviazione standard della diffusione): La diffusione della fissazione può essere misurata come la dispersione tra più fissazioni in una specifica area di interesse. Questo viene tipicamente fatto prendendo la deviazione standard per le coordinate di fissazione orizzontale e verticale, fornendo uno spreadf o ogni dimensione.
- Evidenza: all'interno di compiti di guida simulati in cui ai partecipanti era richiesto di rilevare o navigare in un pericolo, è stato riscontrato che la

diffusione della fissazione si riduce quando la difficoltà del compito aumenta (Savage et al., 2013; Underwood et al., 2003).

- Limitazioni: poiché le prove riportate si basano esclusivamente sulla scansione visiva delle attività di guida, è necessario indagare se relazioni simili possono essere trovate all'interno di altri domini.

4.7 Durata della saccade:

- Relazione: aumentando il carico di lavoro diminuisce la durata della saccade.
- Misurazione (tempo): si misura il periodo di tempo tra l'inizio e la fine della saccade. Si utilizza di solito la durata totale della saccade o la durata media.
- Evidenza: si suggerisce che durate saccadiche più lunghe e durate saccadiche medie maggiori indichino una riduzione dell'elaborazione (Holmqvist et al., 2011). La diminuzione dell'elaborazione si riferisce alla riduzione del carico di lavoro cognitivo.
- Limitazioni: poiché l'identificazione delle saccadi, e quindi la durata delle saccadi, si basa sull'identificazione delle fissazioni, le misure delle saccadi possono avere limitazioni simili a quelle relative alla misurazione delle fissazioni. Inoltre, le saccadi si verificano in funzione degli stimoli visivi dell'ambiente e, pertanto, il confronto delle condizioni dovrebbe tenere conto di questi disturbi visivi. Le interpretazioni del carico di lavoro non sono consigliate per questa metrica poiché è necessaria una maggiore convalida è necessaria la ricerca.

4.8 Ampiezza della saccade:

- Relazione: aumentando il carico di lavoro diminuisce l'ampiezza della saccade.
- Misurazione (gradi dell'arco visivo): L'ampiezza della saccade è tipicamente una misura dei gradi di movimento dell'arco visivo da una fissazione all'altra. Il calcolo dell'ampiezza richiede la trigonometria utilizzando la distanza dall'occhio allo schermo/oggetto e la distanza tra le due fissazioni che circondano la saccade. La media di tutte le ampiezze delle saccadi è la metrica più comunemente utilizzata per misurare il carico di lavoro.
- Evidenza: è stato riscontrato che, con coerenza, l'ampiezza diminuisce all'aumentare del carico di lavoro. Questa relazione è stata trovata per: un compito di morte visuospatiale (Van Orden et al., 2001), compiti di guida simulata (Underwood et al., 2002), compiti di volo simulato (Yang et al.,

2014) e in compiti visivi seriali paralleli. attività di ricerca (Zelinsky & Sheinberg, 1997). All'interno delle attività di ricerca in particolare, è stato riscontrato che le ampiezze saccadiche medie più piccole indicano inefficienza di ricerca (Goldberg and Kotval, 1999) e possono indicare una maggiore difficoltà di ricerca (Zelinsky and Sheinberg, 1997). Tuttavia, ampiezze maggiori delle saccadi potrebbero anche semplicemente indicare che l'attenzione viene attirata meglio a distanza (Goldberg et al., 2002; Inamdar and Pomplun, 2003)

- Limitazioni: l'ampiezza delle saccadi potrebbe ereditare le limitazioni dalle durate delle saccadi poiché sono strettamente correlate tra loro. Inoltre, la comprensione dei possibili fattori di confusione, che farebbero muovere gli occhi a distanze maggiori o minori, è importante per rendere più affidabili le interpretazioni del carico di lavoro.

4.9 Velocità saccade:

- Relazione: aumentando il carico di lavoro aumenta la velocità della saccade
- Misurazione (gradi/tempo): si misura come valore medio. La velocità è calcolata come i gradi dell'arco visivo percorsi durante la durata della saccade.
- Evidenza: è stato riscontrato che la velocità saccadica di picco media aumenta con il carico di lavoro. Bodalà et al. (2014) hanno trovato questa relazione in un compito visivo in cui i partecipanti dovevano identificare e distinguere varie sequenze di immagini (Bodala et al., 2014).

Hanno scoperto che erano necessarie saccadi più veloci per recuperare le informazioni necessarie per completare l'attività quando diventava più complessa. Allo stesso modo, Savage et al. (Savage et al., 2013) hanno riscontrato un aumento delle velocità saccadiche di picco aumentando la difficoltà di un'attività di guida pericolosa. In questo studio, i partecipanti erano preoccupati per un problema di ragionamento derivante da una precedente conversazione telefonica nella condizione di maggiore difficoltà. Mentre lo studio di Bodala e colleghi ha dimostrato effetti di carico percettivo, Savage e colleghi hanno dimostrato più effetti di carico cognitivo.

- Limitazioni: essendo dipendente dalla durata e dall'ampiezza della saccade, la velocità eredita le loro limitazioni.

4.10 Rapporto durata fissazione/Saccade:

- Relazione: aumentando il carico di lavoro aumenta il rapporto fissazione/saccade
- Misurazione (Tempo/Tempo): è il rapporto tra la durata della fissazione e le saccadi
- Evidenza: In una valutazione dell'interfaccia del computer tra un progetto "buono" e uno "scarso", è stato suggerito che rapporti più elevati corrispondono a una maggiore elaborazione o a una minore attività di ricerca (Goldberg and Kotval, 1999). Definiscono il rapporto come il tempo impiegato per l'elaborazione delle informazioni rispetto al tempo impiegato per la ricerca di informazioni. Ciò è coerente con la relazione di durate di fissazione più lunghe all'aumentare del carico di lavoro. È anche coerente con la relazione di durate saccadi più brevi, che potrebbero verificarsi a causa di velocità saccadi più elevate, all'aumentare del carico di lavoro.
- Limitazioni: ci sono prove a sostegno basate su metriche correlate (durata della fissazione, durata della saccade e velocità della saccade) che suggeriscono che vi sia coerenza. Tuttavia, le limitazioni sono meno note poiché questa metrica contiene tutte le limitazioni delle metriche correlate. Inoltre, sono necessarie ulteriori ricerche per convalidare questo rapporto come indicatore del carico di lavoro.

4.11 Lunghezza del percorso di scansione:

- Relazione: aumentando il carico di lavoro aumenta la lunghezza del percorso di scansione
- Misurazione (gradi dell'arco visivo): La lunghezza del percorso di scansione è la somma di tutte le ampiezze delle saccadi ed è misurata in gradi dell'arco visivo. In alternativa, potrebbe essere misurata come la distanza tra tutti i punti delle coordinate di fissazione.
- Evidenza: Goldberg et al. (Goldberg and Kotval, 1999) hanno scoperto che lunghezze di scansioni più lunghe indicano una ricerca meno efficiente nelle attività di ricerca di siti web.
- Limitazioni: sono necessarie ulteriori ricerche per convalidare questa metrica come misura del carico di lavoro.

4.12 Somiglianza del percorso di scansione:

questo è potenzialmente un indicatore per confrontare i risultati delle traiettorie di diversi utenti. Più volte si conta un percorso simile di scansione, più di deve prestare attenzione a quel percorso.

4.13 Sguardo all'interno dell'Area di interesse (AOI)/regione di interesse (ROI):

- Relazione: quando aumenta il carico cognitivo per delle aree di interesse aumenta lo sguardo per quelle aree.
- Misurazione (tempo): i tipi più comuni di misurazioni includono: la percentuale del tempo totale di sguardo trascorso in ciascuna area/regione di interesse, la percentuale di fissazioni totali in ciascuna area/regione di interesse e la percentuale delle durate totali di fissazione (tempo di permanenza) trascorse in ciascuna area/regione di interesse.
- Evidenza: questo è un indicatore della distribuzione dell'attenzione visiva (ad esempio, grado di concentrazione o disattenzione). Potrebbe rilevare una gerarchia di importanza delle informazioni da rilevare. (ad esempio: perché si guardano prima le figure più grandi?). il presupposto di base è che viene speso più tempo a guardare le aree che richiedono maggiore attenzione visiva e, quindi, nelle aree in cui si verifica un carico di lavoro maggiore. Questa metodologia è stata utilizzata in compiti di controllo di supervisione (Breslow et al., 2014; Ikuma et al., 2014), compiti di guida simulata (Hwang et al., 2014) e compiti di volo simulato (Yang et al., 2014).
- Limitazioni: questa metrica non è una misura diretta del carico di lavoro poiché le persone potrebbero dedicare tempo a esaminare aree che richiedono un'elaborazione minima e quindi trascorrere meno tempo in aree che richiedono un'elaborazione elevata. Il tempo non dovrebbe essere equiparato al carico di lavoro, ma può essere correlato all'attenzione visiva. Pertanto, si consiglia cautela quando si interpreta lo sguardo all'interno di specifiche aree/regioni di interesse.

Le Mappe di calore delle visualizzazioni sono utilizzate principalmente per l'analisi agglomerata dei modelli di esplorazione visiva degli operatori. Inoltre, le mappe di calore forniscono rappresentazioni grafiche dei dati dove sono rappresentati i singoli valori contenuti in una matrice come colori. Hanno basato l'analisi dell'esplorazione del comportamento dei partecipanti sull'area di interesse come derivato delle rappresentazioni della mappa di calore (Bergstrom and Schall, 2014).



Figura 4. 2. Mappa di calore (Bergstrom and Schall, 2014)

4.14 Le intrusioni saccadi:

sono movimenti oculari improvvisi e involontari che si verificano durante un'attività di lettura o di visione a distanza. Possono causare disturbi visivi temporanei, come la percezione di "salti" nell'immagine o la difficoltà a mantenere la concentrazione su un testo. Le intrusioni saccadi (SI) possono essere causate da una serie di fattori, tra cui la stanchezza, lo stress, la dislessia e alcune condizioni mediche.

Le SI sono un tipo specifico di movimenti oculari, generalmente considerati un sottotipo di movimenti oculari di fissazione. Un episodio di SI è solitamente un viaggio di andata e ritorno da un punto di fissazione dello sguardo; lo sguardo devia dal punto di fissazione originale e poi ritorna rapidamente. La figura 4.3 mostra alcuni esempi di SI durante una fissazione.

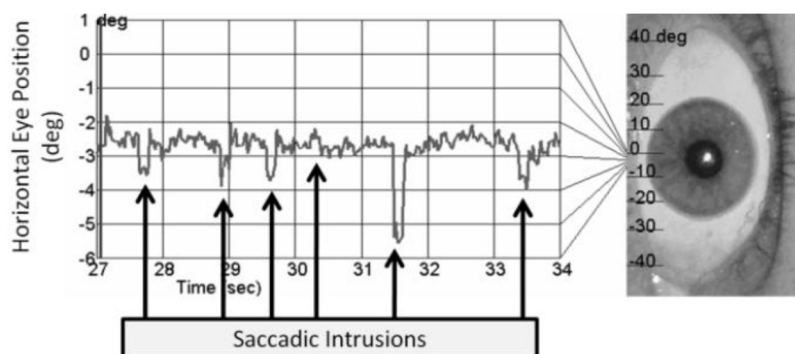


Figura 4. 3. Intrusioni saccadi (Tokuda et al., 2011)

- Relazione: C'è una relazione tra le intrusioni saccadi e il carico cognitivo, poiché l'aumento del carico cognitivo può aumentare la frequenza e la durata delle intrusioni saccadi, che può causare disturbi della visione e della concentrazione

Il carico cognitivo si riferisce alla quantità di attenzione, memoria e elaborazione delle informazioni richieste per completare un compito. Ad esempio, la lettura di un testo complesso o la risoluzione di un problema matematico possono richiedere un alto carico cognitivo. Durante queste attività, l'occhio deve effettuare molti movimenti rapidi per seguire il testo o gli elementi del problema, il che può aumentare la probabilità di intrusioni saccadi.

Inoltre, la stanchezza oculare, una condizione che può essere causata da un lungo utilizzo del computer o da una scarsa illuminazione, può aumentare il carico cognitivo e, di conseguenza, anche le intrusioni saccadi.

- Misurazione: Le intrusioni saccadi possono essere misurate utilizzando diverse tecniche, tra cui:
 1. Registrazione video: utilizzando una telecamera ad alta velocità, le intrusioni saccadi possono essere registrate mentre un individuo legge o guarda un'immagine.
 2. Elettronistagmografia (ENG): questa tecnica utilizza elettrodi per registrare l'attività muscolare degli occhi mentre l'individuo effettua movimenti oculari.
 3. Sistemi di oculometria: questi dispositivi utilizzano la tecnologia infrarossi o luce a raggi X per registrare i movimenti oculari in modo preciso.
 4. Test di lettura: si effettuano test di lettura per valutare la velocità di lettura, la comprensione del testo e il numero di intrusioni saccadi durante la lettura.

Sono generalmente misurate in termini di frequenza, ovvero il numero di intrusioni saccadi che si verificano in un determinato periodo di tempo. La frequenza può essere espressa come numero di intrusioni saccadi per minuto o per ora. Inoltre, la durata delle intrusioni saccadi, ovvero il tempo che dura ciascuna intrusione, può essere misurato in millisecondi.

Inoltre, le intrusioni saccadi possono essere anche descritte in termini di amplitudine, ovvero la distanza tra la posizione iniziale e quella finale dell'occhio durante la intrusione.

5. Esperimento N-back con Eyetracking

5.1 Descrizione esperimento N-back e fasi operative

Prendendo spunto dall'esperimento N-back di Tokueda et al. analizzato in letteratura, per l'analisi di questa tesi è stato condotto un primo esperimento N-back nel laboratorio Mind4Lab del Politecnico di Torino. Questo esperimento con Eyetracking è stato progettato per analizzare una possibile correlazione tra le metriche misurate con gli occhiali Tobii Pro Glasses 3 e il carico cognitivo. I risultati forniscono una base utile per fare valutazioni su alte sperimentazioni e per spiegare le variazioni delle variabili misurate.

Per l'impostazione dell'esperimento, sono stati utilizzati diversi strumenti e dispositivi, tra cui l'eye-tracker Tobii Pro Glasses 3, le cuffie (nel caso di prova uditiva), un monitor per proiettare le prove da svolgere, una tastiera per rispondere agli input e l'Empatica 4 al polso.



Figura 5. 1. Partecipante durante prova uditiva

Per comprendere meglio il concetto delle prove, sono presentate le immagini seguenti:

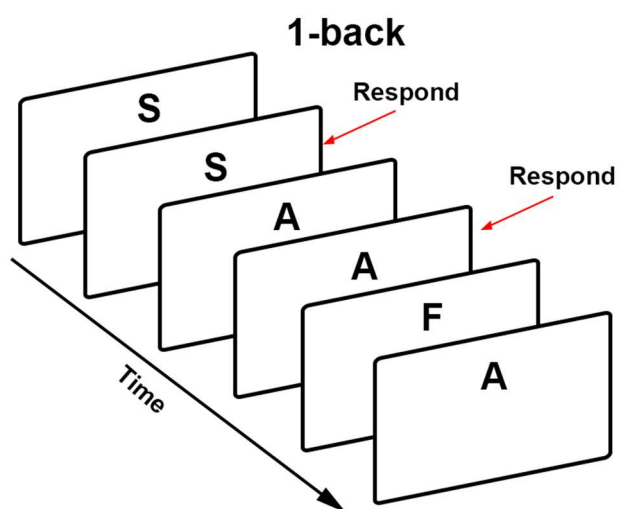


Figura 5. 2. 1-back (https://andysbrainbook.readthedocs.io/en/latest/ASL/fASL_03_Task.html)

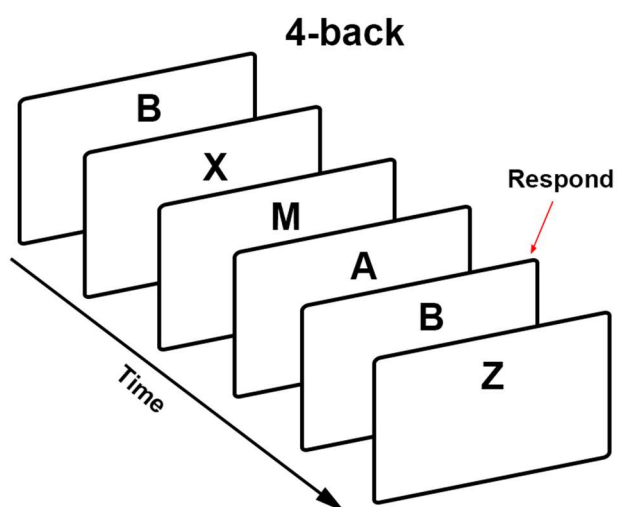


Figura 5. 3. 4-back (https://andysbrainbook.readthedocs.io/en/latest/ASL/fASL_03_Task.html)

La *figura 5.2* mostra l'1-back, ovvero la prova in cui il partecipante risponde nel momento in cui sente lo stesso input nella posizione consecutiva (A-A; S-S, ...).

La *figura 5.3* mostra invece il 4-back, ovvero la prova in cui il partecipante risponde nel momento in cui sente lo stesso input dopo 4 posizioni dal primo input.

Le prove 2-back e 3-back funzionano in modo simile, con la differenza che l'input in cui il partecipante deve rispondere si trova rispettivamente alla seconda posizione e alla terza posizione.

Lo scopo dell'utilizzo dell'N-back è stato quello di voler aumentare la complessità e quindi di richiedere un maggiore sforzo cognitivo del partecipante. L'attività 1-back è la più semplice, mentre le attività 3-back e 4-back sono le più impegnative, richiedendo un maggiore sforzo cognitivo da parte dei partecipanti.

Lo studio ha coinvolto tre diverse prove: uditive, visive e visuospatiali. Nella prova uditiva, i partecipanti dovevano ascoltare una sequenza numerica, nella prova visiva dovevano osservare i diversi colori di un quadratino, mentre nella prova visuospatiali dovevano osservare le diverse posizioni di un quadratino all'interno di una griglia 3x3.

Per rispondere agli input, i partecipanti dovevano premere sulla tastiera il seguente tasto:

- la freccia verso sinistra per la prova uditiva;
- la freccia verso il basso per la prova visiva;
- la freccia verso destra per la prova visuospatiali.

La sequenza di numeri o di colori o di posizioni era di 30 item, con un intervallo di 3 secondi tra un item e l'altro.

I singoli test sono stati eseguiti tramite l'utilizzo della piattaforma: <https://www.trainingcognitivo.it/GC/NBack/>.

Impostazioni

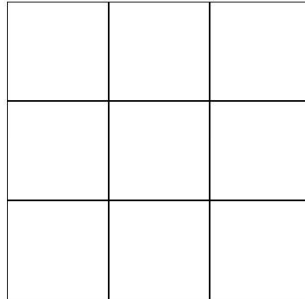
Nome	<input type="text" value="Partecipante 1"/>
Lunghezza griglia (unità)	<input type="text" value="3"/>
Span	<input type="text" value="1"/>
Tempo di latenza (ms)	<input type="text" value="3000"/>
Numero di item	<input type="text" value="30"/>
Modalità di gioco	<input type="text" value="Uditiva"/>

Figura 5. 4. Impostazione prova sulla piattaforma Dual N-Back (trainingcognitivo.it)

- Nella voce “Span” andava inserito il tipo di prova “N”: 1, 2, 3 o 4.
- Nel “Tempo di latenza” in ms andava inserito l’intervallo tra un input e l’altro, quindi 3000 ms.
- Nel “Numero di item” andava inserita la lunghezza della sequenza, ovvero 30.
- La “Modalità di gioco” veniva impostata tra uditiva, visiva o visuospaziale.

A seconda di quest’ultima selezione il partecipante aveva un desktop differente (e di conseguenza una AOI differente):

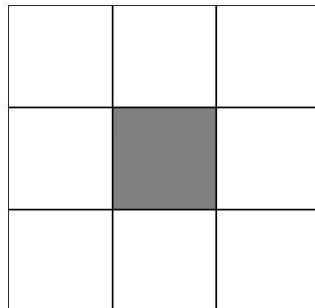
Dual N-Back



2/30

Figura 5. 5. Desktop prova uditiva Dual N-Back (trainingcognitivo.it)

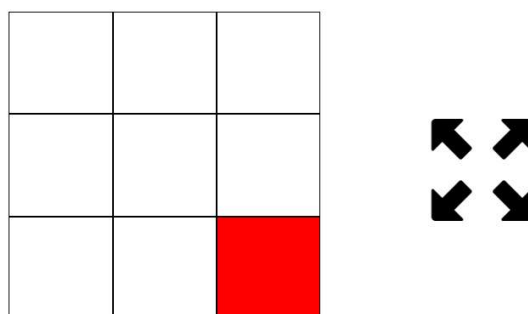
Dual N-Back



3/30

Figura 5. 6. Desktop prova visiva Dual N-Back (trainingcognitivo.it)

Dual N-Back



2/30

Figura 5. 7. Desktop prova visuospatiale Dual N-Back (trainingcognitivo.it)

Nello studio sono state coinvolte un totale di 9 persone, di cui 6 ragazzi e 3 ragazze. Tre partecipanti hanno svolto la prova uditiva, altri tre la prova visiva e gli ultimi tre la prova visuospatiale.

Affinché venisse assicurata una corretta registrazione dei movimenti oculari, prima di iniziare sia la fase di training che la fase di test, l'eye-tracker è stato calibrato per ogni partecipante.

L'ordine delle prove N-back è stato randomizzato per evitare effetti di ordine. Ogni singola prova ha avuto una durata approssimativa di 100 secondi, quindi l'intera sessione di training e test ha richiesto circa 45 minuti di impegno da parte dei partecipanti.

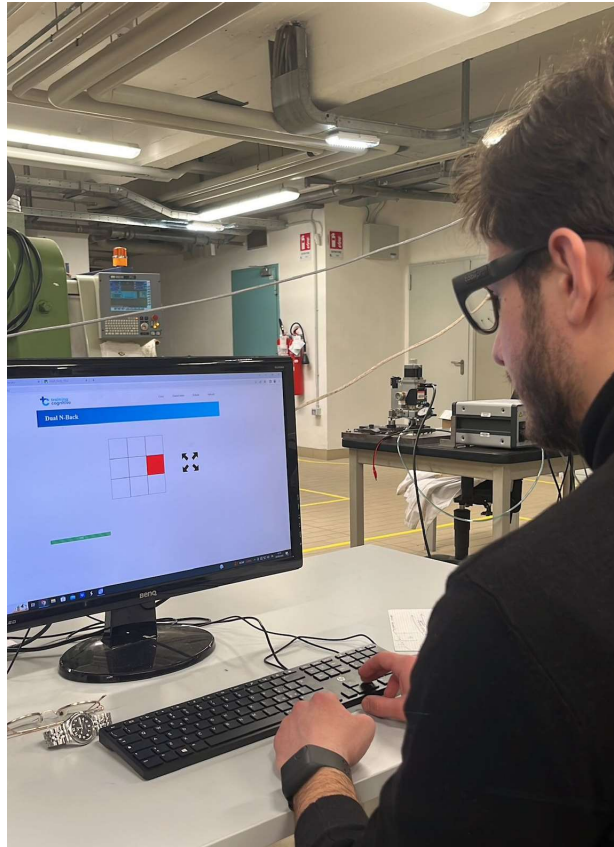


Figura 5. 8. Partecipante durante prova visuospatiale

Prima di avviare il test effettivo, è stata svolta una fase iniziale in cui è stata spiegata ai partecipanti la tipologia di prova che avrebbero affrontato. Successivamente, sono stati sottoposti a un training composto da otto prove: due prove 1-back, due prove 2-back, due prove 3-back e due prove 4-back. Questa fase di training è stata utile per valutare la difficoltà percepita da ciascun individuo e identificare quali livelli di difficoltà potessero essere considerati "facili", "medi" e "difficili".

Una volta completata la fase di training, si è passati alla fase di test con un totale di 12 prove selezionate in modo randomizzato: quattro prove di livello facile, quattro di livello medio e quattro di livello difficile. Per tutti i partecipanti, il livello facile è stato identificato come 1-back, il livello medio come 2-back e il livello difficile come 3-back. Questo è stato possibile valutarlo perché nella fase di training la prova 4-back otteneva un'accuratezza minore dell'80%, risultato estremamente complicata.

Alla fine di ogni singola prova, i partecipanti hanno dovuto valutare la difficoltà percepita utilizzando una scala VAS (Visual Analogue Scale) con un intervallo da

0 (per niente difficile) a 100 (estremamente difficile), generata utilizzando il sito: http://www.vasgenerator.net/index_adv.php.

Per registrare la valutazione della difficoltà percepita (Scala VAS):

1. *Figura 5.9:* è stata configurata la scala VAS inserendo i parametri richiesti dalla piattaforma;
2. *Figura 5.10:* i partecipanti hanno inserito una "X" sulla scala e cliccato su "continua" per registrare la loro valutazione;
3. *Figura 5.11:* i risultati sono stati letti nella barra superiore della piattaforma e riportati nel foglio Excel.

1 Set the parameters stated below and click "generate/modify VAS". Default values are pre-selected.

Length: pixel

Measurement resolution: [i.e. number of (discrete) points to click]

Width: light medium bold

Left Anchor:

Right Anchor:

Color: black white

Marker: cross (X) arrow (▼) point (•) line (|)

2 Mark the scale and click "read out VAS value" to see the value that will be transmitted. Modify the VAS according to your needs and apply changes by clicking "generate/modify VAS".

per niente difficile ————— estremamente difficile

Figura 5. 9. Configurazione scala VAS (http://www.vasgenerator.net/index_adv.php)

per niente difficile ————— X ————— estremamente difficile

Figura 5. 10. Visualizzazione scala VAS (http://www.vasgenerator.net/index_adv.php)

www.vasgenerator.net/YOUR_NEXT_PAGE.html?THIS_VAS_NAME=36

Figura 5. 11. Risultato leggibile scala VAS (http://www.vasgenerator.net/index_adv.php)

Durante le prove si prendeva nota su un foglio Excel dell'accuratezza ottenuta (riportata dalla piattaforma, ottenuta come numero di risposte corrette sul totale

di trial), delle valutazioni VAS e di eventuali percezioni dell'utente durante la prova (se ad esempio era stanco o meno).

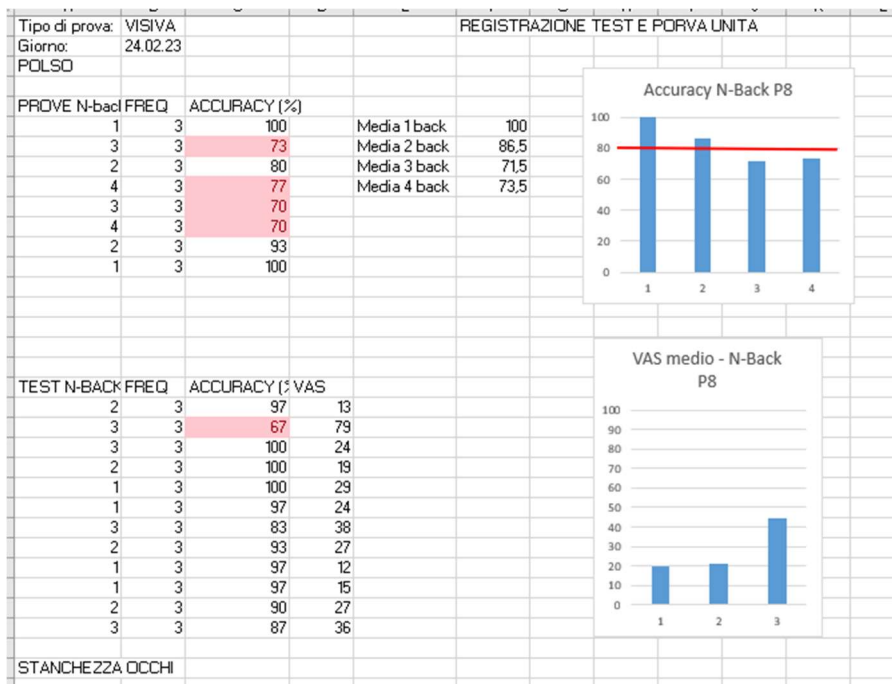


Figura 5. 12. Esempio foglio Excel durante la prova

Prima di analizzare i risultati ottenuti dalle metriche misurate, riportate nella tabella sottostante (tabella 4), è importante capire la differenza tra "fixation" (fissazione), "glance" (sguardo) e saccade (figura 5.13).

Le fissazioni rappresentano periodi di stabilità e concentrazione su un punto di interesse specifico, gli sguardi sono movimenti rapidi tra punti di interesse senza fermarsi su ciascun punto e permettono di valutare la distribuzione visiva, mentre le saccadi sono i rapidi movimenti oculari tra un punto di interesse e l'altro che connettono le fissazioni e gli sguardi. L'analisi e la comprensione di questi diversi comportamenti visivi permettono di studiare l'attenzione visiva, la percezione e l'elaborazione delle informazioni visive da parte degli individui.



Figura 5. 13. Saccadi (logopedistantognozzi.it/dislessia-e-movimenti-oculari/)

5.1.1 Metriche Eyetracking misurate

Di seguito, nella tabella 4, le metriche eye-tracking fornite da Tobii Pro Lab:

Tabella 4: Metriche Tobii Pro Lab (https://connect.tobii.com/s/article/understanding-tobii-pro-lab-eye-tracking-metrics?language=en_US)

Metriche Eyetracking	Misura
<i>Total_duration_of_fixations</i>	La durata totale delle fissazioni indica quanto tempo complessivo è stato trascorso a fissare specifici punti di interesse o regioni d'interesse nell'ambito dello studio.
<i>Average_duration_of_fixations</i>	Questa metrica rappresenta la durata media delle fissazioni. Viene calcolata dividendo la durata totale delle fissazioni per il numero di fissazioni registrate.
<i>Minimum_duration_of_fixations</i>	Indica la durata minima registrata tra tutte le fissazioni rilevate nello studio.
<i>Maximum_duration_of_fixations</i>	Questa metrica rappresenta la durata massima registrata tra tutte le fissazioni rilevate nello studio.
<i>Number_of_fixations</i>	Il numero totale di fissazioni rilevate durante lo studio, ovvero quante volte il soggetto ha focalizzato il proprio sguardo su specifici punti di interesse.
<i>Time_to_first_fixation</i>	Il tempo trascorso dal momento in cui viene presentato un punto di interesse fino al momento in cui il soggetto effettua la prima fissazione su di esso.
<i>Duration_of_first_fixation</i>	La durata della prima fissazione, ovvero quanto tempo il soggetto ha mantenuto lo sguardo fisso sul primo punto di interesse dopo la sua presentazione.
<i>Average_pupil_diameter</i>	La dimensione media della pupilla durante le fissazioni. Questa metrica può fornire indicazioni sulla dilatazione o costrizione della pupilla in relazione agli stimoli visuali.
<i>Total_duration_of_whole_fixations</i>	La durata totale delle fissazioni su un'area di interesse specifica considerando anche gli spostamenti del gaze all'interno di quella regione.

<i>Average_duration_of_whole_fixations</i>	La durata media delle fissazioni complete su un'area di interesse specifica.
<i>Minimum_duration_of_whole_fixations</i>	La durata minima registrata tra tutte le fissazioni complete su un'area di interesse specifica.
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations</i>	La durata massima registrata tra tutte le fissazioni complete su un'area di interesse specifica.
<i>Number_of_whole_fixations</i>	Il numero totale di fissazioni complete su un'area di interesse specifica.
<i>Time_to_first_whole_fixation</i>	Il tempo trascorso dal momento in cui viene presentata un'area di interesse specifica fino al momento in cui il soggetto effettua la prima fissazione completa su di essa.
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	La durata della prima fissazione completa su un'area di interesse specifica.
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter</i>	La dimensione media della pupilla durante le fissazioni complete su un'area di interesse specifica.
<i>Total_duration_of_Visit</i>	La durata totale delle visite indica quanto tempo è stato trascorso nell'analisi di una specifica area o punto di interesse.
<i>Average_duration_of_Visit</i>	La durata media delle visite, calcolata dividendo la durata totale delle visite per il numero di visite registrate.
<i>Minimum_duration_of_Visit</i>	La durata minima registrata tra tutte le visite rilevate nello studio.
<i>Maximum_duration_of_Visit</i>	La durata massima registrata tra tutte le visite rilevate nello studio.
<i>Number_of_Visits</i>	Il numero totale di visite registrate per un'area o punto di interesse specifico.
<i>Time_to_first_Visit</i>	Il tempo trascorso dal momento in cui viene presentato un'area o punto di interesse fino al momento in cui viene registrata la prima visita.
<i>Duration_of_first_Visit</i>	La durata della prima visita registrata per un'area o punto di interesse specifico.

<i>Total_duration_of_Glances</i>	La durata totale degli sguardi indica quanto tempo è stato trascorso a guardare un'area specifica, senza necessariamente considerare le fissazioni.
<i>Average_duration_of_Glances</i>	La durata media degli sguardi, calcolata dividendo la durata totale degli sguardi per il numero di sguardi registrati.
<i>Minimum_duration_of_Glances</i>	La durata minima registrata tra tutti gli sguardi rilevati nello studio.
<i>Maximum_duration_of_Glances</i>	La durata massima registrata tra tutti gli sguardi rilevati nello studio.
<i>Number_of_Glances</i>	Il numero totale di sguardi registrati per un'area specifica.
<i>Time_to_first_Glance</i>	Questa metrica indica il tempo trascorso dal momento in cui viene presentato un punto di interesse fino al momento in cui viene registrato il primo sguardo su di esso. È essenzialmente il tempo che l'individuo impiega per posizionare il suo sguardo sul punto di interesse dopo che è stato presentato.
<i>Duration_of_first_Glance</i>	Questa metrica rappresenta la durata del primo sguardo registrato sul punto di interesse. Indica quanto tempo l'individuo mantiene il proprio sguardo su quel punto di interesse specifico dopo averlo fissato per la prima volta.
<i>Number_of_saccades_in_AOI</i>	Il numero totale di saccadi registrate all'interno di un'area di interesse specifica.
<i>Time_to_entry_saccade</i>	Il tempo trascorso dal momento in cui viene presentata un'area di interesse fino al momento in cui viene rilevata la prima saccade che entra in quella regione.
<i>Time_to_exit_saccade</i>	Il tempo trascorso dal momento in cui viene presentata un'area di interesse fino al momento in cui viene rilevata la prima saccade che esce da quella regione.
<i>Peak_velocity_of_entry_saccade</i>	La velocità massima raggiunta durante la saccade che entra nell'area di interesse.

<i>Peak_velocity_of_exit_saccade</i>	La velocità massima raggiunta durante la saccade che esce dall'area di interesse.
--------------------------------------	---

Queste metriche consentono di analizzare e comprendere il comportamento visivo degli individui durante uno studio di eye-tracking, fornendo informazioni sulla durata, il numero, la sequenza e la dimensione delle fissazioni e delle fissazioni complete su punti e regioni di interesse specifici.

Per alcuni partecipanti nell'esportazione dei dati risultano celle mancanti, specialmente nelle metriche "Time_to_entry_saccade"; "Time_to_exit_saccade"; "Peak_velocity_of_entry_saccade"; "Peak_velocity_of_exit_saccade".

Le variabili indipendenti valutate sono state:

- Difficoltà n-back (1, 2 e 3)
- Tempo (Trial)/abitudine
- Difficoltà percepita VAS (solo per le prove effettive).

5.2 Analisi dei risultati esperimento base

Grazie al software di analisi Tobii Pro Lab è stato possibile raccogliere e analizzare i dati relativi ai movimenti oculari. Una volta estratti i dati, sono stati analizzati su Microsoft Excel.

Durante la fase di training, è stata eseguita un'analisi per determinare il livello di difficoltà maggiore corrispondente a un'accuracy inferiore al 80%. Mediante la creazione di istogrammi illustrativi (figura 5.13), si è evidenziato che in tutti i partecipanti si manifestasse una reale differenza nella difficoltà delle prove di tipo n-back. È stato osservato un calo dell'accuracy al crescere della difficoltà dell'n-back.. Il livello di difficoltà 3 N-back è stato impostato come il più elevato per tutti i partecipanti.

Durante la prova effettiva, tutti i partecipanti hanno completato le prove di tipo 1, 2 e 3 back, escludendo la prova 4-back, in quanto ritenuta estremamente difficile.

5.2.1 Analisi dell'accuracy durante la fase di Training al variare dell'N-back

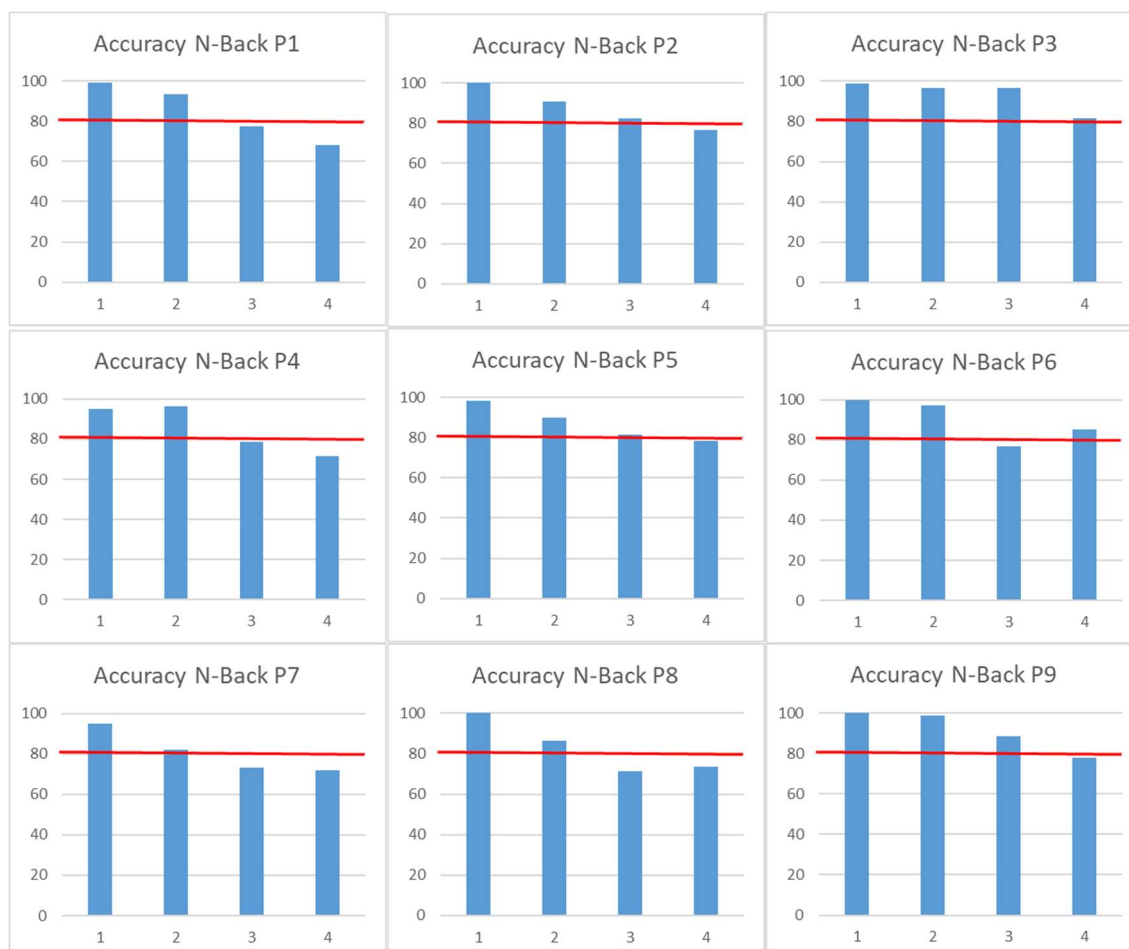


Figura 5. 14. Grafici Accuracy durante la fase di Training - Nback con valore soglia

Nella figura 5.14 "P1", "P2", "P3", "P4", "P5", "P6", "P7", "P8", "P9" indicano il partecipante a cui si riferiscono i dati del grafico.

Questa analisi conferma in modo significativo che l'aumento della difficoltà delle prove n-back influisce in maniera negativa sull'accuracy dei partecipanti. Gli istogrammi sopra riportati (figura 5.13) evidenziano chiaramente come l'accuracy diminuisce all'aumentare della difficoltà.

È importante sottolineare che l'esclusione della prova 4-back durante le prove effettive è stata effettuata per garantire una corretta valutazione della performance dei partecipanti e per focalizzare l'attenzione sui livelli di difficoltà precedentemente determinati, rendendoli omogenei per tutti.

5.2.2 Analisi della difficoltà percepita (VAS) durante le prove effettive al variare dell’N-back

Durante le prove effettive, è stata condotta un'analisi per valutare se il livello di difficoltà delle prove corrispondesse alla difficoltà percepita dai partecipanti, valutata tramite la Scala VAS (Visual Analogue Scale).

Questo parametro non è stato registrato durante le fase di training, perché in quella fase era soltanto importante calibrare la difficoltà e far prendere dimestichezza con la prova a tutti i partecipanti.

Per ogni tipologia di task (1, 2 o 3 back) è stata calcolata la media del valore di VAS e per comprenderne meglio l’andamento sono stati riportati i grafici a seguire (figura 5.14, 5.15, 5.16) in cui nell’asse delle ascisse viene riportata la tipologia di task, nell’asse delle ordinate la media delle scala VAS.

A seguire, sono presentati i report VAS-N-Back per ciascun partecipante (“P1”, “P2”, “P3”, “P4”, “P5”, “P6”, “P7”, “P8”, “P9” indicano il partecipante a cui si riferiscono i dati del grafico):

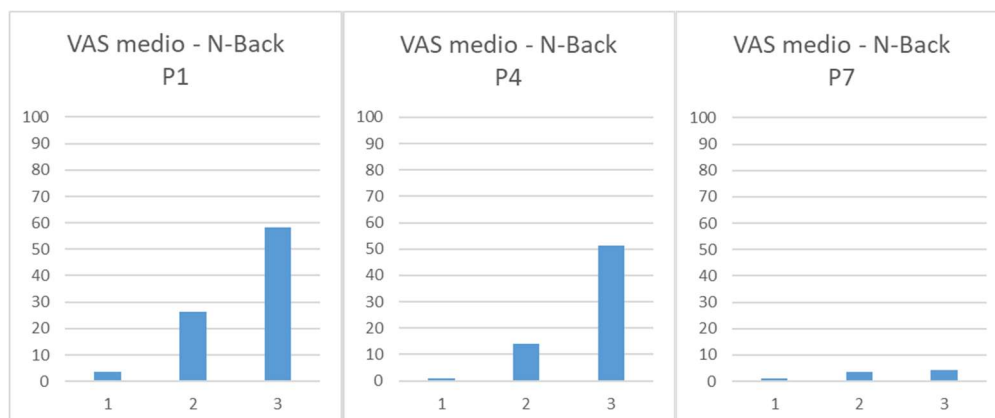


Figura 5. 15. Difficoltà VAS-task partecipante 1-4-7 (prova uditiva)

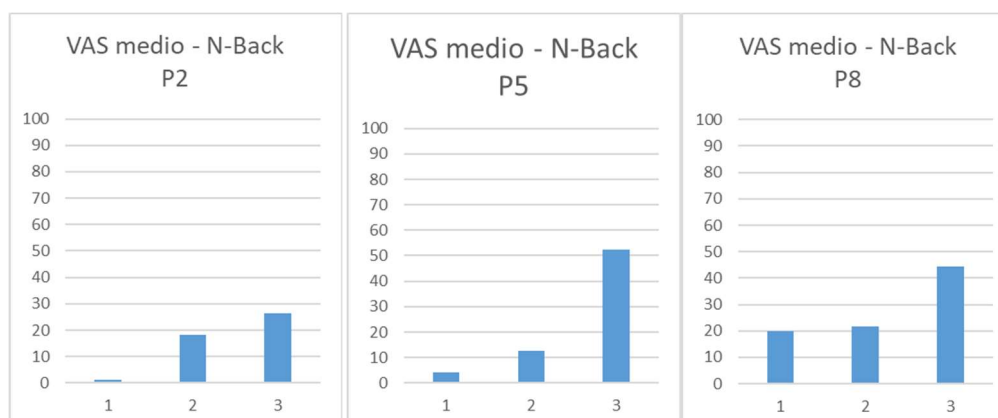


Figura 5. 16. Difficoltà VAS-task partecipante 2-5-8 (prova visiva)

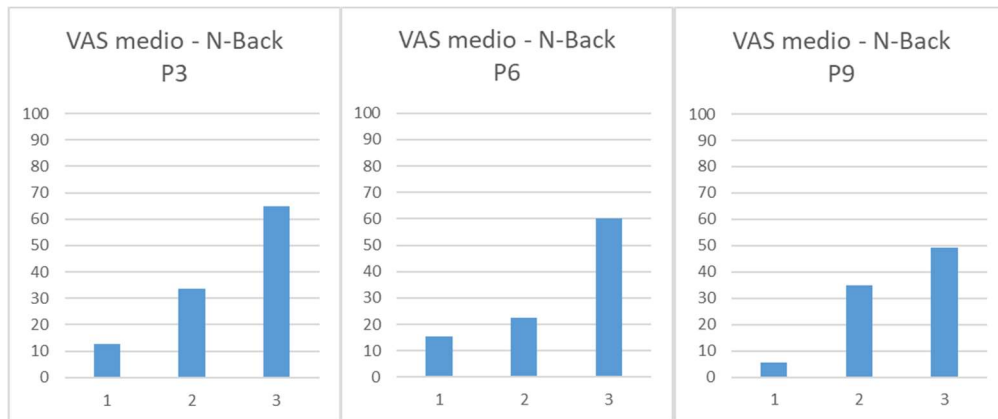


Figura 5. 17. Difficoltà VAS-task partecipante 3-6-9 (prova visuospatiale)

Questi report (figura 5.14, 5.15, 5.16) evidenziano la valutazione soggettiva della difficoltà percepita durante le diverse prove n-back. I grafici rappresentano chiaramente l'andamento della scala VAS per ogni tipologia di prova, permettendo di identificare le differenze di difficoltà tra i livelli n-back.

Indipendentemente dal tipo di prova utilizzata, sia che si tratti di prove visive, uditive o visuospatiali, è chiaro che c'è un aumento di difficoltà esponenziale all'aumentare del livello n-back. In particolare, il livello 3-back si distingue come il livello più difficile tra tutti, quindi conferma quanto identificato nella fase di training.

Questi risultati indicano che richiedere ai partecipanti di memorizzare e confrontare gli stimoli con uno o più passi di distanza rappresenta una sfida cognitiva significativa. L'impegno di mantenere e monitorare l'informazione nel tempo e di effettuare confronti accurati richiede una maggiore capacità di memoria di lavoro e di attenzione.

5.2.3 Analisi dell'accuracy durante le prove effettive al variare dell'N-back

La fase successiva è stata confrontare l'accuracy ottenuta dai partecipanti con i diversi livelli di n-back con i dati delle prove effettive.

I risultati (figura 5.17) sono stati analizzati confrontando l'accuracy media ottenuta per ciascun partecipante al variare del livello n-back. Questo confronto ha permesso di valutare come le prestazioni dei partecipanti variassero in relazione alla complessità delle prove.

Di seguito sono riportati i risultati dell'accuracy vs n-back per ciascun partecipante ("P1", "P2", "P3", "P4", "P5", "P6", "P7", "P8", "P9" indicano il partecipante a cui si riferiscono i dati del grafico):

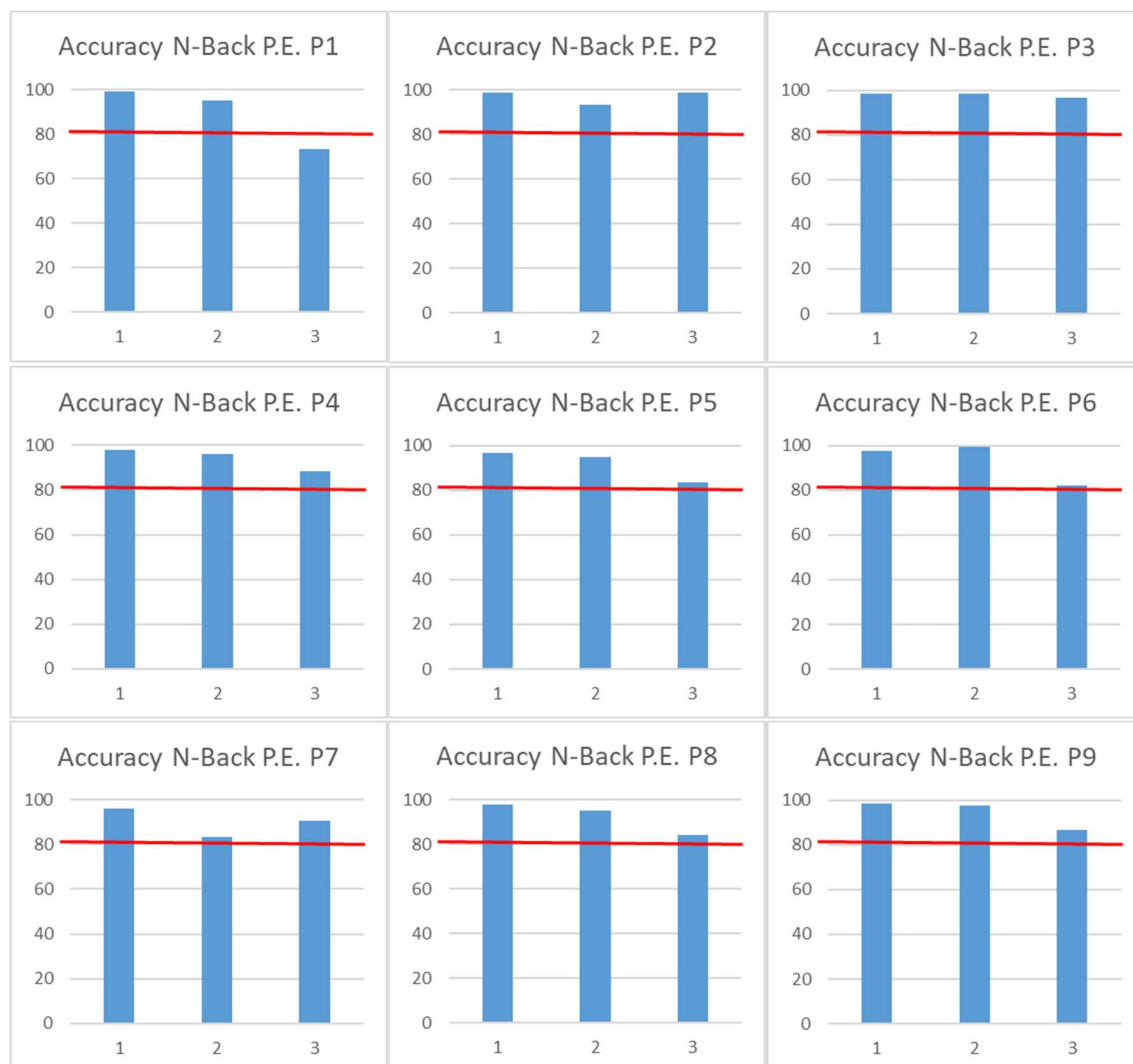


Figura 5. 18. Accuracy prove effettive – Nback

Nella figura 5.18 "P1", "P2", "P3", "P4", "P5", "P6", "P7", "P8", "P9" indicano il partecipante a cui si riferiscono i dati del grafico.

L'analisi dei dati (figura 5.17) evidenzia un andamento delle prestazioni che è coerente con le aspettative: all'aumentare del livello n-back, si riscontra generalmente una diminuzione dell'accuracy. Ciò indica che l'aumento della difficoltà delle prove ha un impatto negativo sulle prestazioni cognitive dei partecipanti.

È evidente che in confronto all'accuracy della fase di training, adesso è aumentata anche per i livelli più difficili, infatti quasi tutti i partecipanti hanno ottenuto l'80 % nel 3 n-back. L'accuracy generale è aumentata a seguito dell'apprendimento delle prove, mantenendo comunque un trend di percezione di maggiore difficoltà.

Tuttavia, è importante notare che nonostante l'aumento dell'accuracy, i partecipanti hanno continuato a percepire un aumento della difficoltà con il passaggio a livelli più impegnativi. Questo suggerisce che, nonostante i miglioramenti nell'abilità di esecuzione, i compiti N-back di livello superiore richiedono ancora uno sforzo cognitivo significativo.

La discrepanza tra l'accuracy migliorata e la percezione di maggiore difficoltà può essere attribuita a diversi fattori. Ad esempio, l'aumento del carico cognitivo richiesto dai compiti più difficili potrebbe rendere la loro esecuzione più impegnativa, nonostante i progressi nell'apprendimento delle strategie.

Inoltre, la consapevolezza della complessità crescente delle prove potrebbe influire sulla percezione soggettiva della difficoltà, indipendentemente dall'accuracy raggiunta. I partecipanti potrebbero essere consapevoli della complessità dei compiti e dell'impegno mentale richiesto, il che potrebbe influenzare la loro valutazione soggettiva della difficoltà.

5.2.4 Analisi dell'AOI

L'attenzione si è poi focalizzata nel capire in quale punto dell'area visiva il partecipante prestava maggior attenzione. Attraverso l'utilizzo del software Tobii Pro Lab, è stato possibile analizzare il comportamento visivo dei singoli partecipanti durante le prove n-back (figura 5.18), concentrandosi sulle aree di interesse (AOI) designate all'interno del desktop del PC.

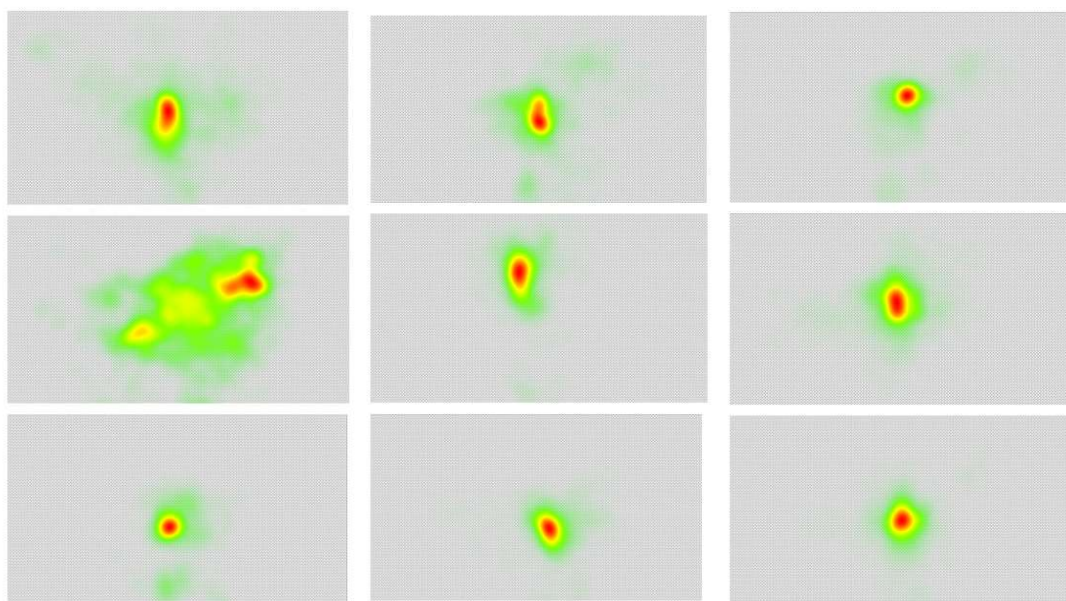


Figura 5. 19. Visualizzazioni AOI prove uditive (prima colonna); visive (seconda colonna); visuospatiali (terza colonna)

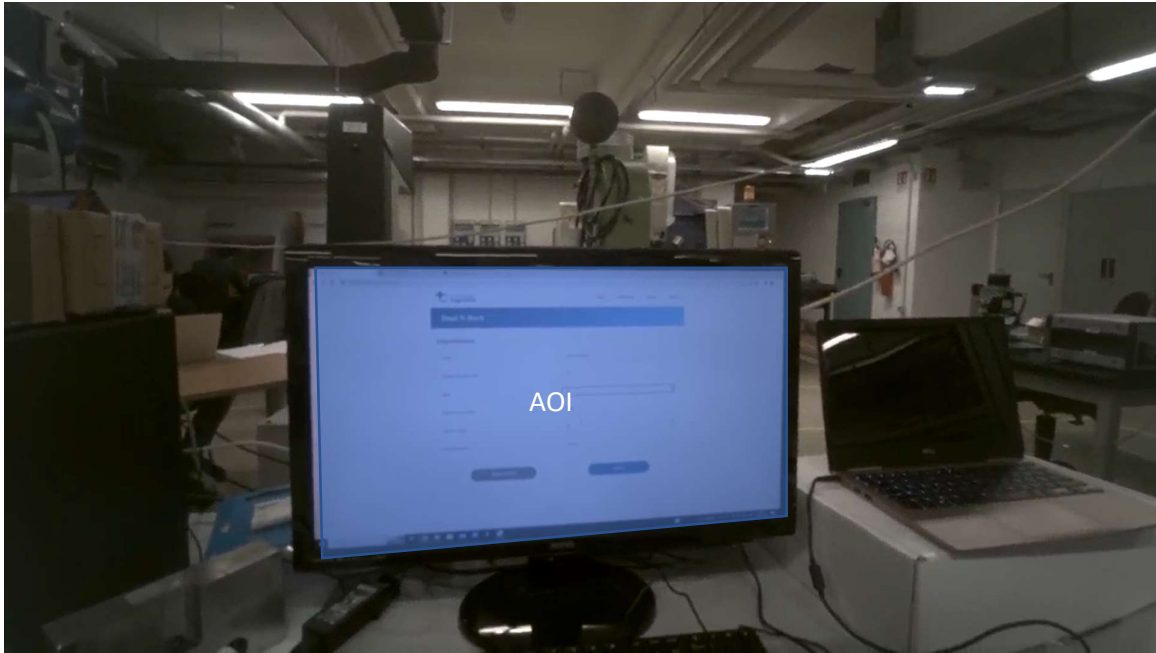


Figura 5. 20. Selezione AOI

I risultati ottenuti (5.18) evidenziano andamenti simili tra le diverse tipologie prove (uditiva, visiva e visuospaziale). Tuttavia, si nota una maggiore dispersione nello sguardo durante le prove uditive, sicuramente perché non era necessario puntare l'attenzione su un punto specifico per rispondere al test n-back, a differenza delle altre due prove.

Durante la prova visiva, in cui la casella cambiava solo colore ma rimaneva nella stessa posizione, eventuali scostamenti nello sguardo dei partecipanti potrebbero essere attribuiti alla visualizzazione della risposta corretta o all'avanzamento della sequenza, entrambi posizionati in basso del desktop.

Risulta invece evidente, nella prova visuospaziale, che tutti e tre i partecipanti concentrano il loro sguardo in un punto centrale dello schermo, dove è presente la griglia 3x3.

5.3 Analisi dei dati: Metriche Eyetracking

L'analisi dei dati è stata condotta seguendo diversi passaggi:

1. Creazione database su Excel: è stato creato un database utilizzando Excel. Sono state create colonne per le diverse voci al fine di filtrare e organizzare i dati in modo appropriato. Le colonne includono informazioni come il numero del partecipante (da 1 a 9), se si tratta di una fase di training o di una prova effettiva, il tipo di prova (uditiva, visiva o visuospaziale), il

numero di test effettuati, il numero di sessioni di training, il ranking generale delle prove (compreso training e test), il livello di difficoltà N-back, la scala VAS (solo per i test), l'accuracy e le 35 metriche misurate.

2. Standardizzazione: i dati di tutte le prove per ciascun partecipante sono stati standardizzati. Questo processo consente di confrontare i dati su una scala comune, eliminando eventuali differenze di scala o unità di misura tra le diverse metriche.
3. Media dati: per ogni livello di difficoltà delle prove (1, 2 e 3 back), è stata calcolata la media dei valori delle metriche, sia per la fase di training che per le prove effettive. Questo fornisce una stima del valore medio delle metriche per ciascun livello di difficoltà.
4. Plottare i dati: i dati sono stati visualizzati utilizzando i boxplot, che consentono di visualizzare la distribuzione e i valori anomali delle metriche per ciascun livello di difficoltà e tipo di prova. I boxplot forniscono informazioni sulle misure di tendenza centrale, dispersione e presenza di valori anomali nei dati.
5. T test: è stato eseguito un paired t-test con la correzione di Bonferroni per testare eventuali differenze significative tra i confronti 1 back - 2 back, 1 back - 3 back e 2 back - 3 back. Questo test statistico consente di valutare se le differenze osservate tra i diversi livelli di difficoltà sono statisticamente significative.

L'obiettivo di questa analisi è stato quello di esaminare se esiste un andamento comune o se ogni partecipante presenta un andamento individuale nelle metriche misurate durante le prove N-back. Poiché queste prove misurano parametri fisiologici soggettivi, è interessante comprendere se ci sono differenze significative tra i diversi livelli di difficoltà e se possono essere generalizzate a tutti i partecipanti o se ogni individuo mostra un andamento unico.

Successivamente, è stata condotta un'ulteriore analisi suddividendo i risultati in base alla tipologia di prova, distinguendo tra prove uditive, visive e visuospatiali. Questo approccio mira a valutare se vi sono differenze significative tra le tipologie di prova nell'andamento delle metriche misurate. Tale analisi permette di individuare eventuali pattern o tendenze specifiche a ciascuna tipologia di prova, fornendo una maggiore comprensione dei diversi aspetti coinvolgendo i partecipanti.

Per i boxplot a seguire: Blu=1 back; Arancione=2back; Grigio=3back.

5.3.1 Metriche Eyetracking vs N-back

Nell'analisi dei dati dell'esperimento n-back, è importante sottolineare che si fa riferimento esclusivamente ai dati non mediati delle prove effettive svolte dai partecipanti, escludendo la fase di training.

Per confrontare i livelli di difficoltà delle attività di memoria, è stato utilizzato il t-test eteroschedastico con correzione di Bonferroni per controllare il rischio di errore di tipo I dovuto ai confronti multipli. Poiché sono stati effettuati tre confronti (1-2 back, 1-3 back e 2-3 back), la soglia di significatività è stata adattata in base al numero di confronti. In particolare, la soglia di significatività corretta è stata calcolata dividendo 0,05 per il numero di confronti, ovvero $0,05/3$, che equivale a 0,0167.

Successivamente, i p-value ottenuti dai confronti sono stati confrontati con la soglia di significatività corretta per determinare la significatività statistica dei risultati. Se un p-value era inferiore alla soglia di 0,0167, il confronto veniva considerato significativo, indicando una differenza statisticamente significativa tra i livelli di difficoltà delle attività di memoria, altrimenti no.

Di seguito i p-value calcolati (sono stati evidenziati quelli significativi e sono stati arrotondati alla quarta cifra decimale) nel caso Globale nella tabella 5; Uditiva nella tabella 6; Visiva nella tabella 7 e Caso Visuospaziale nella tabella 8.

Tabella 5: Metriche N-back -Pvalue Globale

Metriche Eyetracking	Globale		
	1-2	1-3	2-3
<i>Analisi</i>			
VAS	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>Accuracy</i>	0,3597	0,6786	0,5575
<i>Total_duration_of_fixations (standardizzati)</i>	0,5918	0,2888	0,6906
<i>Average_duration_of_fixations (val.estr.)</i>	0,225	0,0029	0,0409
<i>Minimum_duration_of_fixations</i>	0,9328	0,0954	0,0207
<i>Maximum_duration_of_fixations</i>	0,1155	0,1492	0,9980
<i>Number_of_fixations</i>	0,7389	0,0999	0,1835
<i>Time_to_first_fixation</i>	0,3452	0,1608	0,6370
<i>Duration_of_first_fixation</i>	0,8893	0,9475	0,8134
<i>Average_pupil_diameter</i>	0,0072	<0,0001	0,0065

<i>Total_duration_of_whole_fixations</i>	0,5877	0,2867	0,6875
<i>Average_duration_of_whole_fixations</i>	0,2248	0,0026	0,0415
<i>Minimum_duration_of_whole_fixations</i>	0,1384	0,8977	0,1856
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations</i>	0,1185	0,1510	0,9984
<i>Number_of_whole_fixations</i>	0,7784	0,1059	0,1736
<i>Time_to_first_whole_fixation</i>	0,3892	0,2564	0,7329
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	0,7525	0,5861	0,3620
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter</i>	0,0073	<0,0001	0,0057
<i>Total_duration_of_Visit</i>	0,3653	0,8358	0,5852
<i>Average_duration_of_Visit</i>	0,0332	0,2896	0,2365
<i>Minimum_duration_of_Visit</i>	0,0728	0,2533	0,3952
<i>Maximum_duration_of_Visit</i>	0,0789	0,1631	0,8007
<i>Number_of_Visits</i>	0,0237	0,2255	0,3113
<i>Time_to_first_Visit</i>	0,1961	0,1347	0,7786
<i>Duration_of_first_Visit</i>	0,5267	0,1238	0,0325
<i>Total_duration_of_Glances</i>	0,3884	0,8502	0,6018
<i>Average_duration_of_Glances</i>	0,0337	0,2908	0,2374
<i>Minimum_duration_of_Glances</i>	0,0714	0,2581	0,3868
<i>Maximum_duration_of_Glances</i>	0,0792	0,1636	0,8011
<i>Number_of_Glances</i>	0,0238	0,2255	0,3113
<i>Time_to_first_Glance</i>	0,1931	0,1310	0,7714
<i>Duration_of_first_Glance</i>	0,5264	0,1249	0,0328
<i>Number_of_saccades_in_AOI</i>	0,7522	0,5575	0,3061

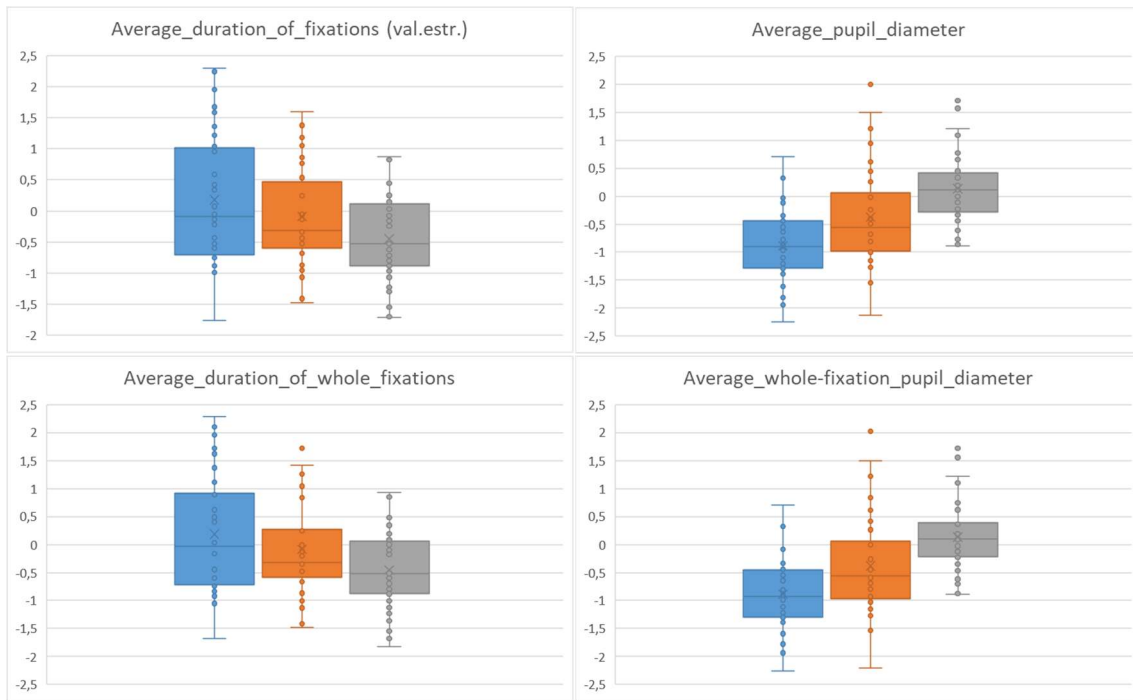
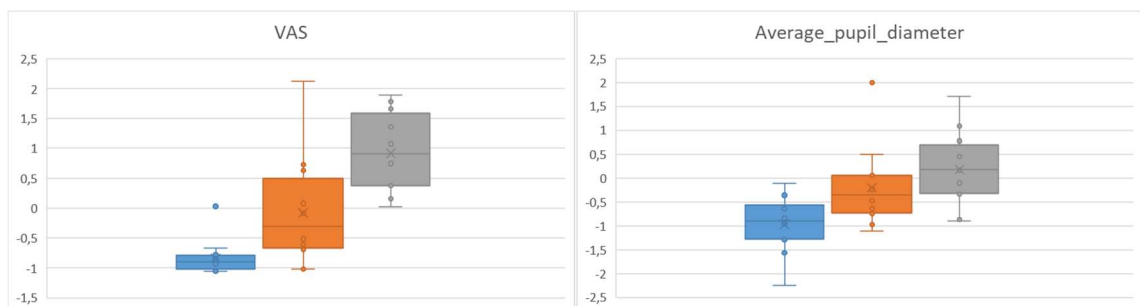


Figura 5. 21. Boxplot significativi Metriche-Nback Globale

Tabella 6: Metriche N-back -Pvalue Uditiva

Metriche Eyetracking	Uditiva		
	1-2	1-3	2-3
Analisi			
VAS	0,0152	0,0000	0,0055
Accuracy	0,2960	0,8107	0,1344
Total_duration_of_fixations (standardizzati)	0,3429	0,2040	0,7905
Average_duration_of_fixations (val.estr.)	0,4758	0,0331	0,0439
Minimum_duration_of_fixations	0,2582	0,2582	1,0000
Maximum_duration_of_fixations	0,4074	0,6928	0,7566
Number_of_fixations	0,5809	0,8517	0,4491
Time_to_first_fixation	0,3130	0,8126	0,3272
Duration_of_first_fixation	0,9728	0,9239	0,9093
Average_pupil_diameter	0,0171	0,0005	0,2552
Total_duration_of_whole_fixations	0,3632	0,1943	0,7530
Average_duration_of_whole_fixations	0,4393	0,0322	0,0483

<i>Minimum_duration_of_whole_fixations</i>	0,3224	0,3224	1,0000
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations</i>	0,4171	0,7006	0,7587
<i>Number_of_whole_fixations</i>	0,5652	0,8642	0,4408
<i>Time_to_first_whole_fixation</i>	0,3881	0,4014	0,3286
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	0,5741	0,7148	0,7231
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter</i>	0,0199	0,0005	0,2519
<i>Total_duration_of_Visit</i>	0,3431	0,3145	0,9824
<i>Average_duration_of_Visit</i>	0,3454	0,5202	0,1572
<i>Minimum_duration_of_Visit</i>	0,1280	0,5944	0,1740
<i>Maximum_duration_of_Visit</i>	0,5207	0,9283	0,5907
<i>Number_of_Visits</i>	0,9414	0,3329	0,5478
<i>Time_to_first_Visit</i>	0,3222	0,9551	0,3236
<i>Duration_of_first_Visit</i>	0,8608	0,3405	0,3061
<i>Total_duration_of_Glances</i>	0,3365	0,3125	0,9690
<i>Average_duration_of_Glances</i>	0,3485	0,5179	0,1583
<i>Minimum_duration_of_Glances</i>	0,1247	0,6167	0,1679
<i>Maximum_duration_of_Glances</i>	0,5210	0,9253	0,5934
<i>Number_of_Glances</i>	0,9414	0,3329	0,5478
<i>Time_to_first_Glance</i>	0,3250	0,9671	0,3254
<i>Duration_of_first_Glance</i>	0,8587	0,3450	0,3085
<i>Number_of_saccades_in_AOI</i>	0,5105	0,5871	0,8259



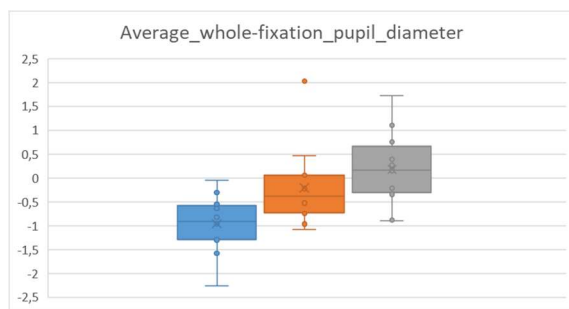


Figura 5. 22. Boxplot significativi Metriche - Nback Uditiva

Tabella 7: Metriche N-back -Pvalue Visiva

Metriche Eyetracking	Visiva		
	1-2	1-3	2-3
Analisi			
VAS	0,0207	0,0000	0,0015
Accuracy	0,9593	0,7074	0,7255
Total_duration_of_fixations (standardizzati)	0,5366	0,4780	0,3056
Average_duration_of_fixations (val.estr.)	0,3403	0,7248	0,5090
Minimum_duration_of_fixations	0,8682	0,1944	0,0683
Maximum_duration_of_fixations	0,6501	0,4709	0,7632
Number_of_fixations	0,4955	0,2382	0,8052
Time_to_first_fixation	0,1230	0,2499	0,1112
Duration_of_first_fixation	0,5003	0,2520	0,7859
Average_pupil_diameter	0,7332	0,0410	0,1722
Total_duration_of_whole_fixations	0,6102	0,3541	0,2559
Average_duration_of_whole_fixations	0,3228	0,8106	0,4321
Minimum_duration_of_whole_fixations	0,3325	0,3325	1,0000
Maximum_duration_of_whole_fixations	0,6512	0,4702	0,7620
Number_of_whole_fixations	0,4564	0,2156	0,8328
Time_to_first_whole_fixation	0,4440	0,2474	0,1720
Duration_of_first_whole_fixation	0,3035	0,3843	0,8067
Average_whole-fixation_pupil_diameter	0,7260	0,0329	0,1558
Total_duration_of_Visit	0,0112	0,5607	0,2228

<i>Average_duration_of_Visit</i>	0,1905	0,6534	0,4110
<i>Minimum_duration_of_Visit</i>	0,5224	0,6363	0,8770
<i>Maximum_duration_of_Visit</i>	0,0954	0,7441	0,1747
<i>Number_of_Visits</i>	0,0486	0,7041	0,1958
<i>Time_to_first_Visit</i>	0,0996	0,2503	0,1038
<i>Duration_of_first_Visit</i>	0,8184	0,1150	0,1901
<i>Total_duration_of_Glances</i>	0,0123	0,5544	0,2388
<i>Average_duration_of_Glances</i>	0,1915	0,6540	0,4119
<i>Minimum_duration_of_Glances</i>	0,5242	0,6372	0,8781
<i>Maximum_duration_of_Glances</i>	0,0959	0,7439	0,1756
<i>Number_of_Glances</i>	0,0486	0,7041	0,1958
<i>Time_to_first_Glance</i>	0,1166	0,2434	0,1063
<i>Duration_of_first_Glance</i>	0,8168	0,1148	0,1905
<i>Number_of_saccades_in_AOI</i>	0,1155	0,0148	0,3510

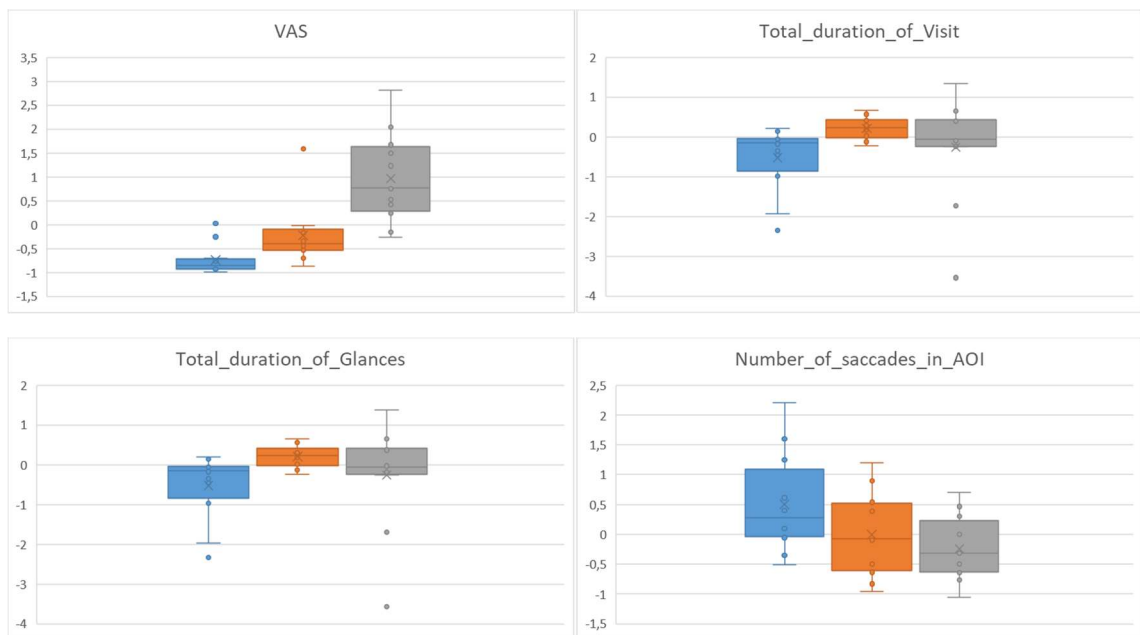
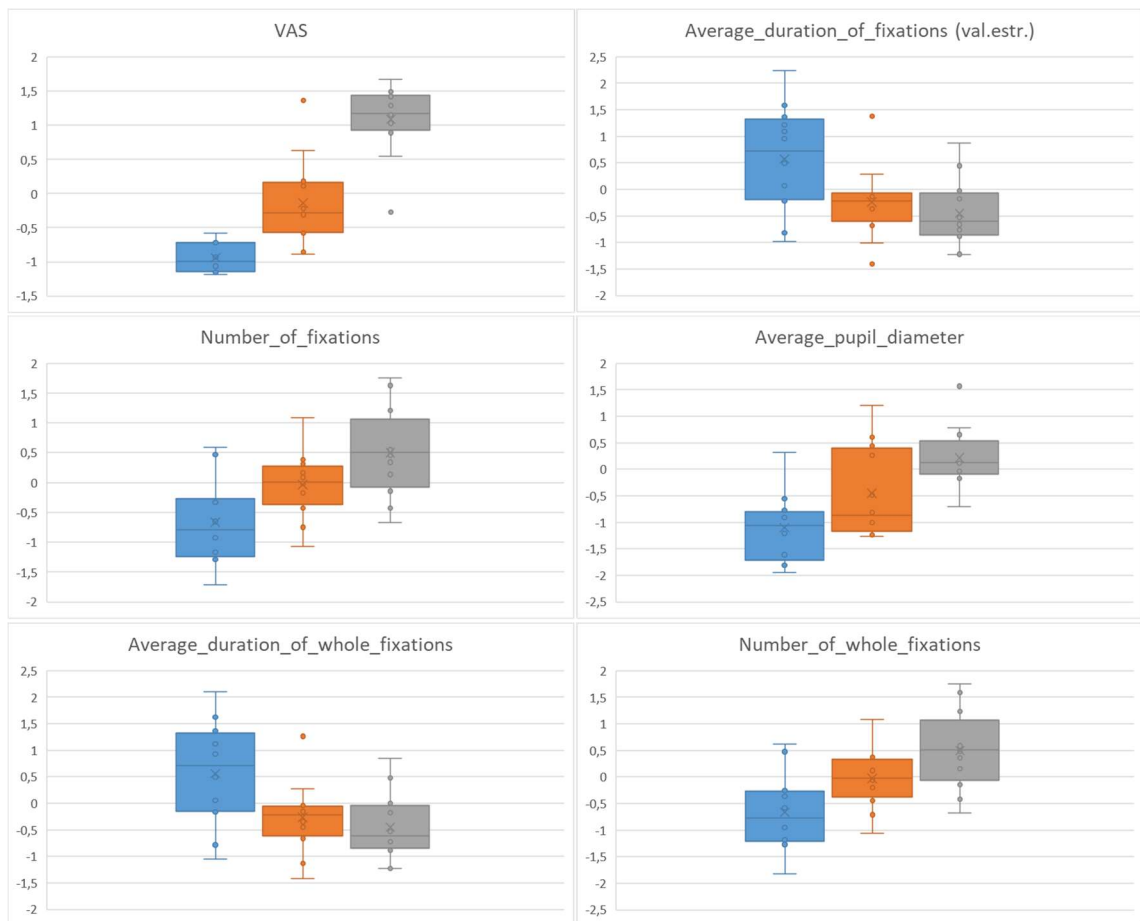


Figura 5. 23. Boxplot significativi Metriche - Nback Visiva

Tabella 8: Metriche N-back -Pvalue Visuospaziale

Metriche Eyetracking	Visuospaziale		
	1-2	1-3	2-3
Analisi			
VAS	0,0012	0,0000	0,0000
Accuracy	0,6778	0,4811	0,7560
Total_duration_of_fixations (standardizzati)	0,6564	0,6459	0,5039
Average_duration_of_fixations (val.estr.)	0,0313	0,0076	0,4411
Minimum_duration_of_fixations	0,1745	0,7485	0,1105
Maximum_duration_of_fixations	0,1797	0,1301	0,8293
Number_of_fixations	0,0245	0,0008	0,0608
Time_to_first_fixation	0,3341	0,4531	0,8180
Duration_of_first_fixation	0,4727	0,4713	0,9872
Average_pupil_diameter	0,0486	0,0000	0,0358
Total_duration_of_whole_fixations	0,6726	0,6352	0,5016
Average_duration_of_whole_fixations	0,0267	0,0077	0,5008
Minimum_duration_of_whole_fixations	0,3644	0,6691	0,1875
Maximum_duration_of_whole_fixations	0,1797	0,1301	0,8293
Number_of_whole_fixations	0,0264	0,0008	0,0608
Time_to_first_whole_fixation	0,5006	0,6767	0,8464
Duration_of_first_whole_fixation	0,2338	0,6945	0,0827
Average_whole-fixation_pupil_diameter	0,0452	0,0000	0,0345
Total_duration_of_Visit	0,9648	0,6750	0,7819
Average_duration_of_Visit	0,1756	0,0554	0,5320
Minimum_duration_of_Visit	0,4565	0,2632	0,7445
Maximum_duration_of_Visit	0,1066	0,0222	0,2961
Number_of_Visits	0,0617	0,0231	0,4412
Time_to_first_Visit	0,1355	0,3458	0,5869

<i>Duration_of_first_Visit</i>	0,1771	0,9562	0,1879
<i>Total_duration_of_Glances</i>	0,9815	0,7197	0,8022
<i>Average_duration_of_Glances</i>	0,1753	0,0554	0,5327
<i>Minimum_duration_of_Glances</i>	0,4556	0,2639	0,7464
<i>Maximum_duration_of_Glances</i>	0,1066	0,0222	0,2960
<i>Number_of_Glances</i>	0,0617	0,0231	0,4412
<i>Time_to_first_Glance</i>	0,1415	0,3454	0,6026
<i>Duration_of_first_Glance</i>	0,1770	0,9561	0,1879
<i>Number_of_saccades_in_AOI</i>	0,0224	0,0002	0,0195



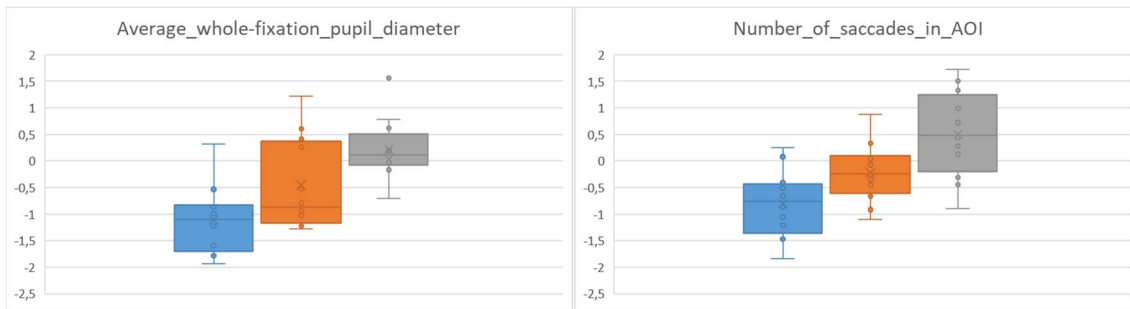


Figura 5. 24. Boxplot significativi Metriche - Nback Visuospaziale

Al variare dell'n-back, le metriche che si sono rivelate significative includono:

- *Vas (Visual Attention Score)*
- *Durata media delle fissazioni (Average Duration of Fixation)*
- *Diametro medio della pupilla (Average Pupil Diameter)*
- *Durata media delle fissazioni nell'intera area di interesse (Average Duration of Whole Fixations)*
- *Diametro medio della pupilla nell'intera area di interesse (Average Whole Fixation Pupil Diameter)*
- *Durata totale delle visite (Total Duration of Visit)*
- *Durata totale degli sguardi (Total Duration of Glances)*
- *Numero di saccadi nell'area di interesse (Number of Saccades in AOI)*

Dai boxplot sopra riportati è possibile osservare la tendenza a diminuire o ad aumentare di questi parametri a seconda della tipologia di prova.

Queste metriche indicano che l'n-back influisce sul carico cognitivo, sull'attenzione visiva e sul comportamento oculare degli operatori durante le attività di memoria.

Tabella 9: Sintesi trend metriche-Nback

Metriche che hanno un trend crescente con N-back	Metriche che hanno un trend decrescente con N-back
<ul style="list-style-type: none"> - VAS - Minimum_duration_of_fixations - Time_to_first_fixation - Duration_of_first_fixation - Average_pupil_diameter - Number_of_whole_fixations - Duration_of_first_whole_fixation - Average_whole-fixation_pupil_diameter - Time_to_first_Visit - Minimum_duration_of_Glances - Maximum_duration_of_Glances - Time_to_first_Glance 	<ul style="list-style-type: none"> - ACCURACY - Total_duration_of_fixations - Average_duration_of_fixations - Maximum_duration_of_fixations - Total_duration_of_whole_fixations - Average_duration_of_whole_fixations - Duration_of_first_Visit

Tabella 10: Sintesi trend metriche - VAS

Metriche che hanno un trend crescente con VAS	Metriche che hanno un trend decrescente con VAS
<ul style="list-style-type: none"> - Accuracy - Average_pupil_diameter - Average_whole-fixation_pupil_diameter - Minimum_duration_of_Visit - Minimum_duration_of_Glances 	<ul style="list-style-type: none"> - Total_duration_of_fixations - Average_duration_of_fixations - Maximum_duration_of_fixations - Total_duration_of_whole_fixations - Average_duration_of_whole_fixations - Maximum_duration_of_whole_fixations - Total_duration_of_Visit - Duration_of_first_Visit - Total_duration_of_Glances

Dai trend delle metriche si possono trarre alcune conclusioni:

All'aumentare di N-back, le metriche legate alla fissazione visiva (come la durata minima delle fissazioni, il tempo per la prima fissazione, la durata della prima fissazione) e le metriche pupillari (come il diametro medio della pupilla) tendono ad aumentare. Ciò potrebbe indicare un aumento dell'impegno cognitivo e dell'attenzione richiesti durante il compito di N-back. I partecipanti possono dedicare più tempo e attenzione ai punti di interesse nei compiti più impegnativi.

Al contrario, l'accuratezza nel compito di N-back mostra un trend decrescente. Questo è un risultato atteso, poiché l'aumento della difficoltà del compito può portare a una riduzione dell'accuratezza delle risposte.

Rispetto al VAS, l'accuratezza, il diametro medio della pupilla, la durata minima della visita e la durata minima delle occhiate mostrano un trend crescente. Questo suggerisce che i partecipanti potrebbero valutare positivamente il compito di N-back e mostrare un maggiore coinvolgimento e attenzione.

Tuttavia, le metriche legate alla durata complessiva delle fissazioni, alla durata media delle fissazioni, alla durata massima delle fissazioni, alla durata complessiva delle fissazioni complete, alla durata media delle fissazioni complete e alla durata massima delle fissazioni complete, nonché alla durata complessiva delle visite e alla durata totale delle occhiate, mostrano un trend decrescente con il VAS. Ciò potrebbe indicare che i partecipanti trascorrono meno tempo complessivo nelle fissazioni, nelle visite e nelle occhiate quando la valutazione soggettiva del compito è più alta.

5.3.2 Metriche Eyetracking vs TRIAL

In un'altra fase dell'analisi dei dati, è stata valutata la relazione tra le metriche rilevate (come Vas, durata delle fissazioni, diametro della pupilla, ecc.) e la variabile "TRIAL", che rappresenta il numero di prove effettuate. Per determinare l'eventuale correlazione tra queste due variabili, è stato utilizzato il coefficiente di correlazione di Pearson.

I risultati del calcolo del coefficiente di correlazione di Pearson indicano la presenza o l'assenza di una correlazione tra le metriche e la variabile "TRIAL". Una correlazione positiva indica una relazione lineare positiva, mentre una correlazione negativa indica una relazione lineare negativa. Se il coefficiente di correlazione è 0 o prossimo a 0, significa che non è presente una correlazione lineare tra le due variabili.

Sono stati utilizzati dati mediati rispetto i trial (sia training che prove effettive: 20 prove totali).

Di seguito, nella tabella 11, i coefficienti di Pearson: (rosso negativo, verde positivo, bianco non significativo)

Tabella 11: Pearson Metriche-Trial (Globale, Uditiva, Visiva e Visuospaziale)

Metriche Eyetracking	Globale	Uditiva	Visiva	Visuospaziale
VAS	-0,1337	-0,1149	-0,2838	0,1443
ACCURACY	0,2333	-0,0282	0,4561	0,1445
Total_duration_of_fixations	-0,3994	-0,0955	-0,5402	-0,1591
Average_duration_of_fixations (val.estr.)	-0,3498	-0,3490	-0,1410	-0,1432
Minimum_duration_of_fixations	-0,0775	0,0258	0,1119	-0,2354
Maximum_duration_of_fixations	-0,3858	-0,1829	-0,1288	-0,4133
Number_of_fixations	0,045508	0,1388	0,0457	-0,0931
Time_to_first_fixation	-0,2609	-0,4090	-0,1177	-0,0430
Duration_of_first_fixation	-0,0230	-0,1824	-0,2515	0,2694
Average_pupil_diameter	-0,8608	-0,8263	-0,6655	-0,7373
Total_duration_of_whole_fixations	-0,3967	-0,1285	-0,5113	-0,1609
Average_duration_of_whole_fixations	-0,3629	-0,3905	-0,0920	-0,1508
Minimum_duration_of_whole_fixations	-0,3857	-0,4526	-0,1860	-0,1623
Maximum_duration_of_whole_fixations	-0,3867	-0,1813	-0,1293	-0,4133
Number_of_whole_fixations	0,04134	0,1166	0,0635	-0,0930

<i>Time_to_first_whole_fixation</i>	-0,2753	-0,3991	-0,2003	0,0154
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	0,1478	-0,1300	0,3196	-0,1126
<i>Average_whole_fixation_pupil_diameter</i>	-0,8651	-0,8267	-0,6775	-0,7431
<i>Total_duration_of_Visit</i>	-0,1034	0,0891	-0,3052	-0,0173
<i>Average_duration_of_Visit</i>	0,0918	-0,0737	-0,0430	0,2911
<i>Minimum_duration_of_Visit</i>	0,0398	-0,3299	0,01742	0,3539
<i>Maximum_duration_of_Visit</i>	-0,0249	0,0394	-0,2343	0,1680
<i>Number_of_Visits</i>	-0,0844	0,1805	-0,0692	-0,2383
<i>Time_to_first_Visit</i>	-0,2994	-0,4095	-0,1177	-0,1434
<i>Duration_of_first_Visit</i>	0,2618	-0,2014	0,1551	0,4690
<i>Total_duration_of_Glances</i>	-0,1096	0,0888	-0,3070	-0,0296
<i>Average_duration_of_Glances</i>	0,0908	-0,0750	-0,0432	0,2909
<i>Minimum_duration_of_Glances</i>	0,0299	-0,3461	0,0174	0,3539
<i>Maximum_duration_of_Glances</i>	-0,0256	0,0392	-0,2345	0,1672
<i>Number_of_Glances</i>	-0,0844	0,1805	-0,0692	-0,2383
<i>Time_to_first_Glance</i>	-0,2965	-0,4077	-0,1111	-0,1453
<i>Duration_of_first_Glance</i>	0,2616	-0,2014	0,1549	0,4690
<i>Number_of_saccades_in_AOI</i>	-0,3186	-0,1106	-0,1556	-0,3418

Di seguito alcune rappresentazioni grafiche (figura 5.24):

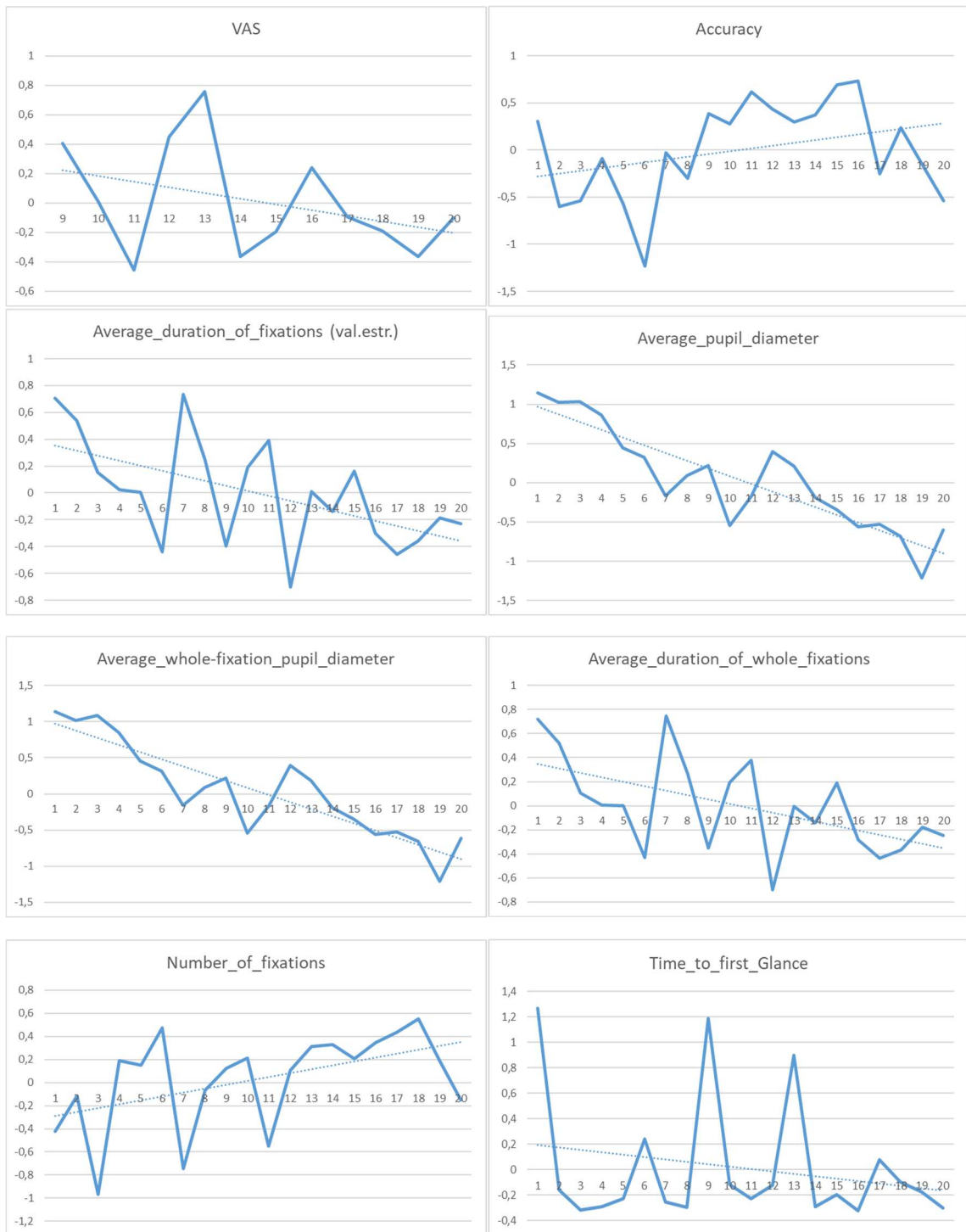


Figura 5. 25. Grafici Metriche significative – Trial Globale

Tabella 12: Sintesi trend Metriche - Trial

Metriche che hanno un trend crescente con TRIAL	Metriche che hanno un trend decrescente con TRIAL
<ul style="list-style-type: none"> - Accuracy - Number_of_fixation - Number_of_whole_fixation 	<ul style="list-style-type: none"> - VAS - Average_duration_of_fixations - Minimum_duration_of_fixations - Maximum_duration_of_fixations - Time_to_first_fixation - Average_pupil_diameter - Total_duration_of_whole_fixations - Average_duration_of_whole_fixations - Minimum_duration_of_whole_fixations - Maximum_duration_of_whole_fixations - Time_to_first_whole_fixation - Average_whole-fixation_pupil_diameter - Total_duration_of_Visit - Time_to_first_Visit - Total_duration_of_Glances - Time_to_first_Glance - Number_of_saccades_in_AOI

Dai coefficienti di Pearson si possono trarre delle conclusioni:

- Con l'aumentare dei trial, l'accuratezza delle risposte, il numero di fissazioni e il numero di fissazioni complete tendono ad aumentare. Ciò suggerisce un miglioramento delle prestazioni e una maggiore attenzione nel corso dei trial.
- Al contrario, le metriche legate alla valutazione soggettiva (VAS), alla durata media delle fissazioni, alla durata minima delle fissazioni, alla durata massima delle fissazioni, al tempo per la prima fissazione, al diametro medio della pupilla, alla durata complessiva delle fissazioni complete, alla durata media delle fissazioni complete, alla durata minima delle fissazioni complete, alla durata massima delle fissazioni complete, al tempo per la prima fissazione completa, al diametro medio delle fissazioni complete e alla durata totale delle visite, mostrano un trend decrescente. Ciò potrebbe indicare che con il progredire dei trial, la valutazione soggettiva dell'esperienza diminuisce e le caratteristiche visive (come la durata delle fissazioni, il tempo di reazione, il diametro pupillare) possono essere influenzate negativamente. Le metriche legate alla durata totale delle

occhiate, al tempo per la prima visita, alla durata totale delle occhiate e al numero di saccadi nell'area di interesse (AOI) mostrano un trend decrescente con i trial. Questo suggerisce che nel corso dei trial, i partecipanti possono dedicare meno tempo alle occhiate e compiere meno saccadi nell'AOI.

6. Esperimento prove assemblaggio manuale e in HRC

6.1 Descrizione esperimento assemblaggio

In questo secondo esperimento, l'obiettivo era indagare gli aspetti legati alla complessità di processo di assemblaggio, tenendo conto dell'introduzione o dell'assenza di un robot collaborativo e della crescente complessità oggettiva dei prodotti assemblati.

Inoltre, utilizzando l'eye-tracking, era interessante indagare gli aspetti legati allo stress e al carico cognitivo e metterli in correlazione coi risultati ottenuti nell'esperimento n-back.

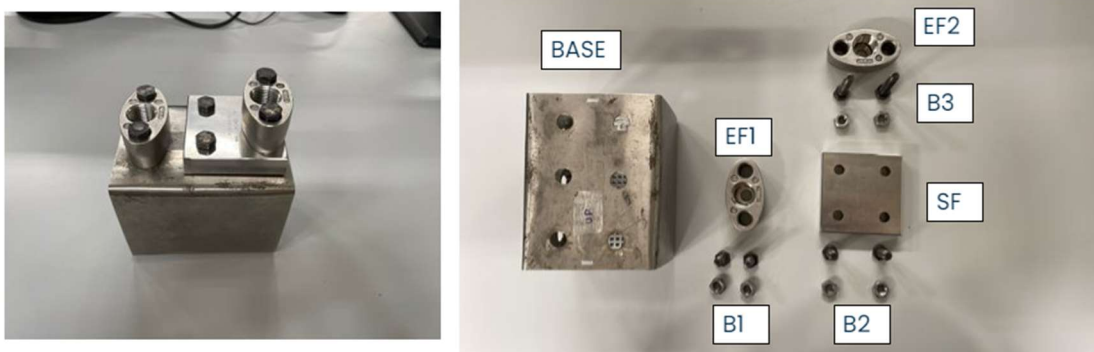


Figura 6. 1. Assemblato meccanico

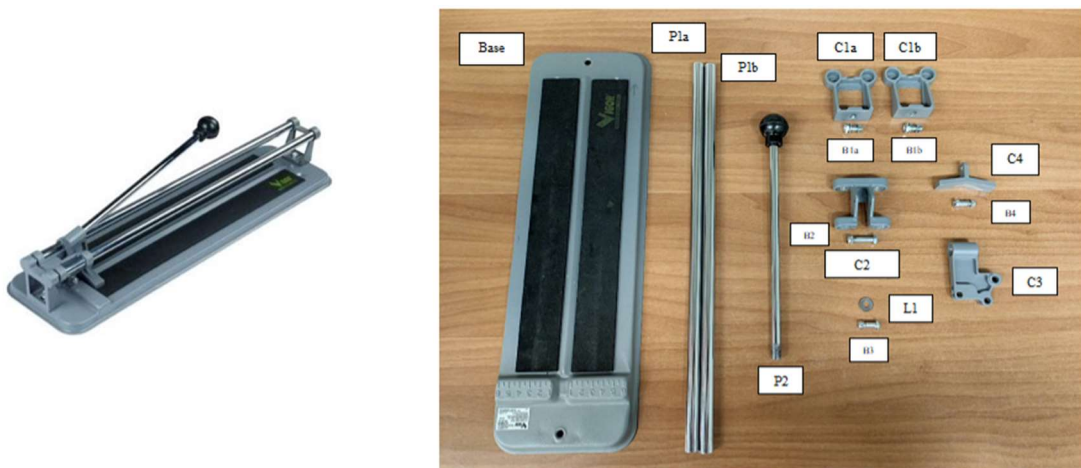


Figura 6. 2. Tagliapiastrelle

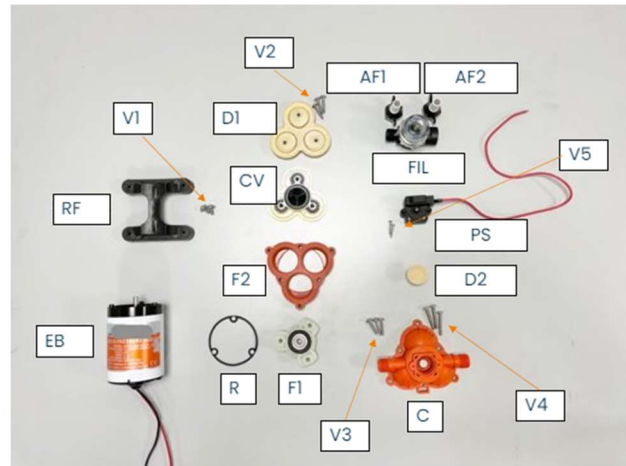


Figura 6. 3. Pompa

Il numero di partecipanti sottoposti all'esperimento è stato di 18. Sono state considerate sei configurazioni di assemblaggio, poiché ogni pezzo veniva assemblato sia dall'uomo sia con l'utilizzo del robot:

1. Assemblato meccanico (figura 6.1) manuale (1-M)
2. Assemblato meccanico con robot collaborativo (1-HRC)
3. Tagliapiastrelle (figura 6.2) manuale (2-M)
4. Tagliapiastrelle con robot collaborativo (2-HRC)
5. Pompa (figura 6.3) manuale (3-M)
6. Pompa con robot collaborativo (3-HRC)

Per l'assemblaggio manuale tutti gli step hanno avuto come agente "human", nel caso in cui invece c'è stato il coinvolgimento del robot collaborativo di seguito vengono riportati gli step per ogni prodotto:

- Step per assemblaggio HRC pezzo meccanico (1-HRC):

Tabella 13: Step assemblaggio 1-HRC

<i>Sequenza di assemblaggio HRC</i>	<i>Agente</i>
<i>Posizionamento base</i>	Robot
<i>Bloccaggio base</i>	Human
<i>Posizionamento EF1</i>	Robot
<i>Avvitatura EF1</i>	Human
<i>Posizionamento SF</i>	Robot
<i>Avvitatura SF</i>	Human
<i>Posizionamento EF2</i>	Robot
<i>Avvitatura EF2</i>	Human
<i>Sbloccaggio base</i>	Human
<i>Prelievo assemblato</i>	Robot

- Step per assemblaggio HRC tagliapiastrelle (2-HRC):

Tabella 14: Step assemblaggio 2-HRC

<i>Sequenza di assemblaggio HRC</i>	<i>Agente</i>
<i>Posizionamento basamento</i>	Robot
<i>Posizionamento e avvitatura parziale supporto 1</i>	Human
<i>Posizionamento e avvitatura parziale supporto 2</i>	Human
<i>Posizionamento supporto 3</i>	Robot
<i>Inserimento e avvitatura flangia – supporto 3</i>	Human
<i>Rotazione semi assemblato</i>	Robot
<i>Posizionamento e avvitatura lama</i>	Human
<i>Posizionamento e avvitatura blocca-piastrelle</i>	Human
<i>Posizionamento e basamento con supporti 1 e 2</i>	Robot
<i>Inserimento semi-assemblato nelle aste 1 e 2</i>	Human
<i>Inserimento asta 1 e 2 nei supporti 1 e 2</i>	Human
<i>Avvitatura finale supporto 1 e 2</i>	Human
<i>Avvitatura asta 3</i>	Human
<i>Spostamento Prodotto finito</i>	Robot

- Step per assemblaggio HRC pompa (3-HRC):

Tabella 15: Step assemblaggio 3-HRC

<i>Sequenza di assemblaggio HRC</i>	<i>Agente</i>
<i>Posizionamento flangia 1</i>	Robot
<i>Posizionamento flangia 2</i>	Robot
<i>Inserimento flangia 1 in flangia 2</i>	Human
<i>Avvitatura membrana</i>	Human
<i>Inserimento coperchio membrana</i>	Human
<i>Posizionamento coperchio 1</i>	Robot
<i>Avvitatura coperchio</i>	Human
<i>Posizionamento blocco motore</i>	Robot
<i>Posizionamento e avvitatura supporto</i>	Robot
<i>Posizionamento anello su blocco motore</i>	Human
<i>Posizionamento e avvitatura testa su blocco motore</i>	Human
<i>Posizionamento e avvitatura coperchio 2</i>	Human

Ciascun partecipante ha eseguito tutte e sei le configurazioni in ordine casuale, in modo da avere un processo non influenzato dall'ordine. Per ogni configurazione, sono stati svolti sei trials consecutivi, al fine di ottenere dati significativi e ridurre l'effetto di eventuali fattori casuali.

Oltre alla raccolta di dati tramite l'eye-tracker Tobii Pro Glasses 3, sono state anche raccolte informazioni sui difetti, risposte tramite questionari e dati utilizzando un altro biosensore, l'Empatica E4. Tuttavia, nell'ambito di questa tesi, ci si è concentrati esclusivamente sui risultati ottenuti tramite l'eye-tracking, in quanto erano rilevanti per gli aspetti legati allo stress e al carico cognitivo.

Questo esperimento mira a fornire una comprensione mirata degli effetti dell'introduzione di un robot collaborativo e della complessità degli assemblaggi sulla fatica mentale degli operatori, consentendo così di valutare le implicazioni nella progettazione e nell'implementazione di processi di Human Robot Collaboration.

Nell'analisi dei dati, anche in questo esperimento è stato utilizzato il software Tobii Pro Lab per importare tutti i video registrati e condurre l'analisi delle diverse Aree di Interesse (AOI).

Le AOI sono state definite come segue:

1. Vassoio coi componenti da assemblare.
2. Area di lavoro.
3. Area di lavoro estesa (area di lavoro + vassoio).

Nei video in cui è presente l'interazione con il robot collaborativo, è stata aggiunta un'ulteriore AOI corrispondente al robot stesso (figura 6.6).

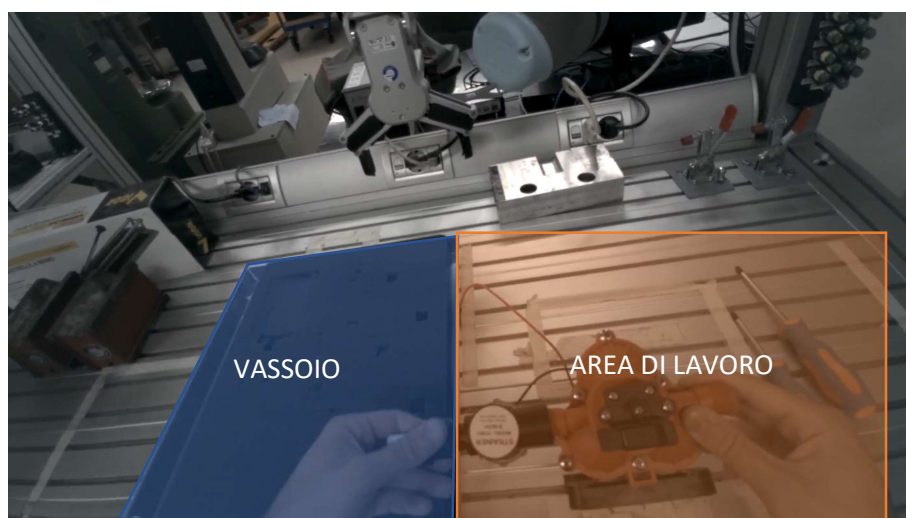


Figura 6. 4. AOI: vassoio e area di lavoro caso manuale



Figura 6. 5. AOI: area di lavoro caso manuale

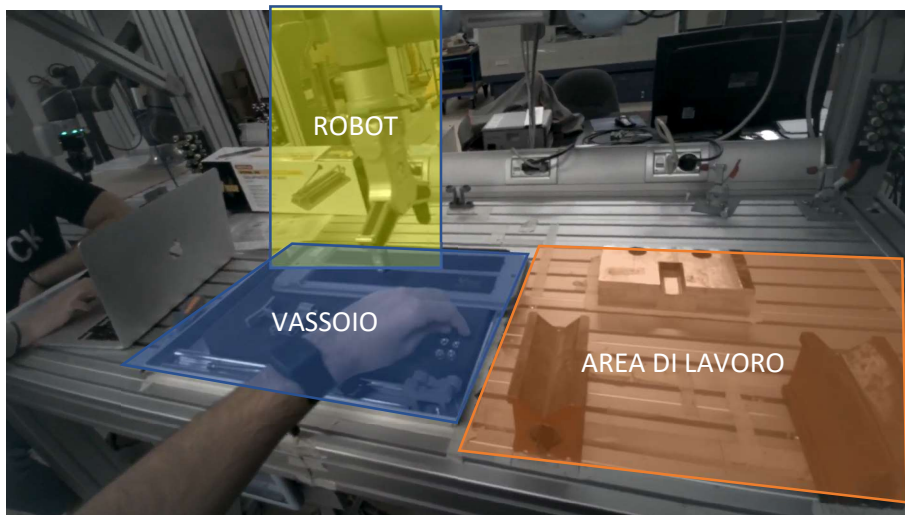


Figura 6. 6. AOI: vassoio, area di lavoro e robot caso HRC

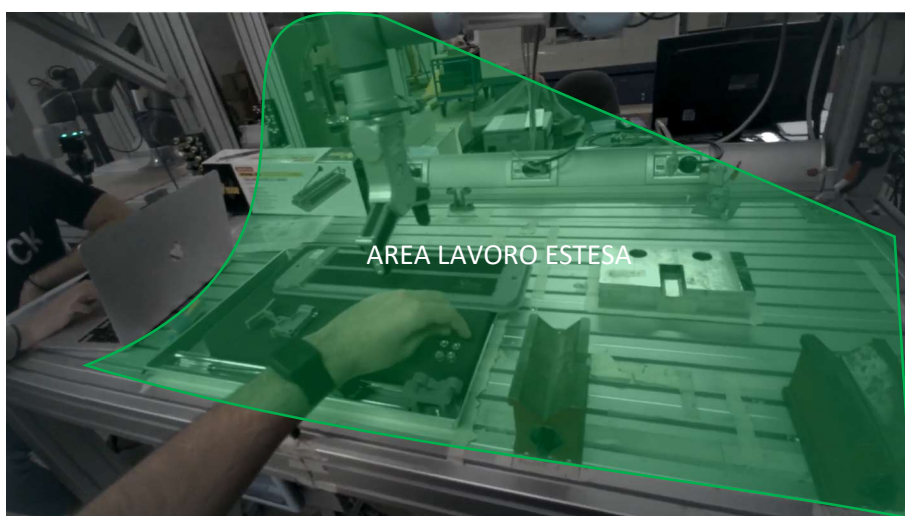


Figura 6. 7. AOI: area di lavoro estesa caso HRC

La designazione delle AOI ha consentito di analizzare le visualizzazioni degli operatori, ovvero i punti in cui hanno focalizzato maggiormente il loro sguardo durante l'attività di assemblaggio. In questa fase sono state importanti tutte le AOI di ogni singolo partecipante, per ogni singola prova e sono state sviluppate le visualizzazioni presenti di seguito (figura 6.8, 6.9).

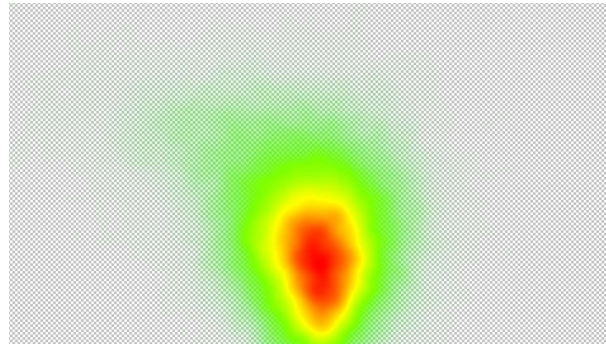


Figura 6. 8. Visualizzazione generale – analisi di tutti i video

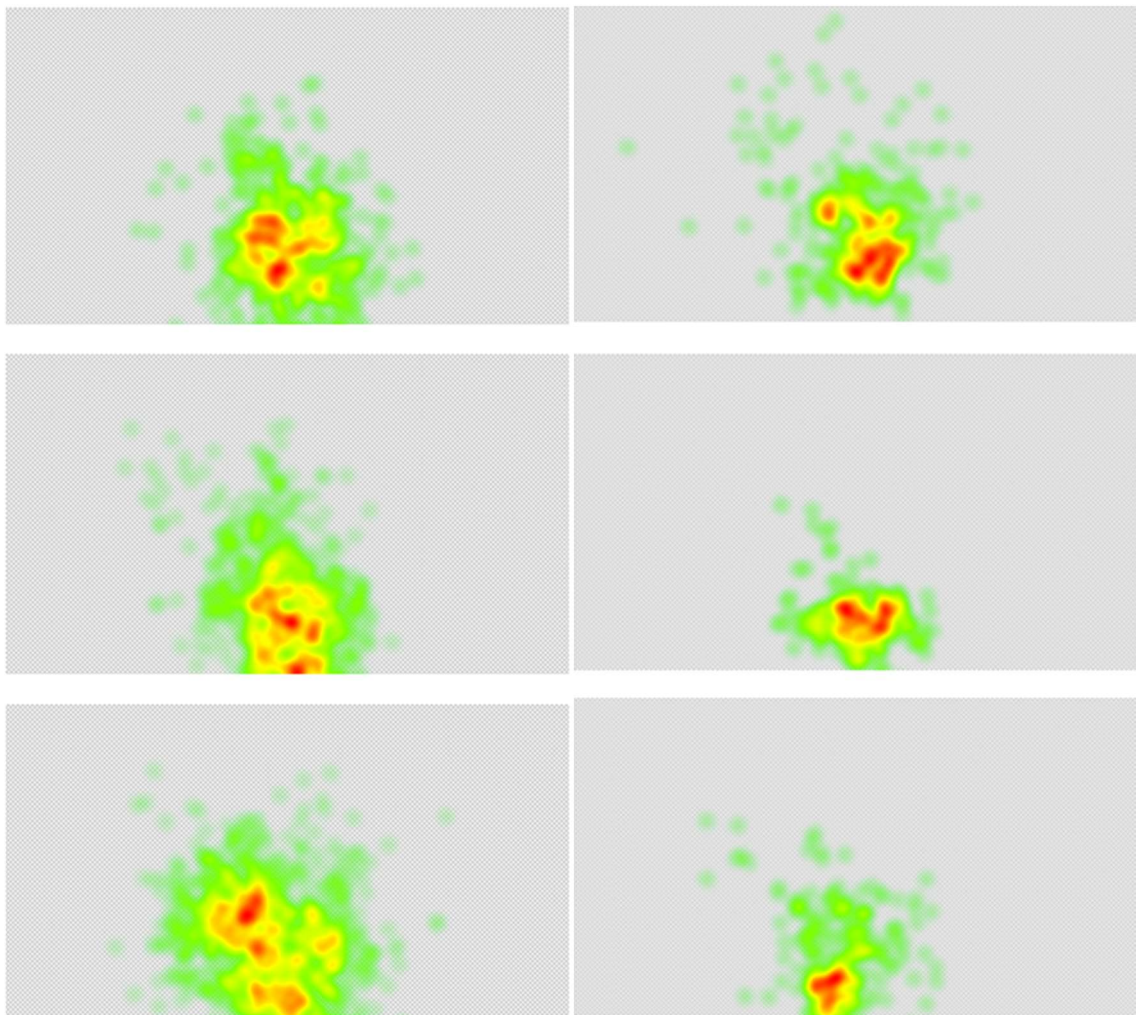


Figura 6. 9. Esempi di visualizzazione prove HRC (sinistra) vs prove Manuali (destra)

Nell'analisi delle prove con HRC, è emerso un pattern di visualizzazioni più disperso rispetto alle prove manuali. Mentre nelle prove manuali si osserva un punto di concentrazione notevolmente più piccolo, invece nelle prove HRC le visualizzazioni sembrano distribuirsi in maniera più ampia sull'intera area di lavoro.

Questo suggerisce che durante l'interazione con il cobot, gli operatori possono essere impegnati in un processo di monitoraggio più ampio, che coinvolge sia il robot stesso che gli altri elementi dell'ambiente di lavoro. La presenza del robot potrebbe richiedere una maggiore attenzione e un'adattabilità del campo visivo per tenere conto dei movimenti e delle azioni del robot stesso.

6.2 Analisi dei dati: risultati metriche eyetracking durante le prove di assemblaggio manuale e HRC

Durante l'analisi dei dati, è stato condotto il t test paired tra le metriche rilevate e le diverse configurazioni sperimentali, poiché sono stati utilizzati i dati (standardizzati) mediati per partecipante.

Poiché le configurazioni erano in totale 15, è stato applicato il metodo di correzione di Bonferroni per controllare il livello di significatività dei risultati. È stata utilizzata una soglia di significatività di 0,05 diviso per il numero di configurazioni (0,05/15) per determinare i p-value significativi.

I risultati del test t hanno evidenziato la presenza di differenze significative tra le metriche e le diverse configurazioni sperimentali. Utilizzando la correzione di Bonferroni, sono stati individuati specifici p-value che soddisfacevano la soglia di significatività corretta.

È importante evidenziare che l'utilizzo della correzione di Bonferroni aiuta a controllare il rischio di errore di tipo I quando si eseguono multipli confronti. Questo approccio garantisce una maggiore accuratezza nella valutazione delle differenze significative tra le metriche e le diverse configurazioni sperimentali.

Di seguito tabelle coi pvalue per ogni metrica e configurazioni (le caselle colorate sono significative):

Tabella 16: Metriche Eyetracking - Pvalue (1-2m; 1-3m; 2-3m; 1-2hrc; 1-3hrc; 2-3hrc)

Metriche Eyetracking	tra 1 e 2 m	tra 1 e 3 m	tra 2 e 3 m	tra 1 e 2 hrc	tra 1 e 3 hrc	tra 2 e 3 hrc
<i>Total_duration_of_fixations.al</i>	0,000 2	0,000 0	0,000 9	0,000 8	0,000 0	0,008 3
<i>Total_duration_of_fixations.ale</i>	0,000 2	0,000 0	0,000 7	0,000 2	0,000 0	0,000 8
<i>Total_duration_of_fixations.robot</i>				0,032 4	0,001 7	0,535 1
<i>Total_duration_of_fixations.v</i>	0,224 3	0,022 2	0,019 5	0,989 4	0,100 4	0,041 4
<i>Average_duration_of_fixations.al</i>	0,487 6	0,001 1	0,001 5	0,214 0	0,112 5	0,679 3
<i>Average_duration_of_fixations.ale</i>	0,488 2	0,000 8	0,003 4	0,055 6	0,008 1	0,544 6
<i>Average_duration_of_fixations.robot</i>				0,196 9	0,078 2	0,813 0
<i>Average_duration_of_fixations.v</i>		0,840 1		0,189 5	0,612 6	0,677 5
<i>Minimum_duration_of_fixations.al</i>	0,229 8	0,872 0	0,286 4	0,175 2	0,277 4	0,307 7
<i>Minimum_duration_of_fixations.ale</i>	0,573 1	0,151 9	0,099 4	0,435 9	0,801 2	0,472 0
<i>Minimum_duration_of_fixations.v</i>		0,093 7		0,843 7	0,344 3	0,513 2
<i>Maximum_duration_of_fixations.al</i>	0,084 1	0,000 1	0,000 2	0,007 4	0,004 8	0,427 9
<i>Maximum_duration_of_fixations.ale</i>	0,186 7	0,000 0	0,000 1	0,002 5	0,000 2	0,272 3
<i>Maximum_duration_of_fixations.robot</i>				0,026 7	0,012 4	0,897 1
<i>Maximum_duration_of_fixations.v</i>		0,062 4		0,404 5	0,878 3	0,344 3
<i>Number_of_fixations.al</i>	0,000 6	0,000 0	0,006 0	0,013 0	0,000 0	0,005 9

<i>Number_of_fixations.ale</i>	0,000 5	0,000 0	0,000 5	0,000 7	0,000 0	0,000 0
<i>Number_of_fixations.robot</i>				0,238 6	0,002 3	0,049 9
<i>Number_of_fixations.v</i>	0,643 7	0,007 3	0,002 9	0,911 6	0,066 5	0,025 7
<i>Time_to_first_fixation.al</i>	0,816 6	0,866 1	0,733 5	0,230 4	0,394 6	0,736 0
<i>Time_to_first_fixation.ale</i>	0,682 9	0,706 1	0,522 1	0,608 4	0,265 3	0,639 9
<i>Time_to_first_fixation.robot</i>				0,767 3	0,161 9	0,139 1
<i>Time_to_first_fixation.v</i>		0,000 0		0,347 2	0,804 3	0,434 9
<i>Duration_of_first_fixation.al</i>	0,298 6	0,233 4	0,015 2	0,829 9	0,418 6	0,295 8
<i>Duration_of_first_fixation.ale</i>	0,065 3	0,303 3	0,004 6	0,430 0	0,309 9	0,079 2
<i>Duration_of_first_fixation.robot</i>				0,253 0	0,908 4	0,331 9
<i>Duration_of_first_fixation.v</i>		0,643 3		0,115 0	0,467 8	0,616 2
<i>Average_pupil_diameter.al</i>	0,488 3	0,888 5	0,421 6	0,692 5	0,789 1	0,639 9
<i>Average_pupil_diameter.ale</i>	0,484 1	0,791 2	0,529 4	0,686 7	0,454 9	0,574 7
<i>Average_pupil_diameter.robot</i>				0,682 9	0,139 7	0,330 3
<i>Average_pupil_diameter.v</i>		0,633 4		0,505 8	0,260 9	0,363 0
<i>Total_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,000 4	0,000 0	0,004 4	0,000 1	0,000 0	0,028 6
<i>Total_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,000 6	0,000 0	0,001 2	0,000 2	0,000 0	0,001 6
<i>Total_duration_of_whole_fixations.robot</i>				0,012 3	0,000 4	0,507 7
<i>Total_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,386 1	0,025 7	0,010 1	0,897 4	0,091 7	0,053 1

<i>Average_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,801 6	0,005 2	0,001 7	0,227 5	0,164 7	0,812 0
<i>Average_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,746 8	0,007 3	0,016 9	0,083 3	0,021 2	0,639 2
<i>Average_duration_of_whole_fixations.robot</i>				0,146 2	0,060 2	0,853 7
<i>Average_duration_of_whole_fixations.v</i>		0,853 3		0,069 6	0,654 2	0,447 5
<i>Minimum_duration_of_whole_fixations.v</i>		0,020 1		0,457 9	0,028 5	0,526 8
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,160 2	0,000 1	0,000 5	0,011 2	0,009 7	0,474 3
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,225 9	0,000 0	0,000 4	0,001 9	0,000 5	0,383 6
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.robot</i>				0,014 9	0,006 7	0,910 7
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.v</i>		0,067 0		0,354 1	0,954 3	0,401 7
<i>Number_of_whole_fixations.al</i>	0,000 8	0,000 0	0,022 6	0,005 6	0,000 0	0,011 6
<i>Number_of_whole_fixations.ale</i>	0,001 3	0,000 0	0,002 7	0,000 2	0,000 0	0,000 0
<i>Number_of_whole_fixations.robot</i>				0,108 1	0,001 0	0,047 4
<i>Number_of_whole_fixations.v</i>	0,981 8	0,005 9	0,003 3	0,867 3	0,036 8	0,034 4
<i>Time_to_first_whole_fixation.al</i>	0,129 7	0,072 7	0,002 8	0,980 0	0,722 6	0,772 6
<i>Time_to_first_whole_fixation.ale</i>	0,169 0	0,009 3	0,001 3	0,741 7	0,689 9	0,492 1
<i>Time_to_first_whole_fixation.robot</i>				0,672 0	0,126 9	0,090 9
<i>Time_to_first_whole_fixation.v</i>		0,000 0		0,285 9	0,248 8	0,822 0
<i>Duration_of_first_whole_fixation.al</i>	0,407 3	0,136 9	0,007 0	0,748 6	0,757 0	0,505 8
<i>Duration_of_first_whole_fixation.ale</i>	0,124 7	0,037 2	0,003 1	0,238 4	0,979 4	0,112 4

<i>Duration_of_first_whole_fixation.robot</i>				0,614 5	0,790 3	0,804 1
<i>Duration_of_first_whole_fixation.v</i>		0,549 7		0,083 8	0,833 7	0,374 4
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.al</i>	0,467 1	0,837 8	0,382 9	0,741 9	0,623 1	0,817 4
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.ale</i>	0,461 1	0,846 0	0,484 2	0,731 7	0,261 4	0,554 2
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.robot</i>				0,664 6	0,147 1	0,335 1
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.v</i>		0,356 3		0,674 6	0,020 3	0,286 1
<i>Total_duration_of_Visit.al</i>	0,000 1	0,000 0	0,002 3	0,004 0	0,000 0	0,006 6
<i>Total_duration_of_Visit.ale</i>	0,000 1	0,000 0	0,009 2	0,002 0	0,000 0	0,000 6
<i>Total_duration_of_Visit.robot</i>				0,046 6	0,001 9	0,489 0
<i>Total_duration_of_Visit.v</i>	0,250 7	0,042 1	0,058 3	0,972 5	0,093 6	0,039 3
<i>Average_duration_of_Visit.al</i>	0,267 7	0,289 1	0,998 4	0,583 3	0,271 1	0,763 5
<i>Average_duration_of_Visit.ale</i>	0,030 3	0,017 5	0,976 4	0,793 3	0,179 3	0,811 6
<i>Average_duration_of_Visit.robot</i>				0,382 3	0,054 6	0,418 8
<i>Average_duration_of_Visit.v</i>		0,774 8		0,116 3	0,615 1	0,554 5
<i>Minimum_duration_of_Visit.al</i>	0,013 0	0,000 1	0,288 9	0,160 2	0,009 7	0,824 6
<i>Minimum_duration_of_Visit.ale</i>	0,508 4	0,011 3	0,212 2	0,065 6	0,001 0	0,560 7
<i>Minimum_duration_of_Visit.robot</i>				0,073 3	0,062 0	0,714 7
<i>Minimum_duration_of_Visit.v</i>		0,036 2		0,022 9	0,013 3	0,701 0
<i>Maximum_duration_of_Visit.al</i>	0,007 0	0,004 4	0,275 2	0,067 5	0,001 0	0,362 8

<i>Maximum_duration_of_Visit.ale</i>	0,000 2	0,000 0	0,033 4	0,326 5	0,000 0	0,075 0
<i>Maximum_duration_of_Visit.robot</i>				0,097 2	0,002 7	0,076 2
<i>Maximum_duration_of_Visit.v</i>		0,139 5		0,416 4	0,629 7	0,175 1
<i>Number_of_Visits.al</i>	0,002 7	0,000 0	0,003 7	0,003 7	0,000 1	0,000 7
<i>Number_of_Visits.ale</i>	0,150 5	0,000 0	0,018 4	0,197 2	0,000 0	0,000 0
<i>Number_of_Visits.robot</i>				0,064 6	0,000 8	0,054 1
<i>Number_of_Visits.v</i>	0,942 9	0,001 4	0,001 7	0,957 3	0,018 9	0,020 6
<i>Time_to_first_Visit.al</i>	0,766 2	0,885 8	0,711 4	0,234 4	0,400 1	0,683 8
<i>Time_to_first_Visit.ale</i>	0,903 5	0,123 1	0,112 2	0,321 5	0,124 5	0,701 3
<i>Time_to_first_Visit.robot</i>				0,767 0	0,161 5	0,138 8
<i>Time_to_first_Visit.v</i>		0,000 0		0,347 2	0,803 7	0,435 2
<i>Duration_of_first_Visit.al</i>	0,806 0	0,764 0	0,631 8	0,137 4	0,642 6	0,207 3
<i>Duration_of_first_Visit.ale</i>	0,652 8	0,504 6	0,990 3	0,176 2	0,853 0	0,288 9
<i>Duration_of_first_Visit.robot</i>				0,371 8	0,209 6	0,986 5
<i>Duration_of_first_Visit.v</i>		0,967 7		0,166 1	0,946 7	0,127 4
<i>Total_duration_of_Glances.al</i>	0,000 1	0,000 0	0,002 4	0,003 7	0,000 0	0,006 0
<i>Total_duration_of_Glances.ale</i>	0,000 1	0,000 0	0,009 2	0,001 9	0,000 0	0,000 6
<i>Total_duration_of_Glances.robot</i>				0,046 0	0,001 7	0,488 7
<i>Total_duration_of_Glances.v</i>	0,301 6	0,037 5	0,057 5	0,907 4	0,078 2	0,036 5

<i>Average_duration_of_Glances.al</i>	0,268 9	0,288 5	0,993 2	0,584 8	0,270 6	0,761 9
<i>Average_duration_of_Glances.ale</i>	0,030 4	0,017 5	0,975 5	0,792 9	0,179 3	0,812 3
<i>Average_duration_of_Glances.robot</i>				0,398 6	0,054 7	0,410 4
<i>Average_duration_of_Glances.v</i>		0,950 7		0,127 7	0,633 1	0,579 1
<i>Minimum_duration_of_Glances.al</i>	0,011 9	0,000 2	0,434 1	0,154 7	0,002 7	0,668 9
<i>Minimum_duration_of_Glances.ale</i>	0,556 1	0,013 2	0,209 5	0,079 5	0,001 7	0,622 4
<i>Minimum_duration_of_Glances.robot</i>				0,105 4	0,064 0	0,638 5
<i>Minimum_duration_of_Glances.v</i>		0,147 7		0,156 1	0,008 1	0,284 9
<i>Maximum_duration_of_Glances.al</i>	0,007 0	0,004 4	0,274 7	0,067 6	0,001 0	0,362 5
<i>Maximum_duration_of_Glances.ale</i>	0,000 2	0,000 0	0,033 3	0,326 2	0,000 0	0,075 0
<i>Maximum_duration_of_Glances.robot</i>				0,102 1	0,002 7	0,075 6
<i>Maximum_duration_of_Glances.v</i>		0,164 3		0,441 3	0,621 7	0,189 3
<i>Number_of_Glances.al</i>	0,002 7	0,000 0	0,003 7	0,003 7	0,000 1	0,000 7
<i>Number_of_Glances.ale</i>	0,150 5	0,000 0	0,018 4	0,197 2	0,000 0	0,000 0
<i>Number_of_Glances.robot</i>				0,064 4	0,000 8	0,054 4
<i>Number_of_Glances.v</i>	0,942 9	0,001 4	0,001 7	0,957 4	0,018 9	0,020 6
<i>Time_to_first_Glance.al</i>	0,805 8	0,894 4	0,745 2	0,236 9	0,406 5	0,680 9
<i>Time_to_first_Glance.ale</i>	0,863 3	0,128 1	0,126 2	0,346 8	0,132 1	0,670 9
<i>Time_to_first_Glance.robot</i>				0,765 3	0,161 9	0,138 9

<i>Time_to_first_Glance.v</i>		0,000 0		0,347 0	0,803 2	0,435 4
<i>Duration_of_first_Glance.al</i>	0,807 5	0,769 1	0,636 5	0,135 3	0,634 3	0,206 1
<i>Duration_of_first_Glance.ale</i>	0,652 5	0,505 8	0,988 9	0,176 2	0,852 7	0,289 0
<i>Duration_of_first_Glance.robot</i>				0,374 5	0,221 7	0,978 8
<i>Duration_of_first_Glance.v</i>		0,893 6		0,160 9	0,936 9	0,122 6
<i>Total_duration_of_whole_fixations</i>	0,001 1	0,000 0	0,001 3	0,000 2	0,000 0	0,000 7
<i>Average_duration_of_whole_fixations</i>	0,766 2	0,010 7	0,026 9	0,073 7	0,012 7	0,648 2
<i>Number_of_whole_fixations</i>	0,004 1	0,000 0	0,003 6	0,000 5	0,000 0	0,000 0
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	0,091 4	0,040 5	0,003 0	0,291 0	0,861 8	0,249 4
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter</i>	0,449 8	0,836 9	0,470 2	0,729 1	0,226 6	0,546 8
<i>Number_of_saccades</i>	0,002 3	0,000 0	0,001 5	0,000 5	0,000 0	0,000 0
<i>Average_peak_velocity_of_saccades</i>	0,314 4	0,686 1	0,421 8	0,070 7	0,116 6	0,207 1
<i>Minimum_peak_velocity_of_saccades</i>	0,178 9	0,000 4	0,403 2	0,146 5	0,000 2	0,205 7
<i>Maximum_peak_velocity_of_saccades</i>	0,538 1	0,050 3	0,099 7	0,582 5	0,002 0	0,050 0
<i>Standard_deviation_of_peak_velocity_of_saccades</i>	0,499 5	0,445 6	0,992 2	0,191 0	0,816 1	0,215 2
<i>Average_amplitude_of_saccades</i>	0,099 8	0,562 5	0,065 4	0,159 4	0,155 3	0,718 3
<i>Minimum_amplitude_of_saccades</i>	0,001 4	0,000 0	0,112 0	0,015 6	0,004 8	0,768 1
<i>Maximum_amplitude_of_saccades</i>	0,183 0	0,488 3	0,025 9	0,668 4	0,033 2	0,213 6

<i>Total_amplitude_of_saccades</i>	0,012 5	0,000 0	0,002 1	0,000 6	0,000 0	0,001 5
<i>Time_to_first_saccade</i>	0,191 4	0,438 6	0,091 0	0,526 4	0,569 8	0,259 5
<i>Direction_of_first_saccade</i>	0,779 4	0,326 7	0,304 9	0,344 4	0,142 8	0,920 3
<i>Peak_velocity_of_first_saccade</i>	0,099 8	0,486 1	0,301 1	0,237 0	0,535 7	0,408 9
<i>Average_velocity_of_first_saccade</i>	0,106 0	0,285 4	0,526 4	0,170 8	0,233 3	0,473 3
<i>Amplitude_of_first_saccade</i>	0,436 9	0,253 2	0,987 6	0,623 1	0,571 8	0,205 7
<i>Number_of_saccades_in_AOI.al</i>	0,000 5	0,000 0	0,004 1	0,019 5	0,000 3	0,022 6
<i>Number_of_saccades_in_AOI.ale</i>	0,000 9	0,000 0	0,000 7	0,000 3	0,000 0	0,000 0
<i>Number_of_saccades_in_AOI.robot</i>				0,417 7	0,005 6	0,059 0
<i>Number_of_saccades_in_AOI.v</i>	0,470 6	0,109 1	0,018 2	0,734 8	0,314 3	0,106 2
<i>Time_to_entry_saccade.al</i>	0,166 6	0,001 4	0,492 5	0,381 3	0,243 5	0,022 5
<i>Time_to_entry_saccade.robot</i>				0,797 6	0,006 4	0,023 6
<i>Time_to_exit_saccade.al</i>	0,248 2			0,935 8	0,450 8	0,345 5

Tabella 17: Metriche Eyetracking - Pvalue (1-m-hrc; 2-m-hrc; 3-m-hrc)

Metriche Eyetracking	1-m-hrc	2-m-hrc	3-m-hrc
<i>Total_duration_of_fixations.al</i>	0,1113	0,3046	0,5718
<i>Total_duration_of_fixations.ale</i>	0,0151	0,1149	0,1774
<i>Total_duration_of_fixations.v</i>	0,0234	0,0493	0,5716
<i>Average_duration_of_fixations.al</i>	0,7362	0,4367	0,1122
<i>Average_duration_of_fixations.ale</i>	0,7836	0,2568	0,2853
<i>Average_duration_of_fixations.v</i>	0,1959		0,6650
<i>Minimum_duration_of_fixations.al</i>	0,5670	0,7381	0,8259

<i>Minimum_duration_of_fixations.ale</i>	0,7189	0,8147	0,0607
<i>Minimum_duration_of_fixations.v</i>	0,0349		0,0178
<i>Maximum_duration_of_fixations.al</i>	0,3166	0,1182	0,2229
<i>Maximum_duration_of_fixations.ale</i>	0,2443	0,0235	0,6461
<i>Maximum_duration_of_fixations.v</i>	0,0293		0,5863
<i>Number_of_fixations.al</i>	0,1390	0,6985	0,3634
<i>Number_of_fixations.ale</i>	0,0164	0,1735	0,0024
<i>Number_of_fixations.v</i>	0,0186	0,0037	0,0562
<i>Time_to_first_fixation.al</i>	0,0196	0,5531	0,1870
<i>Time_to_first_fixation.ale</i>	0,7766	0,4839	0,5217
<i>Time_to_first_fixation.v</i>	0,2847		0,0012
<i>Duration_of_first_fixation.al</i>	0,1217	0,0318	0,3819
<i>Duration_of_first_fixation.ale</i>	0,1220	0,0315	0,1990
<i>Duration_of_first_fixation.v</i>	0,3178		0,3197
<i>Average_pupil_diameter.al</i>	0,2089	0,0390	0,2666
<i>Average_pupil_diameter.ale</i>	0,2271	0,0347	0,2270
<i>Average_pupil_diameter.v</i>	0,2813		0,2607
<i>Total_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,0824	0,1413	0,2150
<i>Total_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,0136	0,0274	0,0300
<i>Total_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,0276	0,0267	0,3813
<i>Average_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,9352	0,2820	0,1822
<i>Average_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,9166	0,1830	0,7915
<i>Average_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,1680		0,3527
<i>Minimum_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,4534		0,9112
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,2812	0,0758	0,2733
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,1796	0,0175	0,8764
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,0248		0,5137
<i>Number_of_whole_fixations.al</i>	0,0784	0,5821	0,1226
<i>Number_of_whole_fixations.ale</i>	0,0182	0,0394	0,0016
<i>Number_of_whole_fixations.v</i>	0,0228	0,0036	0,0841

<i>Time_to_first_whole_fixation.al</i>	0,1538	0,0384	0,9254
<i>Time_to_first_whole_fixation.ale</i>	0,5148	0,1857	0,1456
<i>Time_to_first_whole_fixation.v</i>	0,2013		0,0049
<i>Duration_of_first_whole_fixation.al</i>	0,0252	0,0504	0,4997
<i>Duration_of_first_whole_fixation.ale</i>	0,0012	0,0413	0,2429
<i>Duration_of_first_whole_fixation.v</i>	0,2098		0,0717
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.al</i>	0,1355	0,0338	0,0737
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.ale</i>	0,1564	0,0302	0,3892
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.v</i>	0,1879		0,1421
<i>Total_duration_of_Visit.al</i>	0,1176	0,4397	0,5169
<i>Total_duration_of_Visit.ale</i>	0,0067	0,6854	0,3465
<i>Total_duration_of_Visit.v</i>	0,0371	0,2450	0,9255
<i>Average_duration_of_Visit.al</i>	0,0233	0,0357	0,0191
<i>Average_duration_of_Visit.ale</i>	0,9027	0,5179	0,8335
<i>Average_duration_of_Visit.v</i>	0,1354		0,5931
<i>Minimum_duration_of_Visit.al</i>	0,0026	0,0809	0,1956
<i>Minimum_duration_of_Visit.ale</i>	0,8886	0,0750	0,6682
<i>Minimum_duration_of_Visit.v</i>	0,6651		0,2457
<i>Maximum_duration_of_Visit.al</i>	0,1714	0,4052	0,6250
<i>Maximum_duration_of_Visit.ale</i>	0,5108	0,4429	0,3374
<i>Maximum_duration_of_Visit.v</i>	0,0711		0,4725
<i>Number_of_Visits.al</i>	0,0019	0,0420	0,0159
<i>Number_of_Visits.ale</i>	0,0152	0,4540	0,0123
<i>Number_of_Visits.v</i>	0,0075	0,0029	0,0302
<i>Time_to_first_Visit.al</i>	0,0158	0,4812	0,1259
<i>Time_to_first_Visit.ale</i>	0,6919	0,5069	0,6160
<i>Time_to_first_Visit.v</i>	0,2846		0,0013
<i>Duration_of_first_Visit.al</i>	0,1343	0,0172	0,0217
<i>Duration_of_first_Visit.ale</i>	0,5084	0,2076	0,5006
<i>Duration_of_first_Visit.v</i>	0,3628		0,3755

<i>Total_duration_of_Glances.al</i>	0,1116	0,4296	0,4943
<i>Total_duration_of_Glances.ale</i>	0,0065	0,6759	0,3476
<i>Total_duration_of_Glances.v</i>	0,0358	0,2341	0,8890
<i>Average_duration_of_Glances.al</i>	0,0236	0,0360	0,0192
<i>Average_duration_of_Glances.ale</i>	0,9048	0,5199	0,8340
<i>Average_duration_of_Glances.v</i>	0,2139		0,5916
<i>Minimum_duration_of_Glances.al</i>	0,0074	0,1823	0,0984
<i>Minimum_duration_of_Glances.ale</i>	0,8863	0,1459	0,6389
<i>Minimum_duration_of_Glances.v</i>	0,8000		0,0530
<i>Maximum_duration_of_Glances.al</i>	0,1721	0,4044	0,6237
<i>Maximum_duration_of_Glances.ale</i>	0,5101	0,4435	0,3375
<i>Maximum_duration_of_Glances.v</i>	0,0809		0,4673
<i>Number_of_Glances.al</i>	0,0019	0,0420	0,0159
<i>Number_of_Glances.ale</i>	0,0152	0,4540	0,0123
<i>Number_of_Glances.v</i>	0,0075	0,0029	0,0301
<i>Time_to_first_Glance.al</i>	0,0156	0,4609	0,1249
<i>Time_to_first_Glance.ale</i>	0,7386	0,5400	0,6707
<i>Time_to_first_Glance.v</i>	0,2841		0,0013
<i>Duration_of_first_Glance.al</i>	0,1354	0,0171	0,0216
<i>Duration_of_first_Glance.ale</i>	0,5088	0,2071	0,5005
<i>Duration_of_first_Glance.v</i>	0,4006		0,3657
<i>Total_duration_of_whole_fixations</i>	0,0082	0,0037	0,0366
<i>Average_duration_of_whole_fixations</i>	0,9874	0,1685	0,9703
<i>Number_of_whole_fixations</i>	0,0129	0,0524	0,0015
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	0,0008	0,0448	0,2826
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter</i>	0,1753	0,0307	0,4552
<i>Number_of_saccades</i>	0,0063	0,0297	0,0045
<i>Average_peak_velocity_of_saccades</i>	0,0141	0,9377	0,0135
<i>Minimum_peak_velocity_of_saccades</i>	0,2200	0,1231	0,2529
<i>Maximum_peak_velocity_of_saccades</i>	0,3308	0,4859	0,2770

<i>Standard_deviation_of_peak_velocity_of_saccades</i>	0,2505	0,9208	0,1089
<i>Average_amplitude_of_saccades</i>	0,1117	0,1459	0,1056
<i>Minimum_amplitude_of_saccades</i>	0,2820	0,0765	0,7716
<i>Maximum_amplitude_of_saccades</i>	0,2826	0,0085	0,0155
<i>Total_amplitude_of_saccades</i>	0,0020	0,0133	0,0060
<i>Time_to_first_saccade</i>	0,7271	0,7792	0,5463
<i>Direction_of_first_saccade</i>	0,9357	0,4099	0,9652
<i>Peak_velocity_of_first_saccade</i>	0,0463	0,2550	0,2268
<i>Average_velocity_of_first_saccade</i>	0,0283	0,2153	0,5540
<i>Amplitude_of_first_saccade</i>	0,5995	0,3754	0,7729
<i>Number_of_saccades_in_AOI.al</i>	0,1330	0,6661	0,3792
<i>Number_of_saccades_in_AOI.ale</i>	0,0117	0,0259	0,0061
<i>Number_of_saccades_in_AOI.v</i>	0,1124	0,0069	0,1520
<i>Time_to_entry_saccade.al</i>	0,6758	0,0332	0,4747
<i>Time_to_entry_saccade.ale</i>		0,9997	
<i>Time_to_exit_saccade.al</i>	0,9089	0,2884	
<i>Time_to_exit_saccade.ale</i>		0,8347	

Tabella 18: Metriche Eyetracking - Pvalue (1m-2hrc; 1m-3hrc; 2m-1hrc; 2m-3hrc; 3m-1hrc; 3m-2hrc)

Metriche Eyetracking	1m-2hrc	1m-3hrc	2m-1hrc	2m-3hrc	3m-1hrc	3m-2hrc
<i>Total_duration_of_fixations.al</i>	0,000 0	0,000 0	0,001 4	0,000 0	0,000 0	0,0081
<i>Total_duration_of_fixations.ale</i>	0,000 5	0,000 0	0,120 0	0,000 5	0,003 1	0,0934
<i>Total_duration_of_fixations.v</i>	0,026 8	0,035 7	0,080 2	0,000 0	0,391 2	0,3637
<i>Average_duration_of_fixations.al</i>	0,292 8	0,118 2	0,638 2	0,287 0	0,005 7	0,1272
<i>Average_duration_of_fixations.ale</i>	0,142 7	0,016 5	0,575 5	0,108 8	0,002 6	0,2673
<i>Average_duration_of_fixations.v</i>	0,849 2	0,645 8			0,357 3	0,9637

<i>Minimum_duration_of_fixations.al</i>	0,230 9	0,620 8	0,250 8	0,442 0	0,711 2	0,3828
<i>Minimum_duration_of_fixations.ale</i>	0,466 6	0,903 1	0,520 0	0,572 8	0,491 8	0,2820
<i>Minimum_duration_of_fixations.v</i>	0,144 9	0,625 8			0,671 2	0,8631
<i>Maximum_duration_of_fixations.al</i>	0,027 1	0,006 3	0,318 2	0,054 5	0,000 8	0,1551
<i>Maximum_duration_of_fixations.ale</i>	0,010 2	0,001 1	0,570 3	0,006 5	0,000 3	0,2641
<i>Maximum_duration_of_fixations.v</i>	0,279 5	0,896 2			0,717 1	0,8015
<i>Number_of_fixations.al</i>	0,006 0	0,000 1	0,015 3	0,016 3	0,000 1	0,0280
<i>Number_of_fixations.ale</i>	0,000 1	0,000 0	0,074 4	0,000 1	0,000 0	0,0315
<i>Number_of_fixations.v</i>	0,049 3	0,103 6	0,030 4	0,000 2	0,948 9	0,8604
<i>Time_to_first_fixation.al</i>	0,783 3	0,506 6	0,157 5	0,449 9	0,103 3	0,5283
<i>Time_to_first_fixation.ale</i>	0,571 6	0,512 1	0,950 9	0,468 2	0,729 4	0,9826
<i>Time_to_first_fixation.v</i>	0,206 2	0,856 8			0,000 3	0,0026
<i>Duration_of_first_fixation.al</i>	0,689 3	0,544 1	0,154 8	0,048 8	0,997 9	0,9025
<i>Duration_of_first_fixation.ale</i>	0,999 7	0,441 3	0,098 8	0,018 7	0,913 4	0,7273
<i>Duration_of_first_fixation.v</i>	0,724 9	0,635 3			0,257 7	0,7380
<i>Average_pupil_diameter.al</i>	0,461 7	0,810 4	0,254 6	0,293 1	0,258 1	0,5194
<i>Average_pupil_diameter.ale</i>	0,473 7	0,504 5	0,264 6	0,367 3	0,120 4	0,4680
<i>Average_pupil_diameter.v</i>	0,954 8	0,269 3			0,563 8	0,6888

<i>Total_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,000 0	0,000 0	0,004 0	0,000 1	0,000 0	0,1152
<i>Total_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,000 1	0,000 0	0,039 9	0,000 0	0,000 9	0,1977
<i>Total_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,029 6	0,038 2	0,073 8	0,000 0	0,442 1	0,4523
<i>Average_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,399 4	0,161 2	0,774 3	0,258 7	0,016 5	0,2474
<i>Average_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,205 5	0,034 5	0,793 1	0,098 2	0,020 7	0,5948
<i>Average_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,975 5	0,675 9			0,198 2	0,9489
<i>Minimum_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,185 4	0,191 2			0,201 5	0,6057
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.al</i>	0,031 8	0,011 5	0,500 0	0,050 1	0,001 7	0,1809
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.ale</i>	0,007 7	0,001 6	0,662 7	0,007 0	0,000 7	0,4238
<i>Maximum_duration_of_whole_fixations.v</i>	0,231 4	0,959 3			0,592 9	0,8945
<i>Number_of_whole_fixations.al</i>	0,002 1	0,000 1	0,042 2	0,010 8	0,000 5	0,2043
<i>Number_of_whole_fixations.ale</i>	0,000 1	0,000 0	0,169 5	0,000 1	0,000 2	0,1919
<i>Number_of_whole_fixations.v</i>	0,035 2	0,073 1	0,047 9	0,000 3	0,749 9	0,8482
<i>Time_to_first_whole_fixation.al</i>	0,601 4	0,810 5	0,162 8	0,119 9	0,724 2	0,7538
<i>Time_to_first_whole_fixation.ale</i>	0,867 5	0,823 6	0,395 1	0,274 2	0,278 9	0,2037
<i>Time_to_first_whole_fixation.v</i>	0,139 5	0,407 6			0,000 3	0,0055
<i>Duration_of_first_whole_fixation.al</i>	0,553 2	0,824 2	0,132 2	0,094 3	0,752 7	0,9375
<i>Duration_of_first_whole_fixation.ale</i>	0,560 4	0,985 4	0,028 4	0,028 4	0,366 1	0,9336

<i>Duration_of_first_whole_fixation.v</i>	0,933 7	0,895 1			0,133 2	0,4701
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.al</i>	0,448 2	0,673 9	0,192 4	0,147 7	0,168 0	0,5181
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.ale</i>	0,466 2	0,306 3	0,208 1	0,363 3	0,082 3	0,4715
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter.v</i>	0,431 5	0,027 7			0,597 0	0,9276
<i>Total_duration_of_Visit.al</i>	0,000 0	0,000 0	0,032 9	0,000 0	0,000 0	0,0175
<i>Total_duration_of_Visit.ale</i>	0,005 6	0,002 3	0,305 5	0,023 0	0,048 9	0,1725
<i>Total_duration_of_Visit.v</i>	0,038 6	0,028 5	0,248 1	0,000 7	0,343 2	0,3360
<i>Average_duration_of_Visit.al</i>	0,215 0	0,331 7	0,011 3	0,075 6	0,009 2	0,0609
<i>Average_duration_of_Visit.ale</i>	0,162 3	0,657 1	0,469 3	0,853 8	0,424 0	0,4776
<i>Average_duration_of_Visit.v</i>	0,931 3	0,628 8			0,330 7	0,9600
<i>Minimum_duration_of_Visit.al</i>	0,000 8	0,173 5	0,881 8	0,177 2	0,500 3	0,6332
<i>Minimum_duration_of_Visit.ale</i>	0,040 7	0,174 5	0,224 3	0,788 3	0,062 9	0,8241
<i>Minimum_duration_of_Visit.v</i>	0,067 2	0,105 8			0,191 9	0,8371
<i>Maximum_duration_of_Visit.al</i>	0,292 6	0,001 7	0,002 3	0,770 9	0,000 9	0,1863
<i>Maximum_duration_of_Visit.ale</i>	0,000 6	0,037 6	0,184 0	0,196 7	0,022 9	0,0441
<i>Maximum_duration_of_Visit.v</i>	0,449 0	0,662 1			0,848 9	0,6317
<i>Number_of_Visits.al</i>	0,000 1	0,000 1	0,652 7	0,000 3	0,006 3	0,3381
<i>Number_of_Visits.ale</i>	0,035 5	0,000 0	0,849 1	0,000 2	0,007 5	0,0718

<i>Number_of_Visits.v</i>	0,021 4	0,053 8	0,022 9	0,000 1	0,866 4	0,9004
<i>Time_to_first_Visit.al</i>	0,707 0	0,518 6	0,135 2	0,374 0	0,087 3	0,4771
<i>Time_to_first_Visit.ale</i>	0,423 7	0,358 1	0,733 3	0,544 5	0,261 8	0,6876
<i>Time_to_first_Visit.v</i>	0,206 2	0,856 3			0,000 3	0,0028
<i>Duration_of_first_Visit.al</i>	0,011 6	0,794 1	0,366 6	0,254 7	0,164 1	0,0176
<i>Duration_of_first_Visit.ale</i>	0,545 5	0,946 6	0,335 8	0,478 3	0,315 6	0,4353
<i>Duration_of_first_Visit.v</i>	0,531 6	0,958 7			0,523 3	0,7938
<i>Total_duration_of_Glances.al</i>	0,000 0	0,000 0	0,034 8	0,000 0	0,000 0	0,0183
<i>Total_duration_of_Glances.ale</i>	0,005 6	0,002 3	0,306 1	0,023 1	0,049 1	0,1738
<i>Total_duration_of_Glances.v</i>	0,029 0	0,021 3	0,260 3	0,000 5	0,336 7	0,3457
<i>Average_duration_of_Glances.al</i>	0,215 4	0,331 5	0,011 4	0,076 3	0,009 2	0,0608
<i>Average_duration_of_Glances.ale</i>	0,161 5	0,657 4	0,470 3	0,854 8	0,424 6	0,4790
<i>Average_duration_of_Glances.v</i>	0,812 0	0,647 0			0,342 1	0,9992
<i>Minimum_duration_of_Glances.al</i>	0,001 5	0,094 0	0,880 4	0,197 4	0,397 2	0,6676
<i>Minimum_duration_of_Glances.ale</i>	0,060 3	0,186 7	0,239 3	0,799 4	0,063 3	0,9807
<i>Minimum_duration_of_Glances.v</i>	0,165 9	0,078 1			0,419 4	0,8028
<i>Maximum_duration_of_Glances.al</i>	0,292 6	0,001 7	0,002 3	0,771 6	0,000 9	0,1856
<i>Maximum_duration_of_Glances.ale</i>	0,000 6	0,037 6	0,184 0	0,196 7	0,022 8	0,0442

<i>Maximum_duration_of_Glances.v</i>	0,457 1	0,654 3			0,850 4	0,6646
<i>Number_of_Glances.al</i>	0,000 1	0,000 1	0,652 7	0,000 3	0,006 3	0,3381
<i>Number_of_Glances.ale</i>	0,035 5	0,000 0	0,849 1	0,000 2	0,007 5	0,0718
<i>Number_of_Glances.v</i>	0,021 4	0,053 7	0,022 9	0,000 1	0,866 5	0,9005
<i>Time_to_first_Glance.al</i>	0,705 7	0,524 3	0,130 9	0,359 3	0,088 7	0,4790
<i>Time_to_first_Glance.ale</i>	0,424 4	0,368 1	0,741 8	0,549 2	0,281 7	0,6917
<i>Time_to_first_Glance.v</i>	0,206 0	0,856 1			0,000 3	0,0028
<i>Duration_of_first_Glance.al</i>	0,011 6	0,788 8	0,367 5	0,252 9	0,166 2	0,0177
<i>Duration_of_first_Glance.ale</i>	0,545 1	0,946 5	0,336 0	0,478 7	0,315 4	0,4356
<i>Duration_of_first_Glance.v</i>	0,506 7	0,951 4			0,519 4	0,8170
<i>Total_duration_of_whole_fixations</i>	0,000 1	0,000 0	0,061 6	0,000 0	0,001 4	0,3700
<i>Average_duration_of_whole_fixations</i>	0,209 8	0,026 3	0,761 6	0,094 0	0,021 5	0,6883
<i>Number_of_whole_fixations</i>	0,000 2	0,000 0	0,286 8	0,000 0	0,000 3	0,1731
<i>Duration_of_first_whole_fixation</i>	0,525 6	0,906 9	0,030 8	0,036 4	0,378 5	0,9661
<i>Average_whole-fixation_pupil_diameter</i>	0,477 1	0,280 8	0,211 2	0,373 5	0,088 9	0,4801
<i>Number_of_saccades</i>	0,000 3	0,000 0	0,410 6	0,000 1	0,000 5	0,2078
<i>Average_peak_velocity_of_saccades</i>	0,440 6	0,260 6	0,015 3	0,086 6	0,015 2	0,6292
<i>Minimum_peak_velocity_of_saccades</i>	0,111 1	0,010 4	0,254 8	0,434 0	0,030 9	0,1949

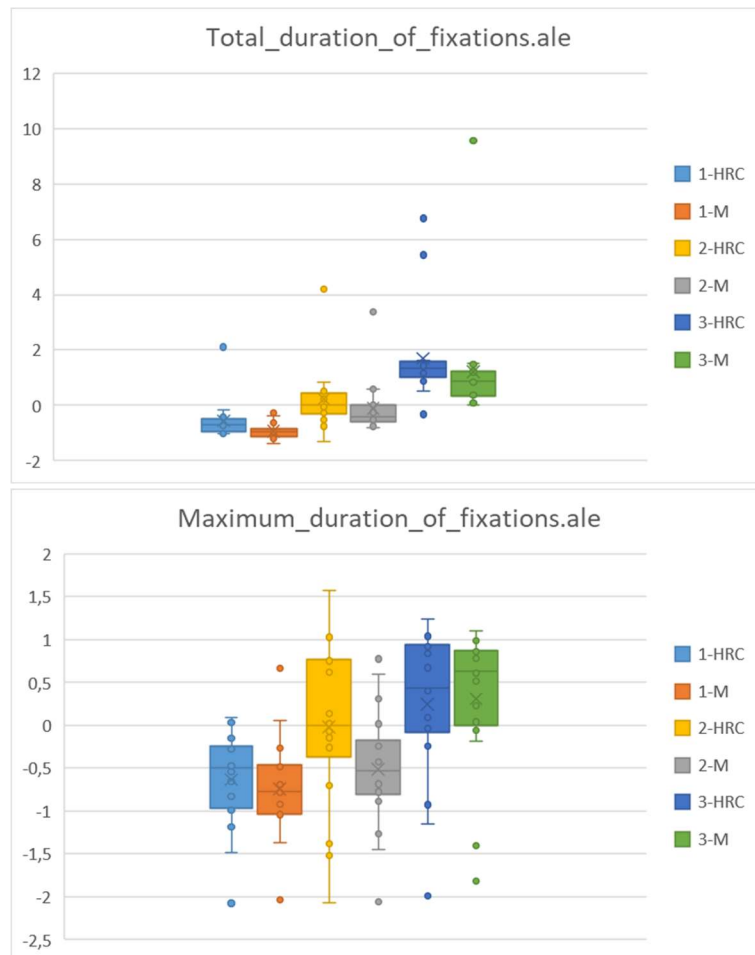
<i>Maximum_peak_velocity_of_saccades</i>	0,582 5	0,064 5	0,985 6	0,069 5	0,275 5	0,5447
<i>Standard_deviation_of_peak_velocity_of_saccades</i>	0,475 3	0,887 2	0,236 5	0,291 6	0,179 3	0,9440
<i>Average_amplitude_of_saccades</i>	0,862 8	0,254 4	0,003 9	0,032 1	0,031 8	0,6724
<i>Minimum_amplitude_of_saccades</i>	0,001 4	0,026 5	0,206 7	0,258 8	0,047 4	0,7403
<i>Maximum_amplitude_of_saccades</i>	0,520 0	0,199 5	0,030 7	0,001 9	0,812 0	0,6838
<i>Total_amplitude_of_saccades</i>	0,000 6	0,000 0	0,972 6	0,000 1	0,003 1	0,5903
<i>Time_to_first_saccade</i>	0,333 8	0,766 0	0,618 6	0,430 1	0,483 3	0,3040
<i>Direction_of_first_saccade</i>	0,340 7	0,418 3	0,832 5	0,558 0	0,401 6	0,9305
<i>Peak_velocity_of_first_saccade</i>	0,842 7	0,726 8	0,874 1	0,863 0	0,362 2	0,9327
<i>Average_velocity_of_first_saccade</i>	0,940 0	0,497 1	0,685 7	0,818 4	0,365 2	0,8310
<i>Amplitude_of_first_saccade</i>	0,767 6	0,753 2	0,875 0	0,884 5	0,871 9	0,6250
<i>Number_of_saccades_in_AOI.al</i>	0,007 2	0,000 4	0,065 5	0,017 5	0,000 7	0,1143
<i>Number_of_saccades_in_AOI.ale</i>	0,000 2	0,000 0	0,285 8	0,000 1	0,000 4	0,2211
<i>Number_of_saccades_in_AOI.v</i>	0,294 3	0,343 8	0,088 4	0,006 0	0,831 1	0,9501
<i>Time_to_entry_saccade.al</i>	0,543 7	0,335 3	0,390 3	0,898 3	0,101 9	0,0142

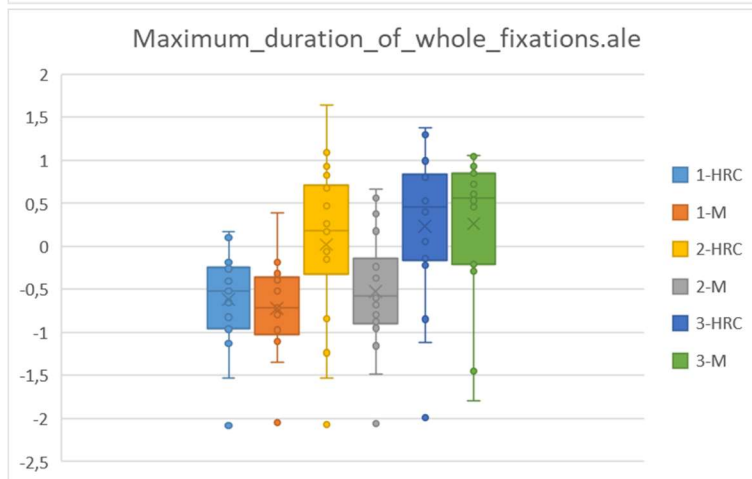
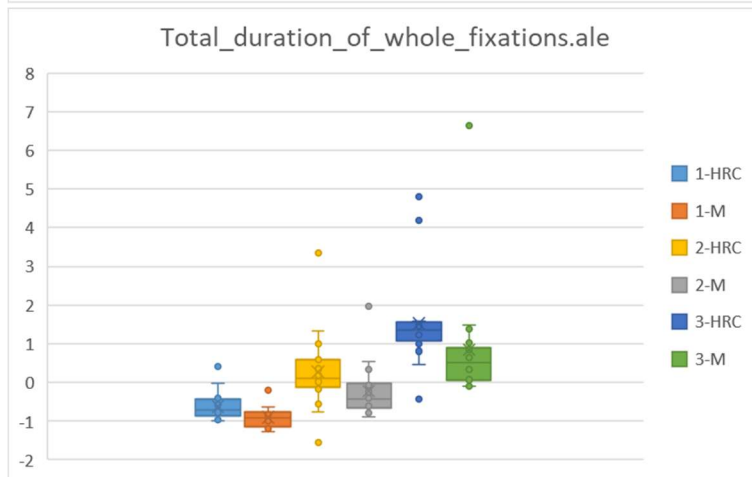
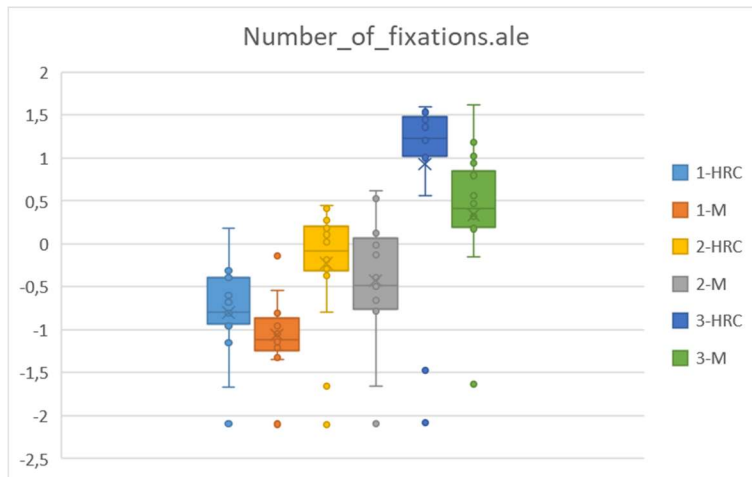
Le variabili con maggiore significatività riscontrata sono:

- Total_duration_of_fixations.ale
- Maximum_duration_of_fixations.ale
- Number_of_fixations.ale
- Total_duration_of_whole_fixations.ale

- Maximum_duration_of_whole_fixations.ale
- Number_of_whole_fixations.ale
- Total_duration_of_Visit.ale
- Number_of_Visit.ale
- Total_duration_of_Glances.ale
- Number_of_Glances.ale
- Total_duration_of_whole_fixations
- Number_of_saccades
- Total_amplitude_of_saccades
- Number_of_saccades_in_AOI.ale

Di seguito boxplot di metriche significative:





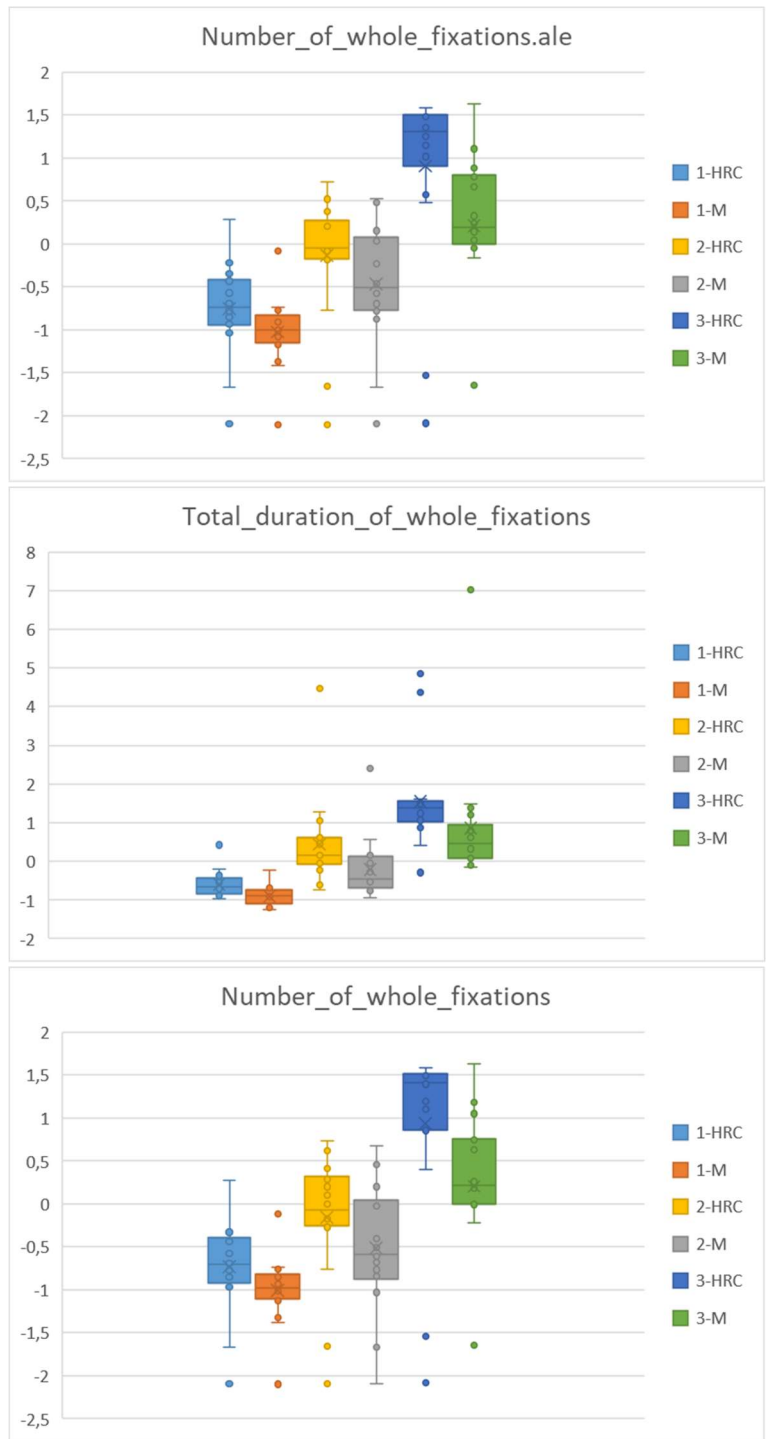


Figura 6. 10. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle fissazioni

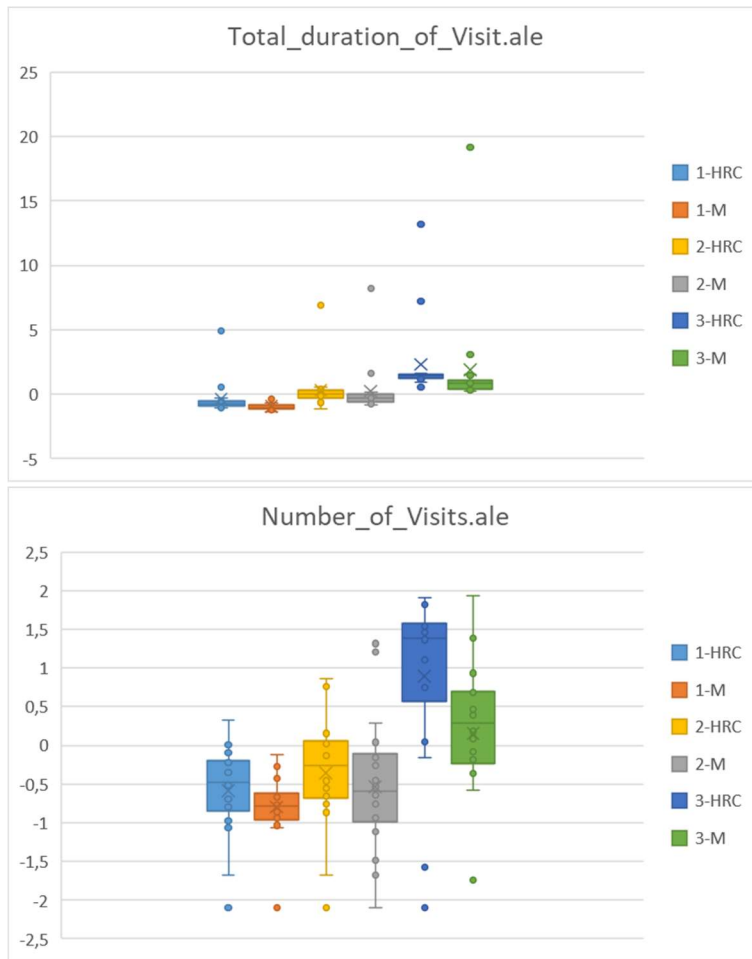


Figura 6. 11. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle Visite

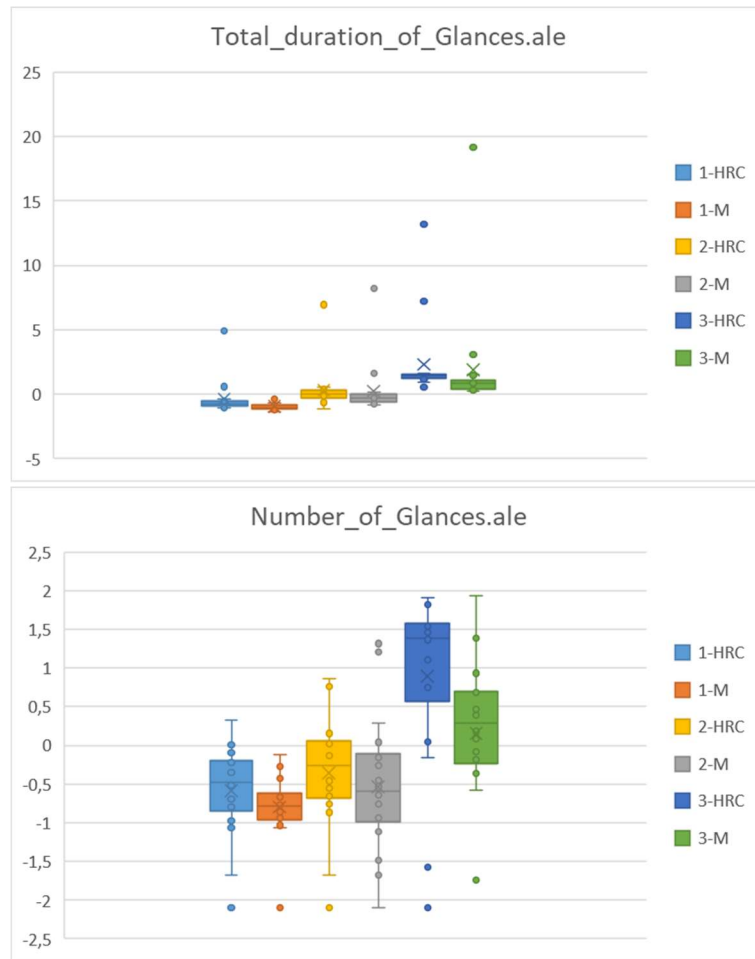


Figura 6. 12. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle Glances

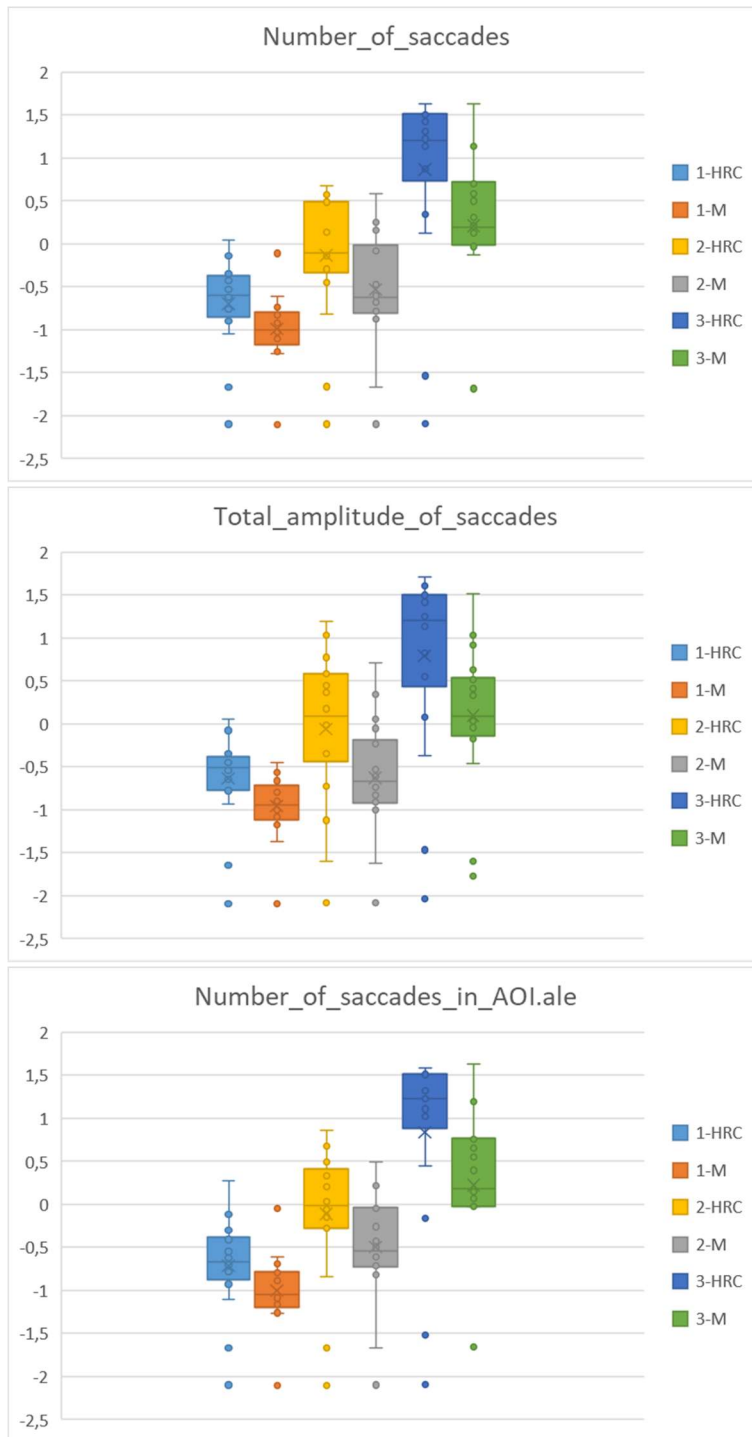


Figura 6. 13. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle Saccadi

Tutte queste hanno un trend crescente con l'aumentare della difficoltà dell'assemblaggio del pezzo. È evidente anche che gli esperimento con l'HRC hanno dati maggiori rispetto a quelli Manuali, ma assumono lo stesso trend di crescita.

Dunque la complessità dell'assemblaggio del pezzo influisce significativamente sulle variabili analizzate, mostrando un aumento delle fissazioni, delle visite, delle occhiate e delle durate correlate con l'aumentare della difficoltà. Questi risultati potrebbero suggerire un maggiore impegno cognitivo e visivo richiesto durante l'assemblaggio più complesso del pezzo.

I valori misurati nelle metriche per l'assemblaggio manuale sono inferiori rispetto a quelli per l'assemblaggio con l'ausilio di HRC, questo potrebbe indicare che l'utilizzo dell'HRC per le metriche significative comporti un aumento di queste, potendo significare un maggior coinvolgimento cognitivo.

Le differenze nei valori potrebbero essere attribuite a diversi fattori. Ad esempio, l'HRC potrebbe fornire un maggiore supporto e precisione durante l'assemblaggio, riducendo potenzialmente il tempo impiegato e aumentando l'efficienza. Inoltre, l'utilizzo di un robot può influenzare l'attenzione e la concentrazione dei partecipanti, portando a una maggiore accuratezza e tempi di esecuzione più brevi rispetto all'assemblaggio manuale.

Tuttavia, è importante considerare che le differenze osservate potrebbero dipendere anche da altri fattori, come la familiarità e l'esperienza dei partecipanti con l'uso dell'HRC. Inoltre, potrebbero esserci differenze nella complessità dei pezzi assemblati o nelle condizioni sperimentali tra l'assemblaggio manuale e l'utilizzo dell'HRC.

7. Conclusioni

La presente tesi sperimentale ha condotto due esperimenti con l'obiettivo di indagare come l'eye-tracking può essere utilizzato per l'analisi dei parametri fisiologici. Attraverso l'analisi dei risultati ottenuti, è possibile trarre alcune conclusioni importanti in relazione alla letteratura esistente e al confronto con gli studi precedenti.

Nel primo esperimento è emerso come un aumento del mental workload durante l'N-back porta i partecipanti a dedicare più tempo e attenzione ai punti di interesse nei compiti più impegnativi. Tuttavia, in relazione all'N-back, quindi all'aumentare del carico cognitivo, è stato osservato un trend crescente col diametro della pupilla, col numero di saccadi in AOI, col numero di fissazioni e un trend decrescente con la durata delle fissazioni. Rispetto alla letteratura queste relazioni sono coerenti, eccetto per la durata delle fissazioni che presenta un trend differente.

Inoltre, un aumento della difficoltà della prova causa una riduzione dell'accuratezza delle risposte, poiché è più difficoltoso memorizzare le informazioni richieste. I partecipanti mostrano un maggiore coinvolgimento e attenzione quando la sfida si fa più difficile. Questo è sicuramente dovuto alla natura stimolante e coinvolgente del compito.

Se la valutazione soggettiva della difficoltà dell'N-back con la scala VAS è più alta, questo può influire sul comportamento degli utenti: trascorrono meno tempo nelle fissazioni, nelle visite e nelle occhiate, e ciò indica una maggiore focalizzazione e meno distrazioni durante l'esecuzione del task.

È emerso anche che l'aumento del numero di trial ha portato a un miglioramento delle prestazioni e dell'attenzione durante lo svolgimento del compito. Questo risultato è in accordo con studi che evidenziano come l'esperienza e la pratica possano influenzare positivamente le prestazioni cognitive. Questi risultati possono contribuire a una comprensione più approfondita della relazione tra l'attenzione, l'accuratezza e la valutazione soggettiva nelle attività cognitive.

Nel secondo esperimento, è stato esaminato l'effetto della complessità dell'assemblaggio manuale o con HRC del pezzo sui parametri fisiologici riportati dal Tobii Pro Lab.

I risultati hanno mostrato che il trend delle metriche significative misurate durante gli esperimenti con HRC e senza mostrano un andamento di crescita simile. Questo suggerisce che entrambe le modalità richiedono un impegno cognitivo crescente durante l'assemblaggio di pezzi più complessi.

L'aumento della difficoltà dell'assemblaggio ha portato a un incremento delle fissazioni, delle visite e delle durate correlate. Questo è coerente con la letteratura esistente che evidenzia come la complessità di un compito influenzi l'impegno cognitivo richiesto.

Se si fa un confronto tra l'assemblaggio dello stesso elemento con o senza robot, si nota come i dati dell'HRC sono superiori rispetto a quelli col robot. Questo aumento di tali metriche può indicare un maggiore coinvolgimento cognitivo richiesto. L'HRC può offrire maggiore supporto e precisione aumentando l'efficienza complessiva del processo. Tuttavia, l'utilizzo del robot può influenzare l'attenzione dei partecipanti, ed è importante considerare anche altri fattori come l'esperienza dei partecipanti e la complessità dei pezzi assemblati, che potrebbero influenzare i risultati.

In conclusione, questa tesi sperimentale ha contribuito alla comprensione della variazione dei parametri fisiologici al variare del carico cognitivo e la complessità attraverso la conduzione di due esperimenti. I risultati ottenuti hanno confermato alcune ipotesi, evidenziato alcune relazioni significative e fornito nuove prospettive nel campo delle attività cognitive e dell'utilizzo di robot. Questi risultati possono servire come base per ulteriori ricerche e applicazioni pratiche nel campo dell'attenzione e dell'efficienza cognitive.

Tuttavia, è importante sottolineare che questi risultati sono specifici ai dati esaminato e alle condizioni sperimentali della presente tesi.

Elenco figure

Figura 1. 1. Human Robot Collaboration (www.reliableplant.com/Read/31352/human-robot-collaboration)	10
Figura 1. 2. Cobot (www.universal-robots.com/it/quali-sono-le-differenze-tra-cobot-e-robot-tradizionali/).....	12
Figura 2. 1. Riflessione Corneale (Bergstrom and Schall, 2014).....	16
Figura 2. 2. Zone di visione (Bergstrom and Schall, 2014)	17
Figura 3. 1. Carico cognitivo (breakeeducation.org/2020/06/09/pensiamo-mai-al-carico-cognitivo/)	24
Figura 3. 2. Sensori Empatica E4 (support.empatica.com/hc/en-us/articles/202581999-E4-wristband-technical-specifications).....	26
Figura 3. 3. Empatica E4 (e4.empatica.com/e4-wristband)	26
Figura 3. 4. Tobii Pro Glasses 3 (www.brainproducts.com/solutions/tobii-pro-wearable/)	27
Figura 3. 5. Occhiali Tobii Pro Glasses 3 (2) (www.srlabs.it/tobii-pro-glasses3-understanding-human-behaviour/).....	30
Figura 4. 1. Diametro della pupilla (www.grattavetro.it/la-pupilla-delloocchio-e-la-sua-misura/)	33
Figura 4. 2. Mappa di calore (Bergstrom and Schall, 2014).....	42
Figura 4. 3. Intrusioni saccadi (Tokuda et al., 2011).....	42
Figura 5. 1. Partecipante durante prova uditiva.....	44
Figura 5. 2. 1-back (https://andysbrainbook.readthedocs.io/en/latest/ASL/fASL_03_Task.html)	45
Figura 5. 3. 4-back (https://andysbrainbook.readthedocs.io/en/latest/ASL/fASL_03_Task.html)	45
Figura 5. 4. Impostazione prova sulla piattaforma Dual N-Back (trainingcognitivo.it)... ..	47
Figura 5. 5. Desktop prova uditiva Dual N-Back (trainingcognitivo.it).....	48
Figura 5. 6. Desktop prova visiva Dual N-Back (trainingcognitivo.it).....	48
Figura 5. 7. Desktop prova visuospatiale Dual N-Back (trainingcognitivo.it)	49
Figura 5. 8. Partecipante durante prova visuospatiale.....	50
Figura 5. 9. Configurazione scala VAS (http://www.vasgenerator.net/index_adv.php)..	51
Figura 5. 10. Visualizzazione scala VAS (http://www.vasgenerator.net/index_adv.php)	51
Figura 5. 11. Risultato leggibile scala VAS (http://www.vasgenerator.net/index_adv.php)	51
Figura 5. 12. Esempio foglio Excel durante la prova.....	52
Figura 5. 13. Saccadi (logopedistantognozzi.it/dislessia-e-movimenti-oculari/)	52
Figura 5. 14. Grafici Accuracy durante la fase di Training - Nback con valore soglia	57

Figura 5. 15. Difficoltà VAS-task partecipante 1-4-7 (prova uditiva).....	58
Figura 5. 16. Difficoltà VAS-task partecipante 2-5-8 (prova visiva).....	58
Figura 5. 17. Difficoltà VAS-task partecipante 3-6-9 (prova visuospatiale).....	59
Figura 5. 18. Accuracy prove effettive – Nback.....	60
Figura 5. 19. Visualizzazioni AOI prove uditive (prima colonna); visive (seconda colonna); visuospatiali (terza colonna).....	61
Figura 5. 20. Selezione AOI.....	62
Figura 5. 21. Boxplot significativi Metriche-Nback Globale.....	66
Figura 5. 22. Boxplot significativi Metriche - Nback Uditiva.....	68
Figura 5. 23. Boxplot significativi Metriche - Nback Visiva.....	69
Figura 5. 24. Boxplot significativi Metriche - Nback Visuospatiale.....	72
Figura 5. 25. Grafici Metriche significative – Trial Globale.....	77
Figura 6. 1. Assemblato meccanico.....	80
Figura 6. 2. Tagliapiastrelle.....	80
Figura 6. 3. Pompa.....	81
Figura 6. 4. AOI: vassoio e area di lavoro caso manuale.....	83
Figura 6. 5. AOI: area di lavoro caso manuale.....	84
Figura 6. 6. AOI: vassoio, area di lavoro e robot caso HRC.....	84
Figura 6. 7. AOI: area di lavoro estesa caso HRC.....	84
Figura 6. 8. Visualizzazione generale – analisi di tutti i video.....	85
Figura 6. 9. Esempi di visualizzazione prove HRC (sinistra) vs prove Manuali (destra).....	85
Figura 6. 10. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle fissazioni ...	107
Figura 6. 11. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle Visite.....	108
Figura 6. 12. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle Glances.....	109
Figura 6. 13. Boxplot metriche significative Esperimento HRC relativi alle Saccadi.....	110
Figura appendice- 1 Grafici Nback-Metriche (uditiva).....	122
Figura appendice- 2 Grafici Nback-Metriche (visiva).....	122
Figura appendice- 3 Grafici Nback-Metriche (visuospatiale).....	122
Figura appendice- 4 Grafici Nback-Metriche (globale).....	125
Figura appendice- 5 Grafici Metriche-TRIAL globale.....	128
Figura appendice- 6 Grafici Metriche-VAS globale.....	132

Elenco tabelle

Tabella 1: Embedded sensors of Tobii Pro Glasses 3 (Nasrabadi and Alonso, 2022).....	29
Tabella 2: Gaze Data structure (Nasrabadi and Alonso, 2022).....	29
Tabella 3: metriche di tracciamento oculare correlate al carico cognitivo	32
Tabella 4: Metriche Tobii Pro Lab (https://connect.tobii.com/s/article/understanding-tobii-pro-lab-eye-tracking-metrics?language=en_US).....	53
Tabella 5: Metriche N-back -Pvalue Globale.....	64
Tabella 6: Metriche N-back -Pvalue Uditiva	66
Tabella 7: Metriche N-back -Pvalue Visiva	68
Tabella 8: Metriche N-back -Pvalue Visuospatiale.....	70
Tabella 9: Sintesi trend metriche-Nback.....	73
Tabella 10: Sintesi trend metriche - VAS.....	73
Tabella 11: Pearson Metriche-Trial (Globale, Uditiva, Visiva e Visuospatiale).....	75
Tabella 12: Sintesi trend Metriche - Trial.....	78
Tabella 13: Step assemblaggio 1-HRC.....	81
Tabella 14: Step assemblaggio 2-HRC.....	82
Tabella 15: Step assemblaggio 3-HRC.....	82
Tabella 16: Metriche Eyetracking - Pvalue (1-2m; 1-3m; 2-3m; 1-2hrc; 1-3hrc; 2-3hrc)	87
Tabella 17: Metriche Eyetracking - Pvalue (1-m-hrc; 2-m-hrc; 3-m-hrc)	94
Tabella 18: Metriche Eyetracking - Pvalue (1m-2hrc; 1m-3hrc; 2m-1hrc; 2m-3hrc; 3m-1hrc; 3m-2hrc).....	98

Bibliografia e Sitografia

- Ahlstrom, U., Friedman-Berg, F., 2006. Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *Int. J. Ind. Ergon.* 36, 623–636.
<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.04.002>
- Arai, T., Kato, R., Fujita, M., 2010. Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP Ann.* 59, 5–8.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.043>
- Bazzan, E., 2016. User Experience e Cognitive Load: metodologia e rilevazioni [WWW Document]. TSW. URL <https://www.tsw.it/journal/ricerca/carico-cognitivo-user-experience-metodologie-rilevamento/> (accessed 3.11.23).
- Beatty, J., Kahneman, D., 1966. Pupillary changes in two memory tasks. *Psychon. Sci.* 5, 371–372. <https://doi.org/10.3758/BF03328444>
- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., Montanari, R., 2011. Driver workload and eye blink duration. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 14, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2010.12.001>
- Bergstrom, J.R., Schall, A.J., 2014. *Eye tracking in user experience design*. Elsevier, Amsterdam Boston.
- Bodala, I.P., Yu Ke, Mir, H., Thakor, N.V., Al-Nashash, H., 2014. Cognitive workload estimation due to vague visual stimuli using saccadic eye movements, in: 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Presented at the 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, Chicago, IL, pp. 2993–2996. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944252>
- Bommer, S.C., Fendley, M., 2018. A theoretical framework for evaluating mental workload resources in human systems design for manufacturing operations. *Int. J. Ind. Ergon.* 63, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.10.007>
- Breslow, L.A., Gartenberg, D., McCurry, J.M., Trafton, J.G., 2014. Dynamic Operator Overload: A Model for Predicting Workload During Supervisory Control. *IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst.* 44, 30–40. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2293317>
- Empatica | Medical devices, AI and algorithms for remote patient monitoring [WWW Document], n.d. . Empatica. URL <https://www.empatica.com/> (accessed 3.11.23).
- Gawron, V.J., 2008. *Human Performance, Workload, and Situational Awareness Measures Handbook*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton.
<https://doi.org/10.1201/9781420064506>
- Gervasi, R., Aliev, K., Mastrogiacomo, L., Franceschini, F., 2022. User Experience and Physiological Response in Human-Robot Collaboration: A Preliminary Investigation. *J. Intell. Robot. Syst.* 106, 36. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01744-8>
- Gervasi, R., Capponi, M., Mastrogiacomo, L., Franceschini, F., 2023a. Manual assembly and Human–Robot Collaboration in repetitive assembly processes: a structured comparison based on human-centered performances. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 126, 1213–1231. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11197-4>
- Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., Franceschini, F., 2023b. An experimental focus on learning effect and interaction quality in human–robot collaboration. *Prod. Eng.* 17, 355–380. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01188-5>

- Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., Franceschini, F., 2020. A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 108, 841–865. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05363-1>
- Goldberg, J., Kotval, X., 1999. Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *Int. J. Ind. Ergon.* 24, 631–645. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(98\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(98)00068-7)
- Goldberg, J.H., Stimson, M.J., Lewenstein, M., Scott, N., Wichansky, A.M., 2002. Eye tracking in web search tasks: design implications, in: *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications - ETRA '02*. Presented at the the symposium, ACM Press, New Orleans, Louisiana, p. 51. <https://doi.org/10.1145/507072.507082>
- Gwizdka, J., 2014. Characterizing relevance with eye-tracking measures, in: *Proceedings of the 5th Information Interaction in Context Symposium*. Presented at the IiX '14: Fifth Information Interaction in Context Symposium, ACM, Regensburg Germany, pp. 58–67. <https://doi.org/10.1145/2637002.2637011>
- Hart, S.G., Staveland, L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, in: *Advances in Psychology*. Elsevier, pp. 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., Van de Weijer, J., 2011. *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford University Press, Oxford.
- Human–robot collaboration, 2023. . Wikipedia.
- Hwang, Y., Yoon, D., Kim, H.S., Kim, K.-H., 2014. A Validation Study on a Subjective Driving Workload Prediction Tool. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 15, 1835–1843. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2334664>
- Ikuma, L.H., Harvey, C., Taylor, C.F., Handal, C., 2014. A guide for assessing control room operator performance using speed and accuracy, perceived workload, situation awareness, and eye tracking. *J. Loss Prev. Process Ind.* 32, 454–465. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.001>
- Il Ruolo dei Cobot nell'Industria 4.0 - Esa Automation, 2019. URL <https://www.esa-automation.com/it/il-ruolo-dei-cobot-nellindustria-4-0/> (accessed 3.11.23).
- Inamdar, S., Pomplun, M., 2003. Comparative Search Reveals the Tradeoff between Eye Movements and Working Memory Use in Visual Tasks.
- Jacob, R.J.K., Karn, K.S., 2003. Commentary on Section 4 - Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises, in: Hyönä, J., Radach, R., Deubel, H. (Eds.), *The Mind's Eye*. North-Holland, Amsterdam, pp. 573–605. <https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50031-1>
- Just, M.A., Carpenter, P.A., 1976. Eye fixations and cognitive processes. *Cognit. Psychol.* 8, 441–480. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3)
- Kramer, A., 1990. Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress.
- Kulić, D., Croft, E., 2007. Physiological and subjective responses to articulated robot motion. *Robotica* 25, 13–27. <https://doi.org/10.1017/S0263574706002955>
- La teoria del carico cognitivo di John Sweller [WWW Document], 2019. . *Mente È Meravigliosa*. URL <https://lamenteemeravigliosa.it/teoria-del-carico-cognitivo/> (accessed 3.11.23).

- Macri, P., 2019. Nelle smart factory i robot sono collaborativi. NewsImpresa. URL <https://newsimpresa.it/in-evidenza/2019/11/nelle-smart-factory-i-robot-sono-collaborativi/> (accessed 3.11.23).
- Mallis, M.M., Dinges, D.F., 2004. Monitoring Alertness by Eyelid Closure, in: Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods. CRC Press.
- Marinescu, A.C., Sharples, S., Ritchie, A.C., Sánchez López, T., McDowell, M., Morvan, H.P., 2018. Physiological Parameter Response to Variation of Mental Workload. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 60, 31–56. <https://doi.org/10.1177/0018720817733101>
- Marshall, S.P., 2002. The Index of Cognitive Activity: measuring cognitive workload, in: Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants. Presented at the New Century, New Trends. of the 2002 IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants, IEEE, Scottsdale, AZ, USA, pp. 7-5-7–9. <https://doi.org/10.1109/HFPP.2002.1042860>
- Martinez-Conde, S., Macknik, S.L., Hubel, D.H., 2000. Microsaccadic eye movements and firing of single cells in the striate cortex of macaque monkeys. *Nat. Neurosci.* 3, 251–258. <https://doi.org/10.1038/72961>
- Minarini, G., 2020. Root Mean Square of the Successive Differences as Marker of the Parasympathetic System and Difference in the Outcome after ANS Stimulation, in: Aslanidis, T. (Ed.), *Autonomic Nervous System Monitoring - Heart Rate Variability*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89827>
- Muldner, K., Christopherson, R., Atkinson, R., Burleson, W., 2009. Investigating the Utility of Eye-Tracking Information on Affect and Reasoning for User Modeling, in: Houben, G.-J., McCalla, G., Pianesi, F., Zancanaro, M. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 138–149. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02247-0_15
- Nasrabadi, H.R., Alonso, J.-M., 2022. Modular Streaming Pipeline of Eye/Head Tracking Data Using Tobii Pro Glasses 3 (preprint). *Animal Behavior and Cognition*. <https://doi.org/10.1101/2022.09.02.506255>
- Palinko, O., Kun, A.L., Shyrovkov, A., Heeman, P., 2010. Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator, in: Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications - ETRA '10. Presented at the the 2010 Symposium, ACM Press, Austin, Texas, p. 141. <https://doi.org/10.1145/1743666.1743701>
- Pomplun, M., Sunkara, S., n.d. Pupil Dilation as an Indicator of Cognitive Workload in Human-Computer Interaction.
- Prokasy, W.F., Raskin, D.C., 1973. *Electrodermal activity in psychological research*, Electrodermal activity in psychological research. Academic Press, Oxford, England.
- Recarte, M.Á., Pérez, E., Conchillo, Á., Nunes, L.M., 2008. Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective Rating. *Span. J. Psychol.* 11, 374–385.
- Savage, S.W., Potter, D.D., Tatler, B.W., 2013. Does preoccupation impair hazard perception? A simultaneous EEG and Eye Tracking study. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 17, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.10.002>

- Shi, C., Rothrock, L., 2022. Validating an abnormal situation prediction model for smart manufacturing in the oil refining industry. *Appl. Ergon.* 101, 103697. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103697>
- Stern, J.A., Boyer, D., Schroeder, D., 1994. Blink rate: a possible measure of fatigue. *Hum. Factors* 36, 285–297. <https://doi.org/10.1177/001872089403600209>
- Stone, B., Lee, M., 2004. Pupil size and mental load.
- Szulewski, A., Fernando, S.M., Baylis, J., Howes, D., 2014. Increasing Pupil Size Is Associated with Increasing Cognitive Processing Demands: A Pilot Study Using a Mobile Eye-Tracking Device. *Open J. Emerg. Med.* 02, 8–11. <https://doi.org/10.4236/ojem.2014.21002>
- Tao, D., Tan, H., Wang, H., Zhang, X., Qu, X., Zhang, T., 2019. A Systematic Review of Physiological Measures of Mental Workload. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 2716. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152716>
- TOBII PRO GLASSES3: understanding why behind human behaviour, 2020. . SR Labs Srl. URL <https://www.srlabs.it/tobii-pro-glasses3-understanding-human-behaviour/> (accessed 3.11.23).
- Tokuda, S., Obinata, G., Palmer, E., Chaparro, A., 2011. Estimation of mental workload using saccadic eye movements in a free-viewing task, in: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Presented at the 2011 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE, Boston, MA, pp. 4523–4529. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091121>
- Underwood, G., Chapman, P., Bowden, K., Crundall, D., 2002. Visual search while driving: skill and awareness during inspection of the scene. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 5, 87–97. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(02\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00008-6)
- Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., Crundall, D., 2003. Visual attention while driving: Sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics* 46, 629–646. <https://doi.org/10.1080/0014013031000090116>
- van Lopik, K., Schnieder, M., Sharpe, R., Sinclair, M., Hinde, C., Conway, P., West, A., Maguire, M., 2020. Comparison of in-sight and handheld navigation devices toward supporting industry 4.0 supply chains: First and last mile deliveries at the human level. *Appl. Ergon.* 82, 102928. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102928>
- Van Orden, K.F., Limbert, W., Makeig, S., Jung, T.P., 2001. Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task. *Hum. Factors* 43, 111–121. <https://doi.org/10.1518/001872001775992570>
- Veltman, J.A., Gaillard, A.W.K., 1996. Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biol. Psychol., Psychophysiology of Workload* 42, 323–342. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05165-1](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05165-1)
- Wang, Q., Yang, S., Liu, M., Cao, Z., Ma, Q., 2014. An eye-tracking study of website complexity from cognitive load perspective. *Decis. Support Syst.* 62, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.02.007>
- Wilson, G.F., 2002. An Analysis of Mental Workload in Pilots During Flight Using Multiple Psychophysiological Measures. *Int. J. Aviat. Psychol.* 12, 3–18. https://doi.org/10.1207/S15327108IJAP1201_2

- Wu, L., Zhu, Z., Cao, H., Li, B., 2016. Influence of information overload on operator's user experience of human-machine interface in LED manufacturing systems. *Cogn. Technol. Work* 18, 161–173. <https://doi.org/10.1007/s10111-015-0352-0>
- Yang, C., Liu, Z., Zhou, Q., Xie, F., Zhou, S., 2014. Analysis on Eye Movement Indexes Based on Simulated Flight Task, in: Harris, D. (Ed.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 419–427. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07515-0_42
- Young, M.S., Brookhuis, K.A., Wickens, C.D., Hancock, P.A., 2015. State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics* 58, 1–17. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151>
- Zelinsky, G.J., Sheinberg, D.L., 1997. Eye movements during parallel–serial visual search. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 23, 244–262. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.23.1.244>
- Zheng, B., Jiang, X., Tien, G., Meneghetti, A., Panton, O.N.M., Atkins, M.S., 2012. Workload assessment of surgeons: correlation between NASA TLX and blinks. *Surg. Endosc.* 26, 2746–2750. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2268-6>
- Zhong, N., Li, M., Wu, Y., Lu, S., 2011. The impact of different forms of statistical information on reading efficiency, effect, and mental workload: An eye-tracking study, in: *The 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*. Presented at the 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering - CME 2011, IEEE, Harbin, China, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1109/ICCME.2011.5876712>

www.reliableplant.com/Read/31352/human-robot-collaboration

www.iso.org/standard/51330.html

www.universal-robots.com/it/quali-sono-le-differenze-tra-cobot-e-robot-tradizionali/

robot.omitech.it/cobot-storia-applicazioni-robot-collaborativi/

support.empatica.com/hc/en-us/articles/202581999-E4-wristband-technical-specifications

e4.empatica.com/e4-wristband

www.brainproducts.com/solutions/tobii-pro-wearable/

breakeeducation.org/2020/06/09/pensiamo-mai-al-carico-cognitivo/

www.srlabs.it/tobii-pro-glasses3-understanding-human-behaviour/

www.grattavetro.it/la-pupilla-dellocchio-e-la-sua-misura/

logopedistantognozzi.it/dislessia-e-movimenti-oculari/

APPENDICE

Altri grafici N-back Metriche caso prova Uditiva:

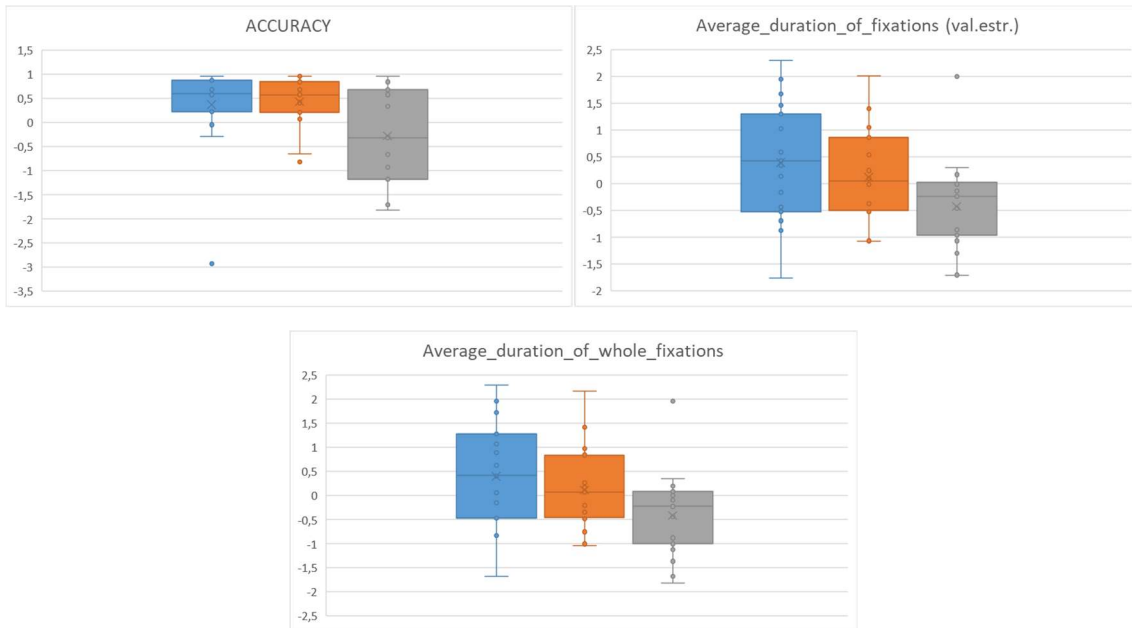


Figura appendice- 1 Grafici Nback-Metriche (uditiva)

Altri grafici N-back Metriche caso prova Visiva:



Figura appendice- 2 Grafici Nback-Metriche (visiva)

Altri grafici N-back Metriche caso prova Visuospaziale:

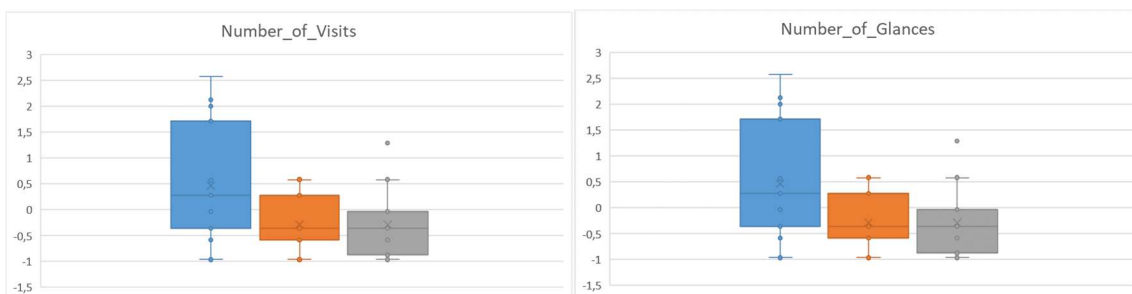
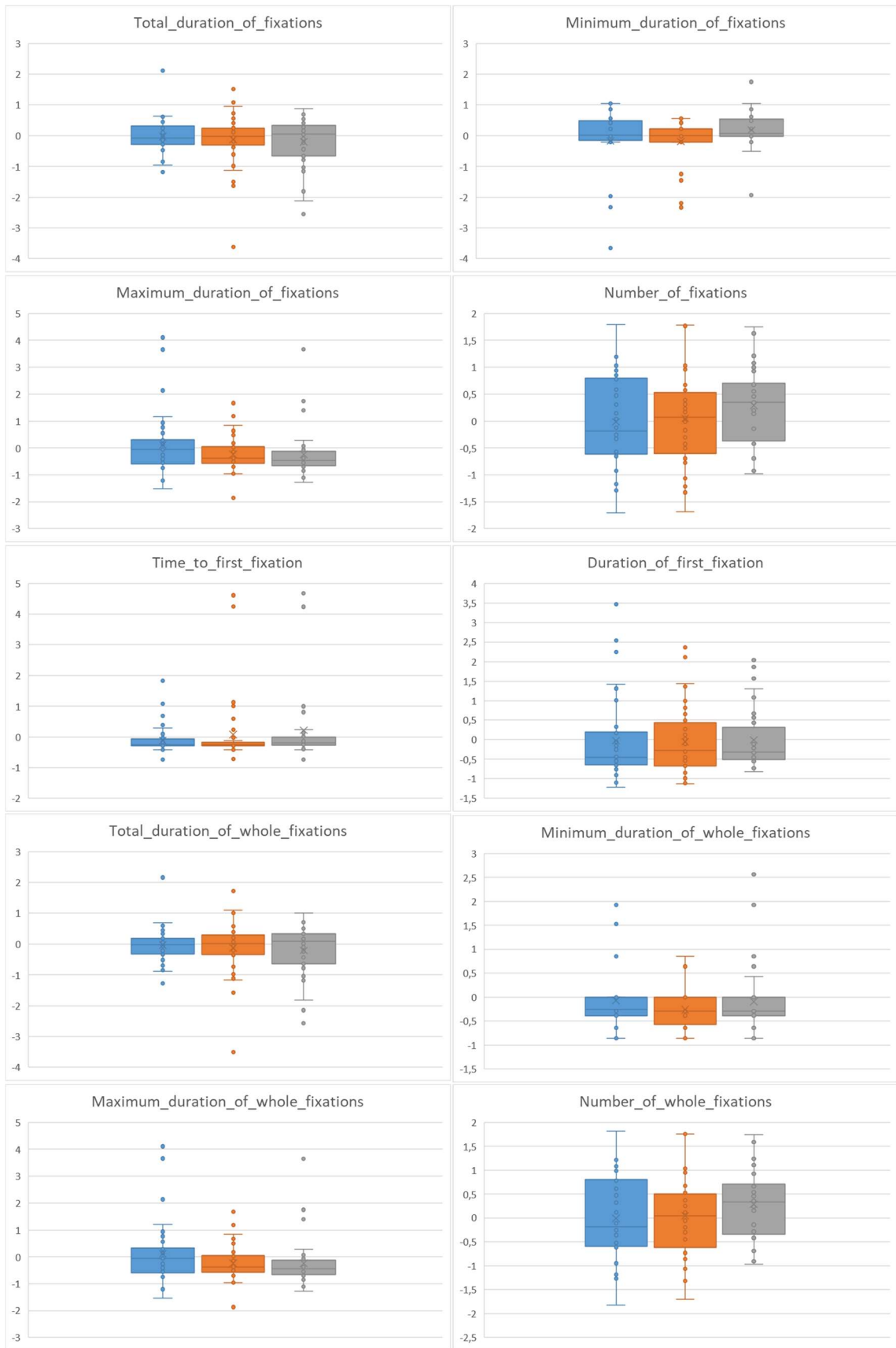
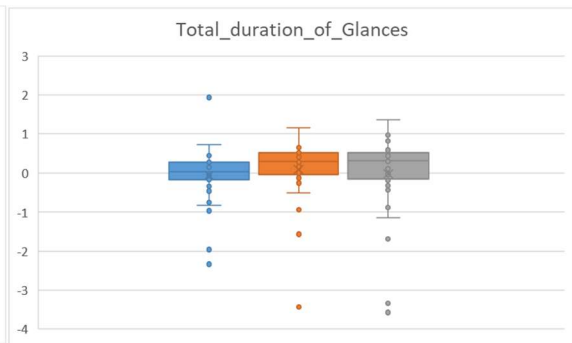
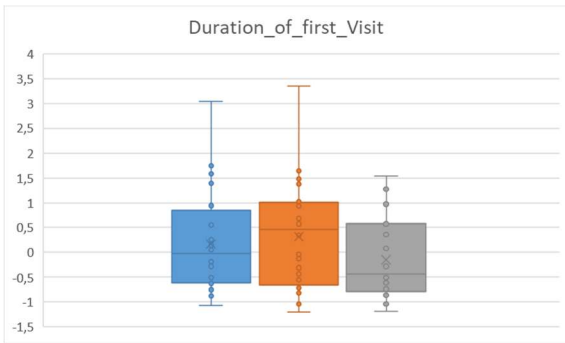
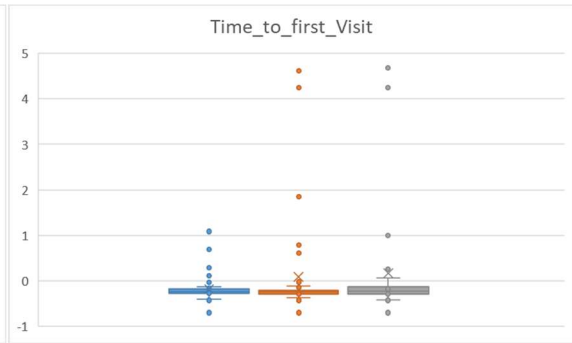
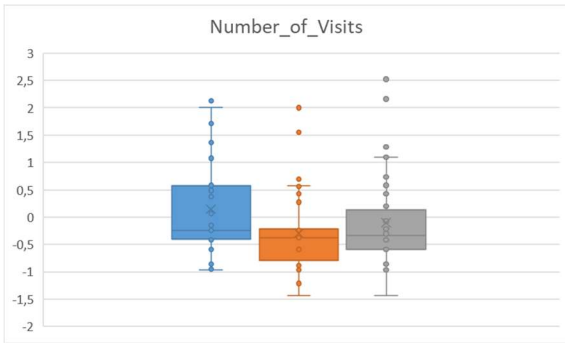
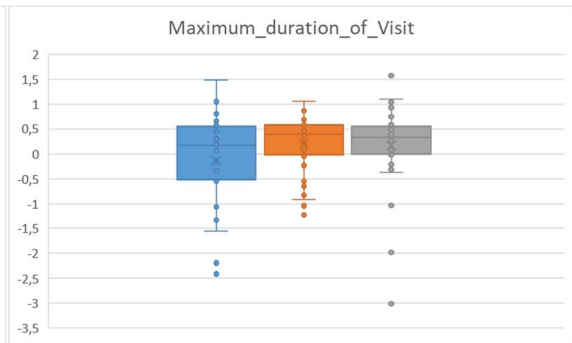
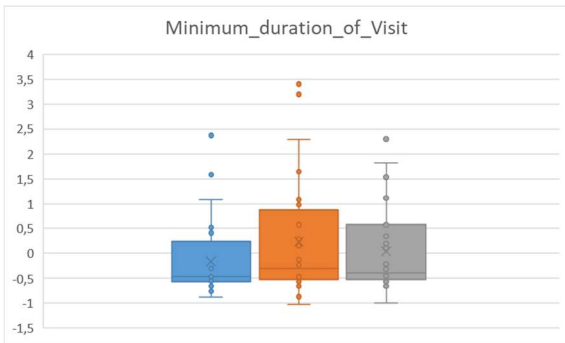
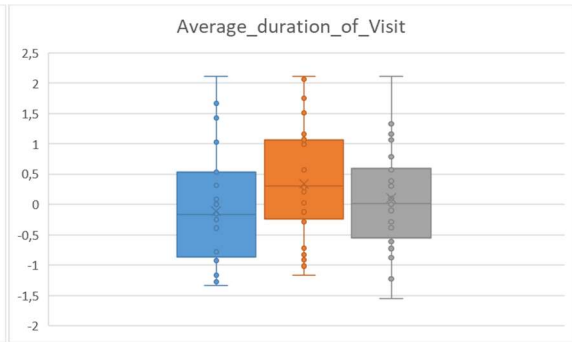
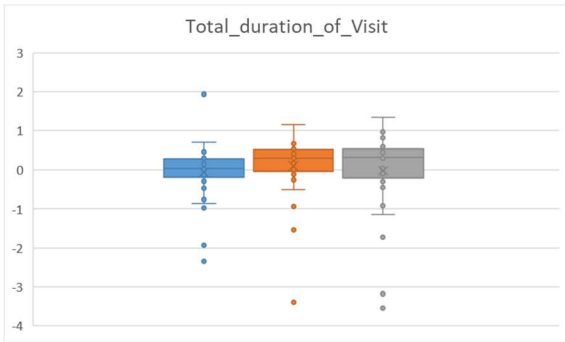
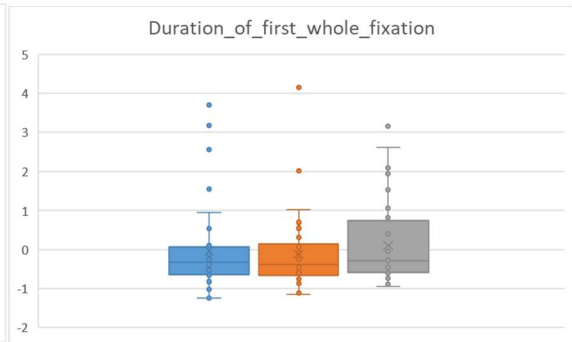
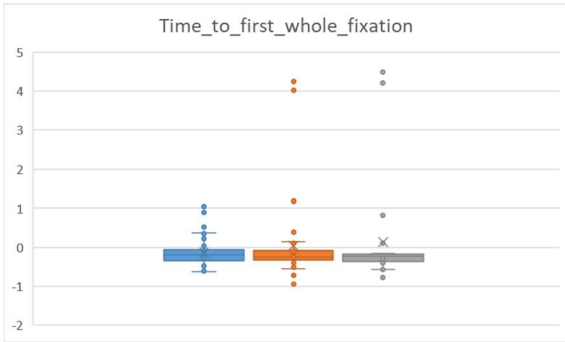


Figura appendice- 3 Grafici Nback-Metriche (visuospaziale)

Boxplot dati non mediati prove effettive Metriche – Nback





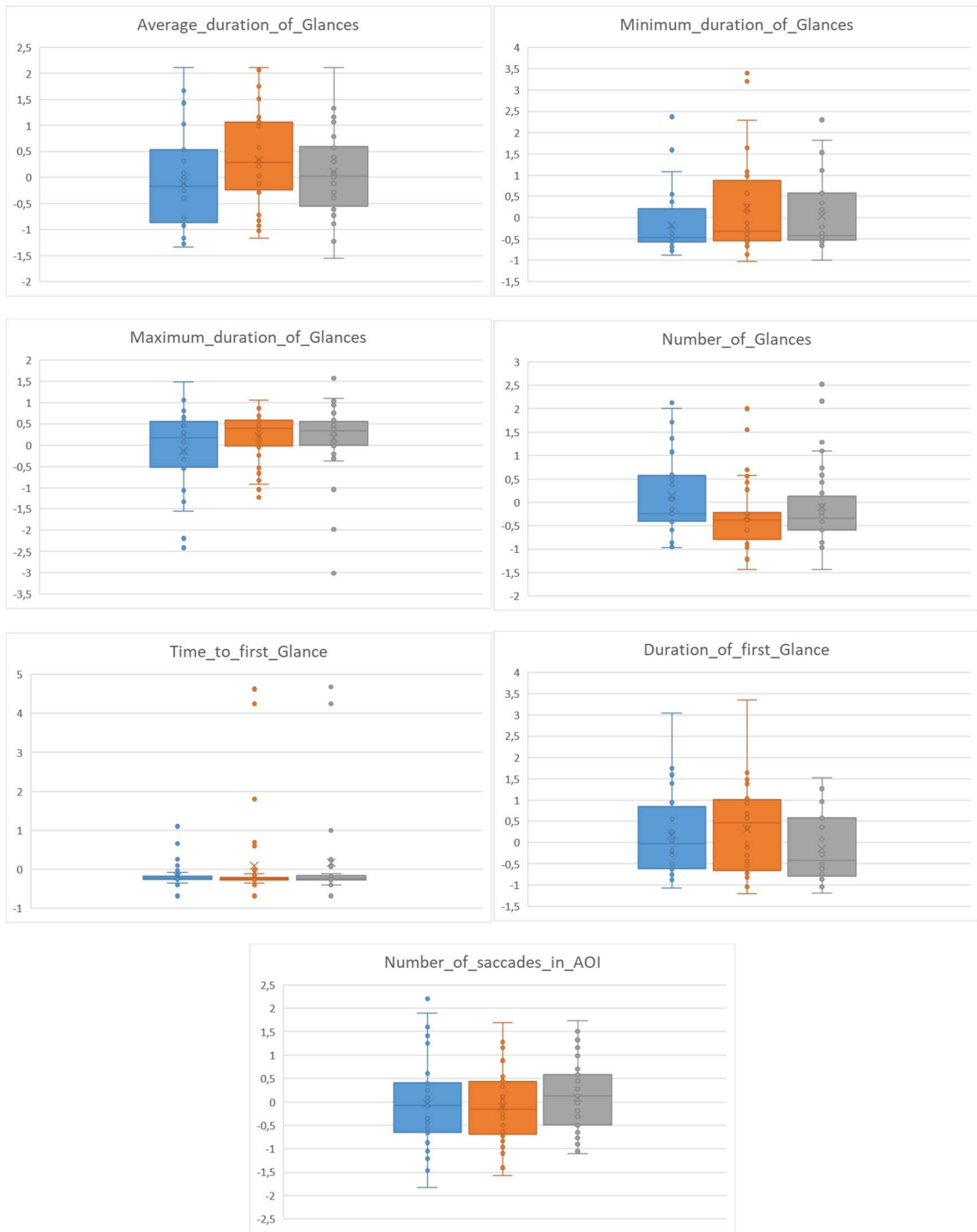
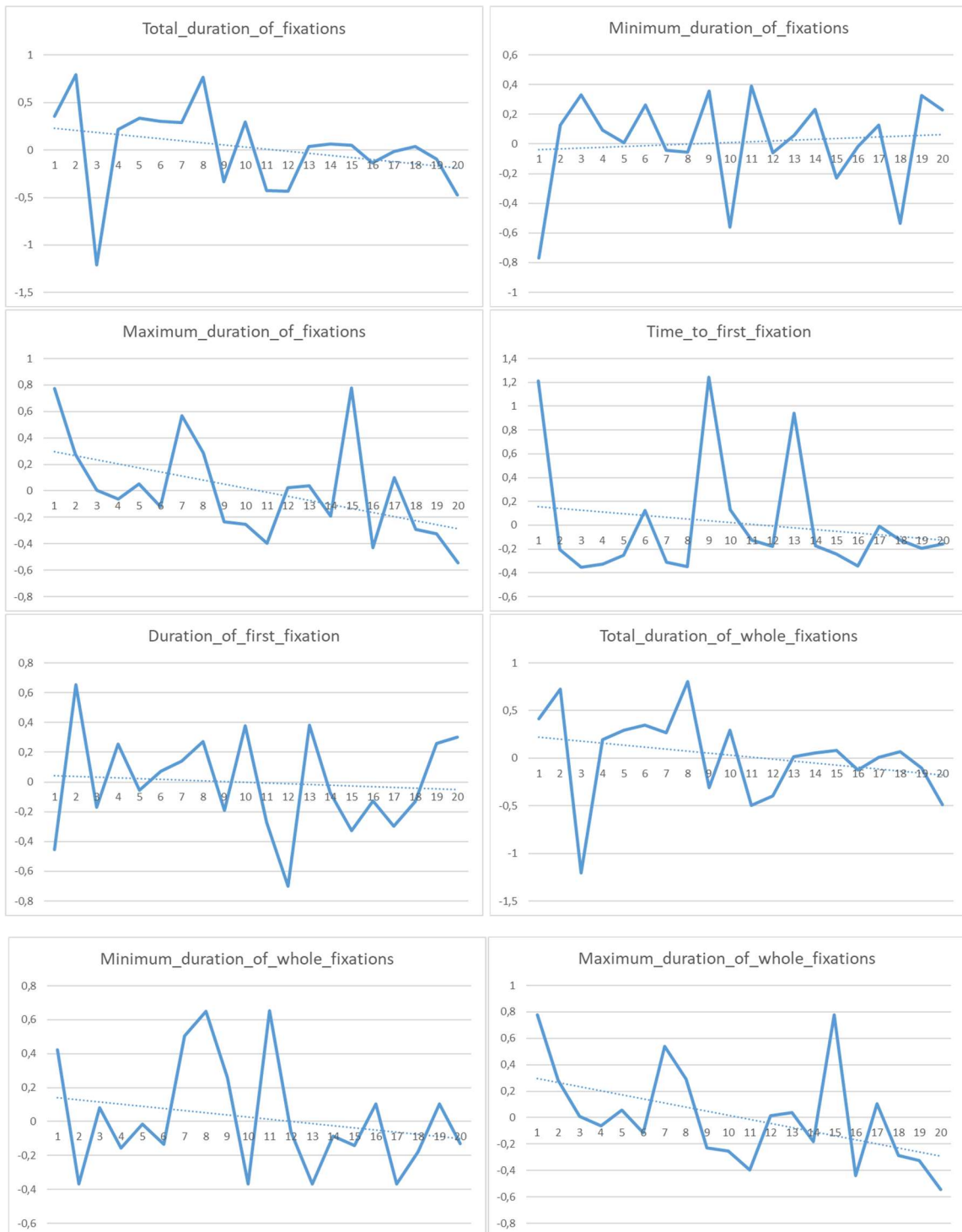


Figura appendice- 4 Grafici Nback-Metriche (globale)

Grafici Metriche-TRIAL globale:





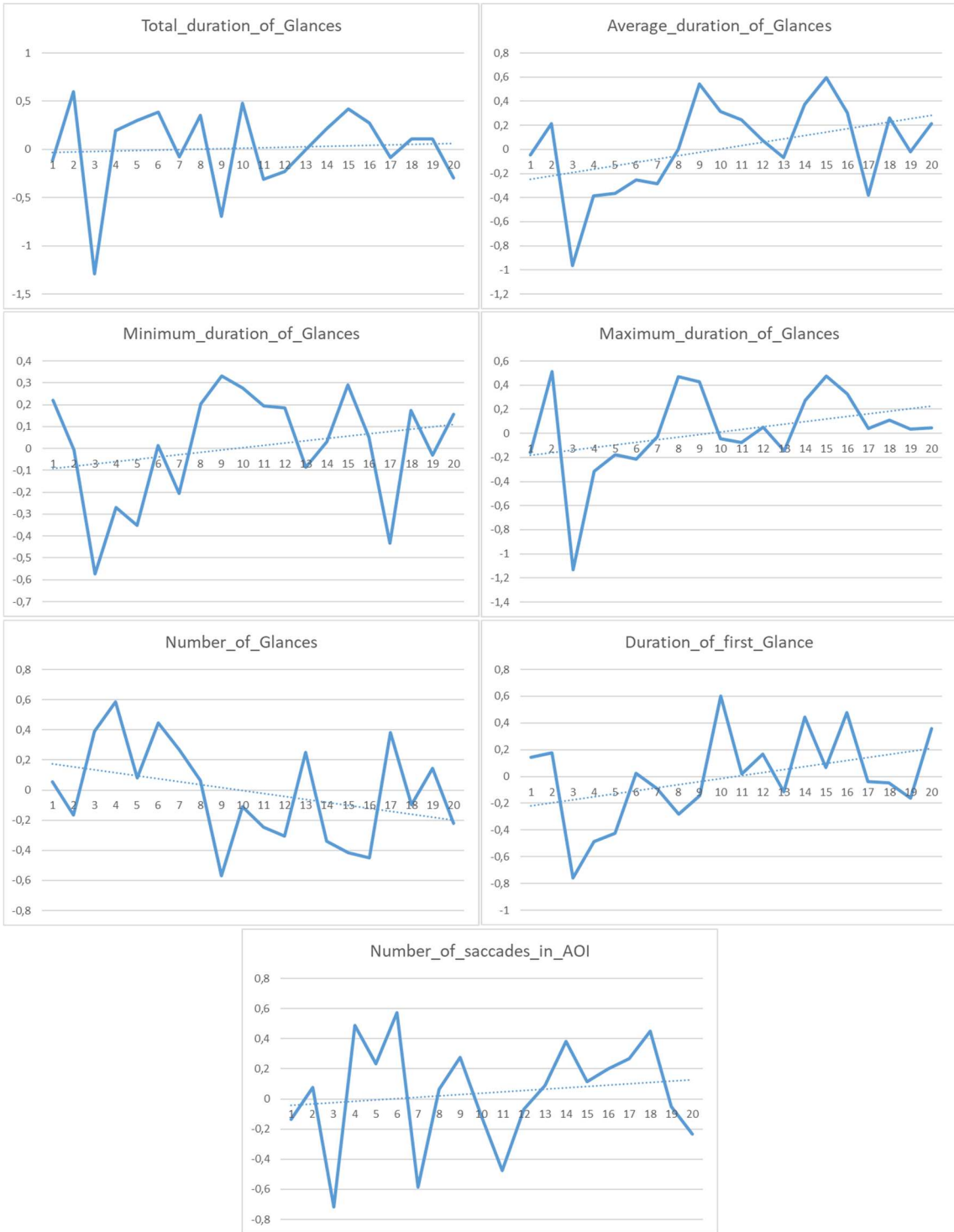
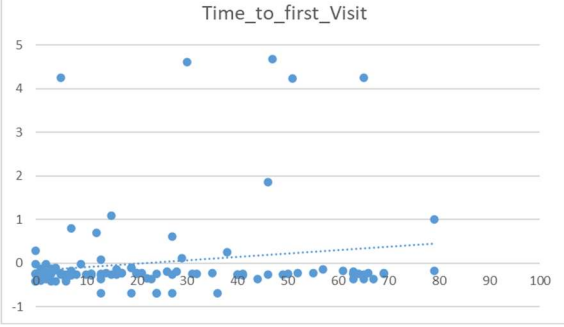
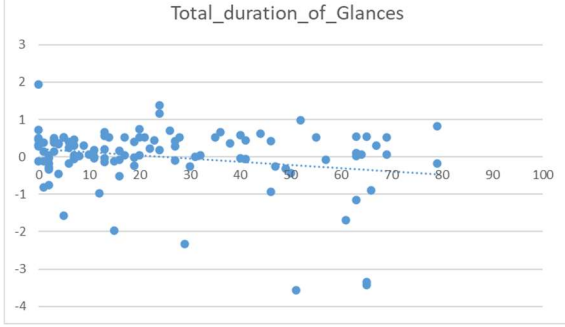
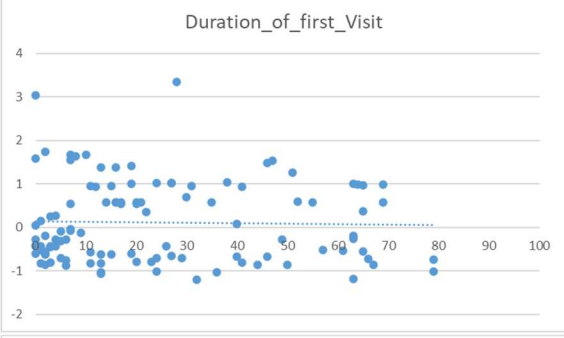
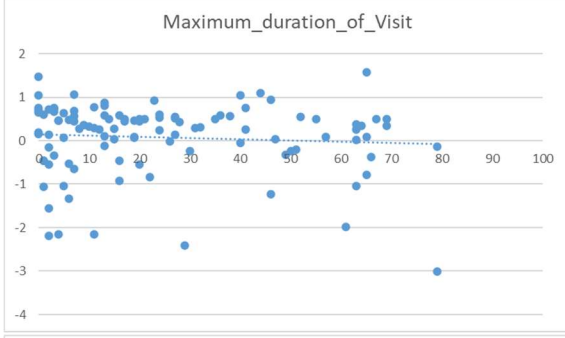
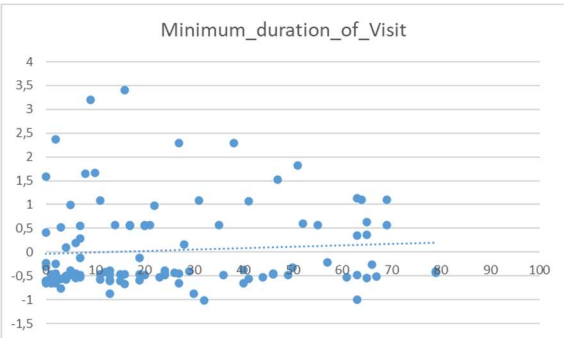
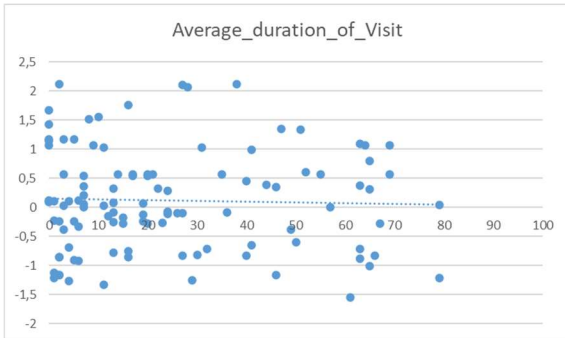
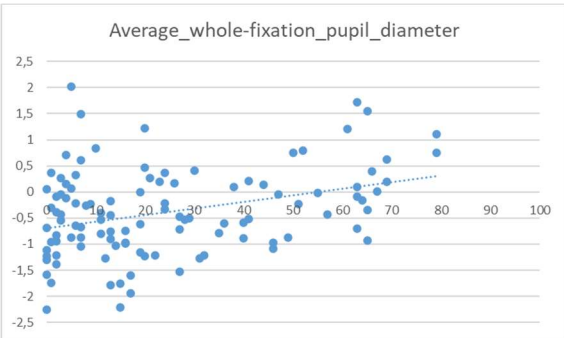
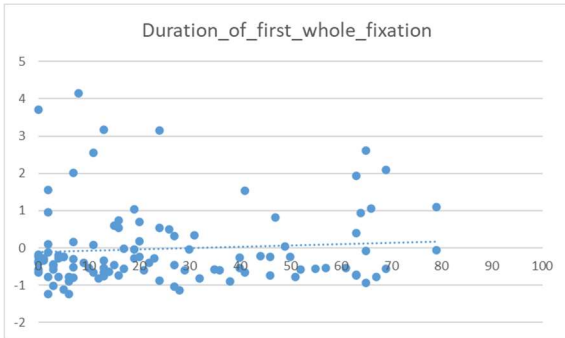
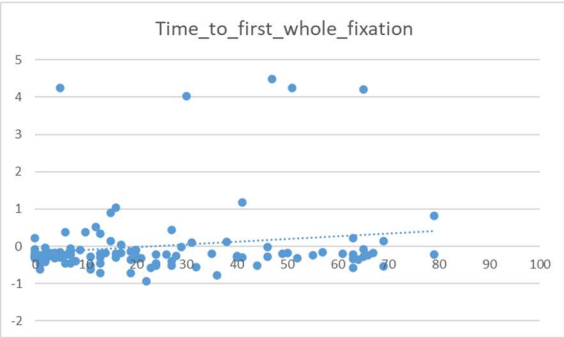
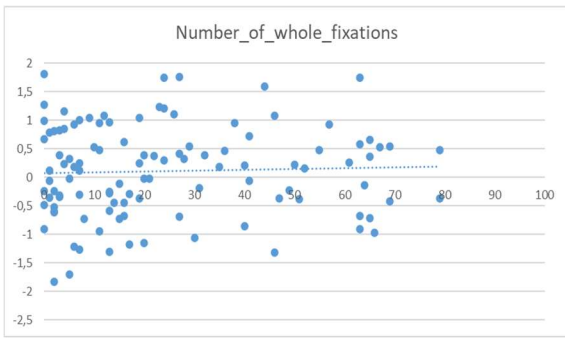


Figura appendice- 5 Grafici Metriche-TRIAL globale

Grafici VAS-metriche globale:







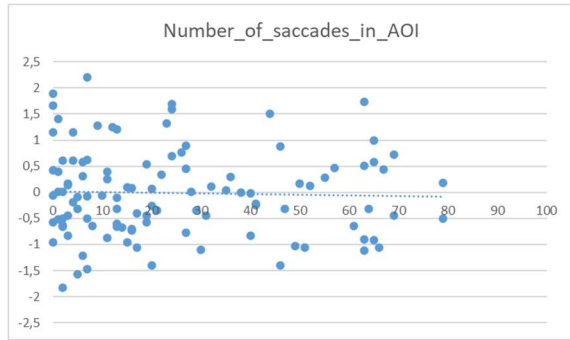


Figura appendice- 6 Grafici Metriche-VAS globale

Ringraziamenti

Volevo ringraziare il Professore Franceschini e Riccardo per la loro gentilezza e per il loro sostegno durante la stesura di questa tesi.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto in qualsiasi mia scelta, di essermi sempre vicino e mostrarmi sempre amore incondizionato.

Un grazie particolare va a mio fratello che è sempre stato la mia spalla destra e in questo percorso anche un coinquilino adorabile.

Al mio fidanzato, che mi è sempre stato affianco, sempre pronto ad aiutarmi e sostenermi.

Un grazie va anche a Chiara, la mia compagna di studio ormai amica e collega, con cui spero di continuare a condividere numerosi momenti insieme.

Un pensiero va anche al mio nonnino, che adesso sarebbe tanto fiero di me e avrebbe detto sicuramente che i suoi nipoti sono sempre i numeri uno.