

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Sessione di Laurea Aprile 2024



**Mental Workload e Human Robot
Collaboration: uno studio esplorativo con
tecniche di Eye Tracking e secondary task**

Relatore:
Prof. Fiorenzo Franceschini

Candidato:
Aurora Sofia Di Matteo

Co-relatore:
Dott. Riccardo Gervasi

Anno Accademico 2023-2024

“La differenza tra i robot e gli uomini? I robot sono sostanzialmente creature per bene.”

Isaac Asimov

INDICE

Indice degli acronimi	4
Abstract	5
INTRODUZIONE	6
1. HUMAN-ROBOT COLLABORATION	6
2. CARICO COGNITIVO	10
3. EYE TRACKING	15
3.1 Metriche di tracciamento oculare	19
4. SECONDARY TASK	21
5. PROVA DI ASSEMBLAGGIO IN HRC CON SECONDARY TASK	24
5.1 Descrizione dell'esperimento	24
5.2 Metodologia e strumenti utilizzati	28
6. ANALISI DEI DATI RACCOLTI	36
6.1 Metodologia e analisi	36
6.1.1 Pre-processing tempi di reazione	36
6.1.2 Pre-processing EDA e frequenza cardiaca	36
6.1.3 Pre-processing pupillometria	36
6.2 Partecipante 1	42
6.2 Partecipante 2	52
6.3 Partecipante 3	60
6.4 Partecipante 4	69
6.5 Partecipante 5	77
6.6 Partecipante 6	85
6.7 Partecipante 7	93
6.8 Partecipante 8	100
7. CONCLUSIONI	109
APPENDICE	112
Indice delle figure	124
Indice delle tabelle	128
Bibliografia e sitografia	129
Ringraziamenti	135

Indice degli acronimi

AOI - Area Of Interest (Area di interesse)

AR – Augmented Reality (Realtà aumentata)

ECG - Electrocardiogram (Elettrocardiogramma)

EDA - Electrodermal Activity (Attività elettrodermica)

EEG - Electroencephalography (Elettroencefalografia)

EOG - Electrooculogram (Elettrooculogramma)

GSR - Galvanic Skin Response (Risposta galvanica della pelle)

GUI - Graphical User Interface (Interfaccia grafica utente)

HRC - Human-Robot Collaboration (Collaborazione uomo-robot)

HRV - Heart Rate Variability (Variabilità della frequenza cardiaca)

IDE - Integrated Development Environment (Ambiente di sviluppo integrato)

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

MWL - Mental Workload (Carico di lavoro mentale)

NA - Not Available (Non disponibile)

NASA-TLX - National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (Indice di carico di lavoro dell'agenzia spaziale americana)

RMS - Root Mean Square Error (Radice dell'errore quadratico medio)

SCL - Skin Conductance Level (Livello di conduttanza cutanea)

SCR - Skin Conductance Response (Risposta di conduttanza della pelle)

TMT - Trail Making Test (Test neuropsicologico)

TOI - Time Of Interest (Tempo di interesse)

TV - Television (Televisione)

VR - Virtual Reality (Realtà virtuale)

Abstract

La necessità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti del mercato, la crescente attenzione sull'individuo e sulla valorizzazione dell'efficienza lavorativa spingono sempre più aziende manifatturiere ad incorporare dei robot collaborativi (Cobot) nei loro processi produttivi, poiché non solo migliorano l'efficienza e la flessibilità, ma alleviano anche il carico di lavoro degli operatori, rendendo meno impegnative le attività quotidiane.

L'introduzione dei Cobot solleva, tuttavia, la cruciale questione di come monitorare il carico cognitivo degli operatori, specialmente in un contesto manifatturiero dove le attività sono spesso ripetitive e richiedono uno sforzo mentale considerevole. Il primo capitolo di questo elaborato si concentra sulla comprensione approfondita del contesto di Human Robot Collaboration (HRC), il secondo sul carico cognitivo e la sua valutazione, privilegiando misure oggettive, come l'attività elettrodermica (EDA) e la variabilità della frequenza cardiaca, misurate grazie ad appositi bracciali (Empatica E4) ed il tracciamento oculare, tramite l'utilizzo di sensori di *Eye Tracking*, approfondito nel terzo capitolo. Nel quarto capitolo si analizza l'utilizzo di task secondarie, ossia di semplici compiti aggiuntivi svolti dall'operatore per valutare il carico cognitivo associato al compito primario.

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di proporre una nuova task secondaria per la valutazione del carico cognitivo e verificarne l'efficacia, sfruttando altre misure oggettive, già riconosciute come significative. Nel quinto capitolo si descrive l'esperimento realizzato presso il Mind4Lab del Politecnico di Torino, che consiste nel far svolgere un compito di assemblaggio all'operatore con la collaborazione di un braccio robotico, inserendo una task secondaria uditiva da eseguire in parallelo. Nel capitolo successivo si analizzano partecipante per partecipante, le misure fisiologiche e i dati raccolti attraverso l'attività secondaria, focalizzando l'attenzione sui tempi di risposta e sulle differenze che si registrano prima e dopo l'attività di assemblaggio. Il capitolo conclusivo riassume le analisi condotte affermando che, nonostante variazioni individuali, emergono tendenze generali di aumento del carico cognitivo e dello stress, segnalate da una riduzione delle prestazioni dei partecipanti coinvolti. Inoltre, la ricerca evidenzia la complessità di misurare il carico cognitivo ed in particolare di individuare le principali cause delle variazioni delle metriche. L'esperimento svolto, integrando la letteratura esistente, rappresenta un contributo utile nella valutazione del carico cognitivo nel settore manifatturiero, fornendo spunti per ulteriori studi e approfondimenti, replicabili in contesti simili a quello descritto.

INTRODUZIONE

I capitoli seguenti forniscono una panoramica dettagliata dei principali aspetti per comprendere e fare chiarezza sui concetti trattati nell'elaborato, partendo dalla *Human Robot Collaboration* (HRC).

1. HUMAN-ROBOT COLLABORATION

La collaborazione uomo-robot (HRC) è un campo di ricerca con un'ampia gamma di applicazioni, scenari futuri e potenzialmente un elevato impatto economico, che comprende la robotica classica, le scienze cognitive e la psicologia.

In particolare, la collaborazione uomo-robot (HRC) è definita come una forma di interazione diretta tra esseri umani e robot, principalmente mirata al raggiungimento di un obiettivo comune, ossia combinare le competenze umane con quelle dei robot (Figura 1.1). Da una parte, gli esseri umani portano flessibilità, intelligenza e capacità di risolvere problemi; dall'altra, i robot offrono precisione, potenza e ripetibilità (Gervasi et al., 2020 – <https://blog.item24.com/it/applicazioni-dei-robot-industriali/collaborazione-uomo-robot-i-vantaggi-dei-cobot-nellindustria/>).



Figura 1.1 - Human Robot Collaboration (<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2022/08/10/the-best-examples-of-human-and-robot-collaboration/>)

La scelta di pensare alla realizzazione di sistemi collaborativi uomo-robot è dettata principalmente da motivazioni economiche, salute nei luoghi di lavoro e uso efficiente dello spazio di lavoro (Matheson et al., 2019). Focalizzandosi sul settore manifatturiero (Figura 1.2), lo studio di Matheson fa chiarezza su altri vantaggi tra loro connessi:

- maggiore sicurezza sul lavoro: i robot permettono di ridurre i rischi a cui è sottoposto un operatore e di conseguenza eventuali infortuni, riducendo lo sforzo fisico e migliorando l'ergonomia (Matheson et al., 2019 – Segura et al., 2021);
- aumento dell'efficienza: i compiti più ripetitivi e che richiedono precisione vengono assegnati al robot, mentre i compiti che richiedono capacità cognitive e decisionali vengono assegnate all'operatore umano, migliorando la produttività (Gervasi et al., 2023a);
- miglioramento della qualità del lavoro: affidare ai robot compiti ripetitivi o mentalmente faticosi, consente agli operatori di concentrarsi su attività più gratificanti e meno stressanti, contribuendo ad un miglior equilibrio lavoro-vita ed ad una riduzione dell'affaticamento mentale, aspetto cruciale per raggiungere un livello di collaborazione ottimale. Si dimostra, infatti, come un momento di stress fisico o mentale possa avere un impatto negativo, portando ad un aumento di errori (Arai et al., 2010);
- flessibilità e adattabilità a vari contesti: i robot possono essere riconfigurati velocemente per svolgere compiti differenti (Matheson et al., 2019).

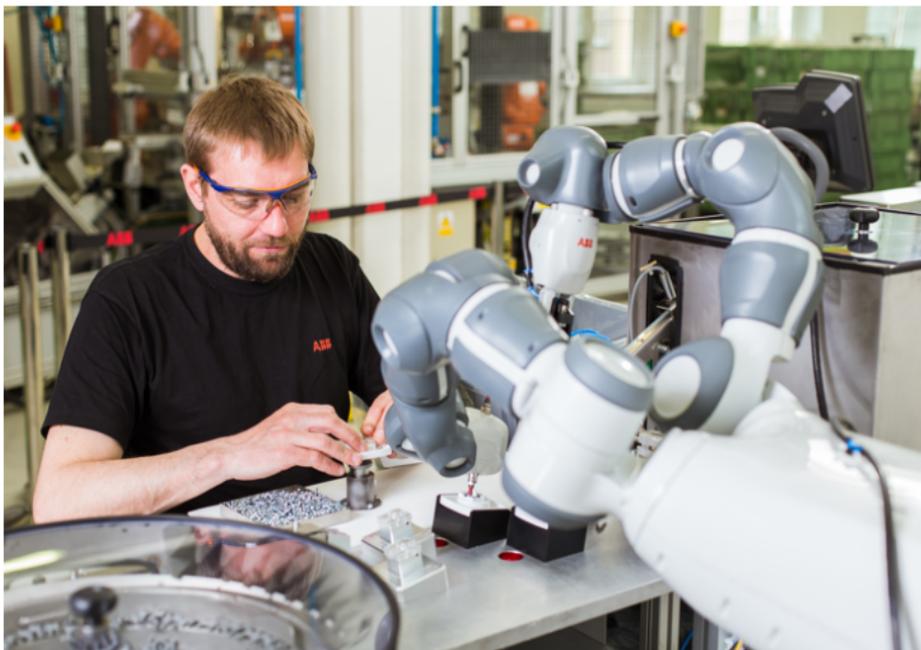


Figura 1.2 - Cooperazione tra uomo e robot (Ajoudani et al., 2017)

La collaborazione uomo-robot rappresenta un pilastro fondamentale dell'industria 4.0, offrendo un potenziale trasformativo per il settore manifatturiero attraverso un'integrazione sinergica tra le capacità umane e quelle delle macchine, adattando i robot alle esigenze dinamiche dell'industria (Mukherjee et al., 2022).

Una delle ultime introduzioni all'interno dell'industria 4.0 sono i Cobot, brevettati nel 1996 da due professori della Northwestern University, J. Edward Colgate e Michael Peshkin (Colgate et al., 1996). I Cobot sono robot che svolgono operazioni collaborative, ossia quelle attività in cui un sistema robotico, appositamente progettato, e un operatore lavorano all'interno di uno spazio di lavoro condiviso (<https://www.certifico.com/normazione/261-documenti-riservati-normazione/organismi-normazione/documenti-normazione-enti/3206-robot-collaborativi-la-nuova-specifica-tecnica-iso-ts-15066-2016>).

Il settore manifatturiero ha adottato la HRC per una vasta gamma di applicazioni. Si riportano due esempi di realtà industriali che hanno implementato la HRC nella loro linea di produzione:

- BMW Group (Figura 1.3), dove dei robot collaborativi aiutano gli operatori nell'installazione di componenti pesanti, migliorando la sicurezza e l'ergonomia del lavoro (<https://www.innovationpost.it/tecnologie/robotica/bmw-compra-3500-robot-fanuc-per-realizzare-le-sue-nuove-linee-di-produzione/>).



Figura 1.3 - Processo di controllo nello stabilimento BMW Group di Landshut (<https://www.kuka.com/it-it/settori/banca-dati-di-soluzioni/2017/09/solution-robotics-bmw-landshut>)

- Ford che sfrutta dei robot collaborativi per regolare i fari delle auto alleggerendo il carico di lavoro e ottenendo una qualità di regolazione più elevata (<https://www.kuka.com/it-it/future-production/collaborazione-uomo-robot>).

L'impiego di robot in contesti dinamici, dove coesistono con gli esseri umani, richiede standard elevati in termini di percezione sensoriale, mobilità, destrezza, nonché abilità avanzate nella pianificazione di attività, nel prendere decisioni e nel ragionamento. Queste realtà pongono sfide uniche che necessitano di soluzioni innovative per una coesistenza armoniosa. Lo studio di Lu et al. (2022) sottolinea di considerare anche lo stress mentale e la sicurezza nel progettare un sistema di HRC.

Tuttavia, la tecnologia contemporanea, pur essendo avanzata, non risponde ancora pienamente a tali esigenze. Uno degli ostacoli maggiori nello sviluppo di robot che possano integrarsi efficacemente nella società, è la carenza di interfacce utente che facilitino un'interazione e una comunicazione naturale, intuitiva e flessibile (Palinko, 2017). Queste caratteristiche sono fondamentali per rendere i robot non solo strumenti utili, ma anche collaboratori accettabili e non invasivi per gli esseri umani (Wu et al., 2016). Si deduce, quindi, che la creazione di interfacce *human-friendly* è fondamentale per permettere una programmazione robot efficiente e accessibile a tutti gli operatori (Giovannetti e Cappelli, 2003).

Lo studio di Bauer et al. (2007) suggerisce che le ricerche future dovrebbero concentrarsi proprio sul potenziamento della cognizione e della comunicazione dei robot per realizzare una collaborazione più naturale ed efficiente tra umani e robot, indicando un futuro in cui i robot collaborativi potrebbero diventare parte integrante della vita quotidiana. Le applicazioni citate toccano vari campi, dall'assistenza sanitaria alle guide turistiche, dall'edilizia alle applicazioni spaziali.

2. CARICO COGNITIVO

La mente umana è continuamente impegnata nell'elaborazione di informazioni, che derivano sia dal mondo esterno, sia dalle esperienze interne. Questo processo implica l'utilizzo di risorse cognitive per eseguire compiti di varia complessità, un aspetto particolarmente rilevante nel contesto della profonda trasformazione che sta interessando il sistema industriale, in cui la collaborazione uomo-robot si fa sempre più evidente. Tuttavia, affinché questa sinergia sia efficace, è importante gestire il carico cognitivo, un termine utilizzato in psicologia cognitiva per definire la quantità totale di sforzo mentale necessario per l'esecuzione di un compito specifico in termini di utilizzo di memoria di lavoro (Zheng, 2017; <https://www.tsw.it/journal/ricerca/carico-cognitivo-user-experience-metodologie-rilevamento/>) poiché un'eccessiva richiesta cognitiva può influire negativamente sull'efficienza, aumentare il rischio di errori e compromettere la sicurezza.

Il carico cognitivo è una “struttura mentale” che riflette la tensione mentale causata dall'esecuzione di un determinato compito in particolari condizioni operative e ambientali, associata alla capacità dell'operatore di rispondere a tali richieste (Cain 2007).

A riguardo, carico cognitivo e *mental workload*, concetti spesso utilizzati in modo intercambiabile, presentano una sfumatura di significato distintiva. Infatti, il primo è definito da Sweller (Chandler e Sweller, 1991), come la quantità totale di attività mentale imposta alla memoria di lavoro in un dato istante (assimilabile al termine “sforzo mentale” usato nel linguaggio comune) e riflette la complessità intrinseca di un compito, le informazioni aggiuntive nell'ambiente e la capacità di organizzare e integrare tali informazioni (carico cognitivo intrinseco, estrinseco e pertinente, Figura 2.1).

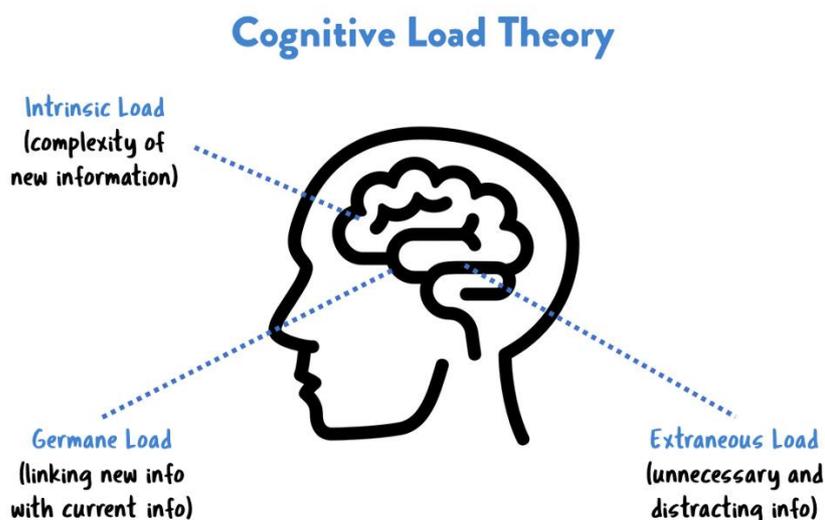


Figura 2.1 - Teoria del carico cognitivo (<https://www.barefootteacher.com/p/what-is-cognitive-load-theory>)

Con il termine *mental workload* (MWL), invece, si fa riferimento ad un concetto complesso e multidimensionale, che non include solo il carico cognitivo e fattori oggettivi, ma anche altri fattori soggettivi quali stress, fatica fisica ed emozioni, che possono essere influenzati dalle richieste del compito, dal supporto esterno e dall'esperienza precedente (Figura 2.2; Young et al., 2015).

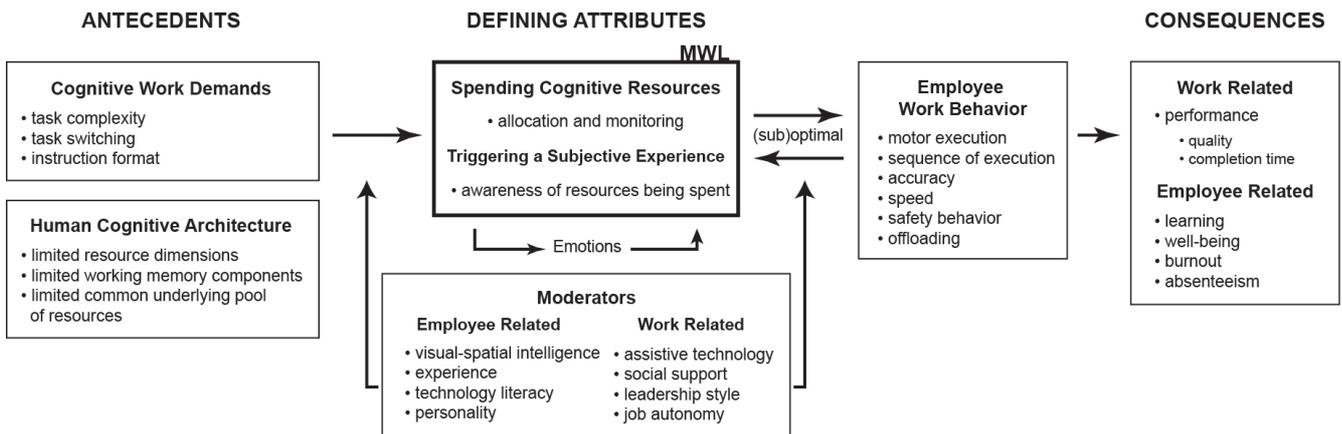


Figura 2.2 - Framework sul MWL e implicazioni sul comportamento lavorativo (Acker, 2020)

MWL rappresenta il costo sostenuto da un operatore umano per raggiungere un particolare livello di prestazione (Buchholz e Kopp - 2020). Dalla teoria di Sweller e altri studi (Bommer et al., 2018 - Acker, 2020), emerge l'importanza di ridurre il carico cognitivo di un attore al fine di garantire un apprendimento maggiore e prestazioni migliori, in quanto un carico cognitivo elevato è sinonimo di un aumento delle risorse richieste o delle difficoltà e ciò può provocare un effetto negativo sulle capacità di un operatore.

Si distinguono 3 metodi per analizzare il carico cognitivo (Cain, 2007; Young et al., 2015):

- 1) analisi delle risposte fisiologiche (misure oggettive);
- 2) metodi soggettivi come questionari di valutazione tipo il NASA-TLX, che consente agli operatori di auto-valutare il proprio carico di lavoro percepito attraverso dimensioni come la richiesta mentale e la frustrazione;
- 3) misure comportamentali, come l'effetto dell'apprendimento (Figura 2.3) e analisi degli errori (Bommer et al., 2018).

Le tecniche soggettive forniscono una prospettiva qualitativa, mentre le metodologie oggettive offrono un'analisi quantitativa dello stato psicofisiologico dell'utente durante l'interazione.

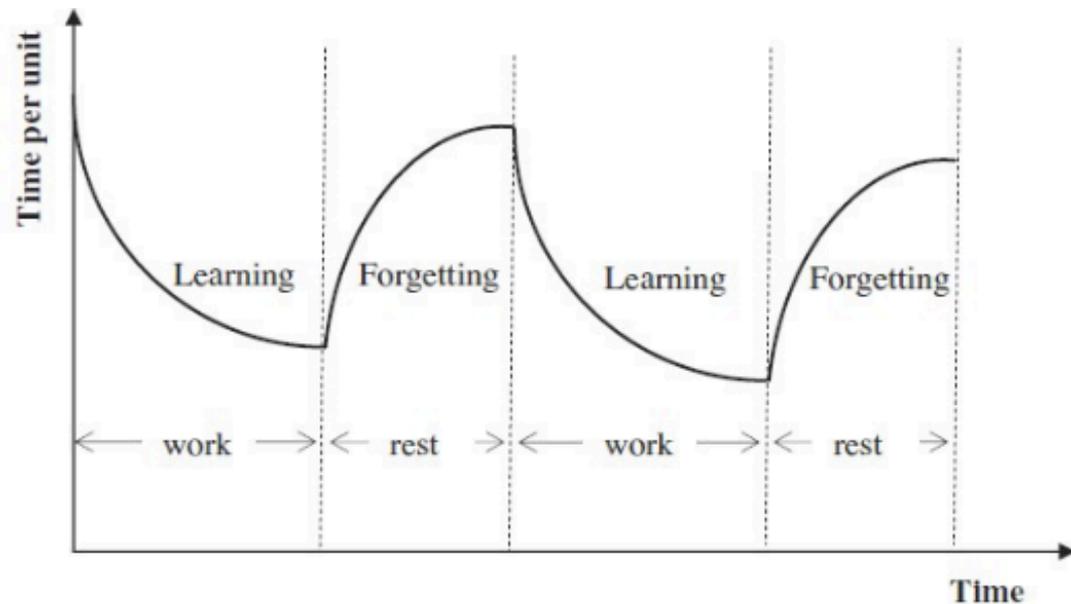


Figura 2.3 - Misura comportamentale: effetto dell'apprendimento (Bommer et al., 2018)

Tra le misure oggettive (Figura 2.4) utili a rilevare lo stato psicofisiologico dell'attore coinvolto si possono distinguere:

- L'attività elettrodermica (EDA) o conduttanza cutanea (GSR), che consente di valutare l'attivazione pura del sistema nervoso simpatico attraverso il monitoraggio della sudorazione: l'aumento della stessa è direttamente proporzionale all'aumento del carico cognitivo (Buchwald et al. 2019; Kosch et al., 2019). Tra le caratteristiche dell'EDA vengono valutati i livelli di *skin conductance level* (SCL) e *skin conductance response* (SCR) in relazione al carico cognitivo (Li et al., 2022).
- La frequenza cardiaca e la sua variabilità (HRV), che possono riflettere i cambiamenti nel livello di attivazione del sistema nervoso autonomo in risposta a stress cognitivi, emotivi o fisici. In situazioni di elevato carico cognitivo, il corpo può rispondere con un incremento della frequenza cardiaca, indicando uno stato di maggiore attivazione o stress (Rani et al., 2002).
- La temperatura corporea, la cui variazione associata ad altri parametri fisiologici può essere un indicatore per stimare il carico cognitivo (Romine et al., 2020).

- Il segnale respiratorio, che può essere un ulteriore indicatore per rilevare livelli di carico cognitivo differenti (Novak et al., 2015). Grassmann et al. (2016) ritengono che episodi mentalmente impegnativi siano caratterizzati da una respirazione più rapida e una maggiore ventilazione per minuto, mentre l'ampiezza respiratoria tende a rimanere stabile.
- Il tracciamento di movimenti oculari (*Eye Tracking*) che rivela come diversi parametri, tra cui dilatazione pupillare e frequenza di ammiccamento (*blink rate*) sono fortemente legati al carico cognitivo (Lobo et al., 2016; Lu et al., 2022; Tao et al., 2019; Young et al., 2015).
- L'elettroencefalografia (*EEG*), che sfrutta la rilevazione dell'attività delle aree prefrontali e frontali del cervello per valutare l'aumento del carico cognitivo (Antonenko et al., 2010; Kohlmorgen et al. 2007; Lobo et al., 2016).

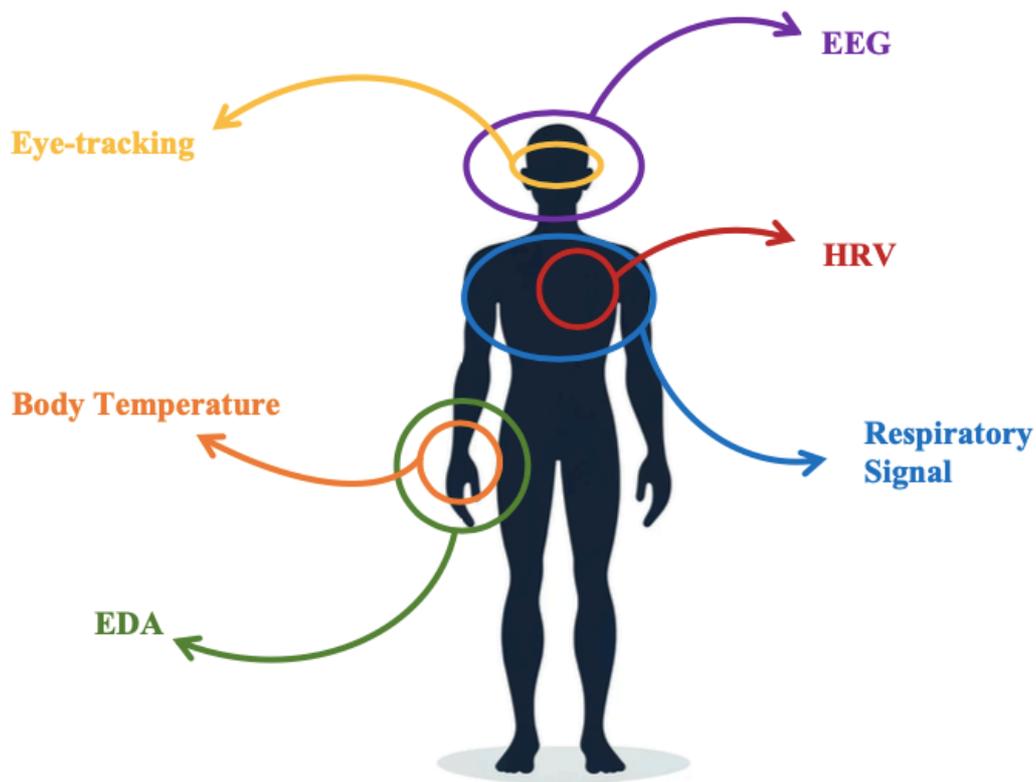


Figura 2.4 - Rappresentazione personale delle misure fisiologiche del carico cognitivo

In merito alla valutazione del carico cognitivo, le misure basate sul comportamento offrono un valido metodo alternativo o complementare per capire come lo stress cognitivo influenzi le azioni dell'uomo (Buchholz e Kopp., 2020). Questi indicatori comportamentali, che variano dai cambiamenti nei tempi di reazione agli errori compiuti durante l'esecuzione di

compiti, forniscono dati fondamentali per comprendere il carico cognitivo di un operatore specialmente in un contesto di HRC, dove anche fattori legati ai robot possono influenzare lo stress mentale dell'operatore con cui interagiscono, come le caratteristiche stesse del robot, la traiettoria di movimento e la comunicazione con il robot (Lu et al., 2022).

Il *mental workload*, invece, può essere misurato attraverso una combinazione di metodologie, comprese le valutazioni soggettive dell'individuo, monitoraggio delle attività neurali e indici fisiologici.

La comprensione e la valutazione accurata del carico cognitivo sono essenziali per progettare interazioni uomo-robot che migliorino l'efficienza e riducano l'affaticamento mentale. L'adozione di un approccio globale, che integra misure oggettive, soggettive e comportamentali, permette una valutazione più accurata del carico cognitivo. Ciò facilita lo sviluppo di interazioni che migliorano la sicurezza, l'efficienza e il benessere dell'operatore (Bommer et al., 2018).

Porre l'attenzione su questi aspetti è stato centrale nella realizzazione dell'esperimento descritto in questo elaborato di tesi. Proprio per comprendere a fondo il contesto e capire l'esperienza dell'attore coinvolto, si è deciso di considerare misure oggettive, un compito secondario e un'ulteriore tipologia di misura: non sono stati adottati questionari ma sono stati raccolti resoconti verbali e condotte brevi interviste (Zheng, 2017) per inquadrare il contesto di ogni singolo partecipante.

3. EYE TRACKING

Il tracciamento del movimento degli occhi è una metodologia fondamentale per comprendere l'attenzione visiva umana in vari contesti. Questa tecnologia, nota come *Eye Tracking*, è stata adottata in molteplici campi, tra cui la psicologia cognitiva, il marketing (Wedel e Pieters, 2008), l'interazione uomo-robot e anche nel settore del manufacturing (Figura 3.1). L'*Eye Tracking* è un potente strumento che consente di monitorare con precisione dove gli individui stanno guardando, quanto tempo dedicano ad osservare specifici elementi visivi e il percorso dei loro movimenti oculari (Punde et al., 2017).



Figura 3.1 - Operatore che indossa un eye tracker sul posto di lavoro (<https://manufacturingdigital.com/ai-and-automation/eye-tracking-provides-valuable-insight-factory-safety>)

Inizialmente, le strategie per osservare questi movimenti richiedevano approcci invasivi, inclusi l'uso di lenti specifiche e supporti per stabilizzare la testa, per evitare distorsioni nei risultati. Tra questi, l'elettrooculogramma (EOG) si distingue per la sua capacità di valutare i cambiamenti di potenziale elettrico tra la cornea e la parte posteriore dell'occhio tramite elettrodi per dedurre l'orientamento dello sguardo, nonostante sia limitato da interferenze quali il rumore generato da altre espressioni facciali e la variazione del segnale nel tempo (Duchowski, 2017; Shehu et al., 2021).

L'evoluzione verso metodi di osservazione oculari non invasivi e basati su video ha eliminato queste restrizioni, introducendo modalità più agili e accurate per il rilevamento dei movimenti oculari che non necessitano di contatto fisico con l'individuo (Figura 3.2). Questi progressi hanno portato alla progettazione di sistemi di *Eye Tracking* incorporati in dispositivi indossabili (*eye tracker*) ampliando significativamente le potenzialità di impiego in diversi campi di studio e in numerose applicazioni pratiche (Punde et al., 2017).

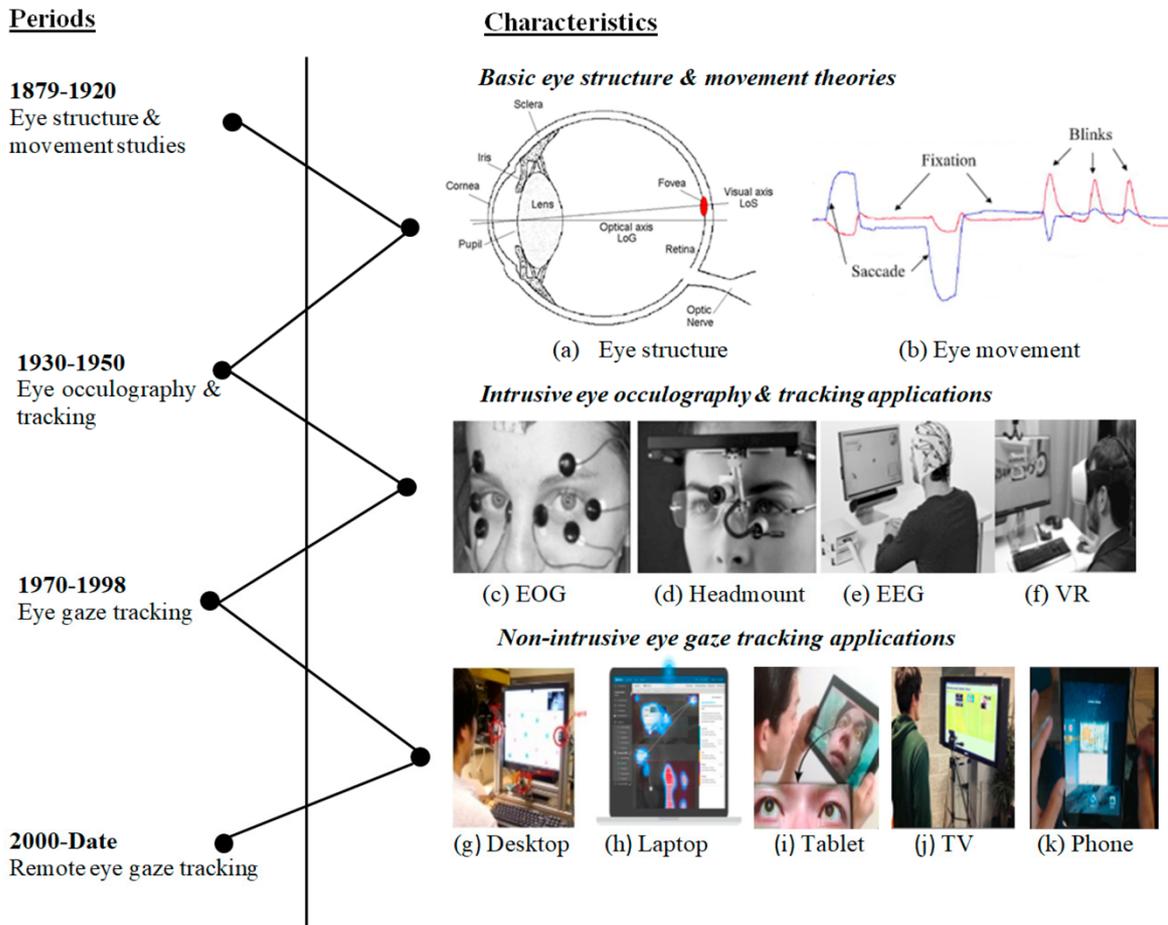


Figura 3.2 - Evoluzione storica e tecnologica del tracciamento degli occhi: la prima era (1879-1920) si concentra sullo studio della struttura oculare e teorie del movimento dell'occhio; la seconda era (1930-1950) introduce l'oculografia e il tracking oculare con strumenti intrusivi; il terzo periodo (1970-1998) vede il passaggio a metodi di tracciamento dello sguardo non intrusivi grazie ai progressi nell'hardware e nelle tecniche di elaborazione delle immagini; il quarto periodo (dal 2000 in poi) si distingue per l'impiego di sistemi di tracciamento dello sguardo remoto, utilizzando dispositivi come desktop, laptop, tablet, TV e smartphone (Shehu et al., 2021)

Gli *eye tracker* di oggi si basano sul metodo di riflessione corneale per rilevare e seguire la posizione dell'occhio durante il movimento. Questa tecnica utilizza una fonte di luce che illumina l'occhio (passo 3 in Figura 3.3), generando un riflesso sulla cornea, catturato poi da una telecamera ad alta risoluzione. Le immagini ottenute vengono elaborate da algoritmi

avanzati per stabilire il punto esatto su cui l'individuo sta posizionando lo sguardo (Bergstrom et al., 2014).

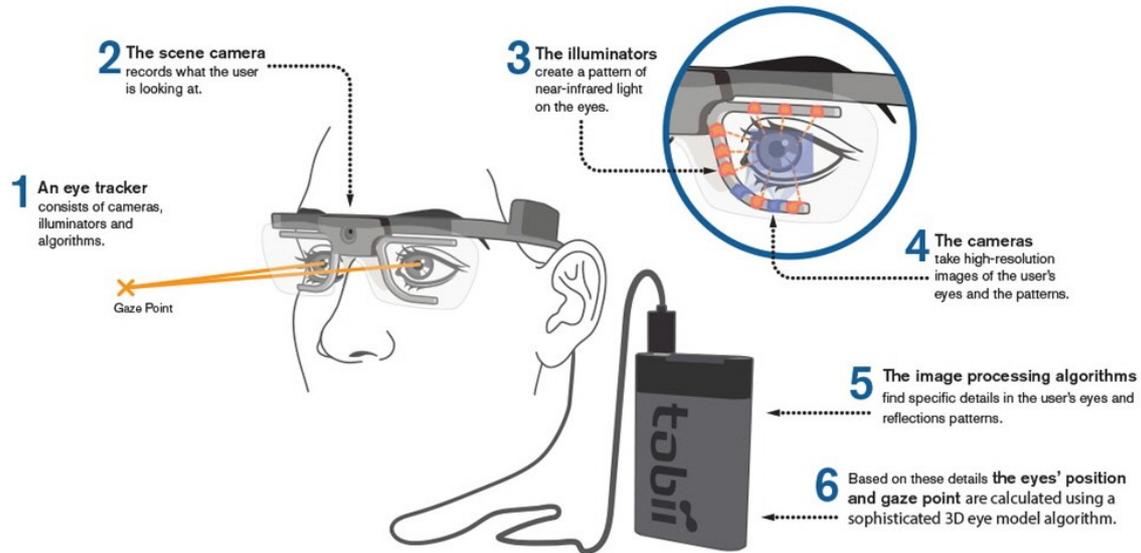


Figura 3.3 - Funzionamento dei moderni eye tracker (<https://www.ashokcharan.com/Marketing-Analytics/~bm-eye-tracking-how-it-works.php#gsc.tab=0>)

Tuttavia, è importante notare che l'occhio umano non rimane fisso su un punto, ma effettua continui movimenti per costruire un quadro completo della scena visiva. Questi movimenti oculari sono suddivisi in due categorie principali: fissazioni e saccadi (Duchowski, 2017). Le fissazioni rappresentano brevi pause in cui l'occhio rimane fermo, tipicamente da decine di millisecondi a diversi secondi e si concentra su un'area specifica del campo visivo, detta area di interesse (AOI), mentre le saccadi sono i movimenti oculari più veloci dell'occhio (durano tipicamente da 30 a 80 ms) e consistono nel passaggio da un'AOI all'altra (Das et al. 2018). Questi movimenti sono essenziali per elaborare una visione completa di ciò che l'individuo sta osservando ed essere utilizzati nelle ricerche su HRC e sulle prestazioni di lavoro (Zheng et al., 2022).

L'applicazione dell'*Eye Tracking* nel campo del manufacturing appare particolarmente interessante. Questa tecnologia può essere utilizzata per studiare come gli operatori interagiscono con macchinari complessi, monitorare dove concentrano la loro attenzione durante le operazioni di assemblaggio o controllo qualità, identificare eventuali errori nello svolgimento dei compiti (Figura 3.4) e potenziali punti di stress o carico di lavoro cognitivo elevato (Shi e Rothrock, 2022).



Figura 3.4 - Visuale e punto di attenzione di un operatore registrata dall'eye tracker durante un errore (<https://www.tobii.com/blog/improve-standardized-work>)

Ad esempio, l'*Eye Tracking* può essere utilizzato per analizzare l'efficienza e la sicurezza di una linea di produzione. Gli operatori possono indossare dispositivi di *Eye Tracking* per registrare esattamente dove guardano mentre lavorano. Questi dati possono essere utilizzati per ottimizzare il layout delle stazioni di lavoro, migliorare le procedure di sicurezza e identificare potenziali fonti di stress o fatica visiva (García-Saravia et al., 2017; Das et al., 2018).

L'*Eye Tracking* può, inoltre, aiutare a valutare il carico di lavoro cognitivo degli operatori e identificare situazioni in cui potrebbero essere sovraccaricati di informazioni o compiti. Nello studio di Lušić et al. (2016), tramite l'*Eye Tracking* si indaga, ad esempio, la differenza di produttività che si registra nel fornire ad un operatore le istruzioni in maniera statica (su carta) o dinamica, dimostrando una maggiore produttività nel caso di indicazioni digitali.

In sintesi, l'*Eye Tracking* è una potente tecnologia che fornisce una profonda comprensione del comportamento visivo umano in una vasta gamma di contesti. Applicata al manufacturing, questa tecnologia può contribuire a migliorare la produttività, la sicurezza e il benessere degli operatori, fornendo informazioni preziose sulla loro attenzione, stress e carico di lavoro cognitivo, affermandosi come uno strumento utile anche a migliorare la HRC, promuovendo ambienti di lavoro più sicuri ed efficienti.

3.1 Metriche di tracciamento oculare

Le metriche che si possono estrarre dall'utilizzo del sensore di *Eye Tracking* sono numerose e vengono analizzate in moltissimi studi. Nella Tabella 3.1, si riporta uno schema riassuntivo delle principali metriche, selezionando quelle più rilevanti anche in vista dell'esperimento realizzato.

Tabella 3.1 - Schema delle principali metriche di tracciamento oculare

Metrica	Definizione e unità di misura	Relazione con MWL	Riferimenti
Frequenza di ammiccamento (<i>blink rate</i>)	Numero di ammiccamenti per unità di tempo, solitamente misurata in ammiccamenti al minuto (ammiccamenti/min)	Correlazione negativa	Benedetto et al., 2011; Biondi et al. 2023; Brookings et al., 1996; Holland & Tarlow, 1972; Ledger, 2013; Tsai et al., 2007.
		Correlazione positiva	
Durata di ammiccamento (<i>blinking lasting</i>)	Tempo impiegato per un singolo ammiccamento, misurato in millisecondi (ms).	Correlazione negativa	Benedetto et al., 2011; Van Orden et al., 2001; Veltman e Gaillard al., 1996; Veltman e Gaillard., 1998.
		Correlazione positiva	
Frequenza delle fissazioni (<i>fixation frequency</i>)	Numero di fissazioni per unità di tempo, solitamente misurata in fissazioni al minuto (fissazioni/min).	Correlazione positiva	He et al., 2012; Van Orden et al., 2001.
Durata delle fissazioni (<i>fixation lasting</i>)	Tempo durante il quale lo sguardo rimane fisso su un punto, misurato in millisecondi (ms).	Correlazione positiva	Das et al., 2018; Guo et al., 2022; He et al. 2012; Holmqvist et al., 2011.

Numero delle saccadi (<i>number of saccades</i>)	Numero di saccadi (conteggio)	Correlazione positiva	Das et al., 2018; Guo et al., 2022; He et al., 2012.
Velocità delle saccadi (<i>saccades velocity</i>)	Velocità di spostamento dell'occhio durante una saccade, misurata in gradi al secondo (°/s) o metri al secondo (m/s).	Correlazione positiva	He et al., 2012; Savage et al., 2013; Tokuda et al., 2011.
Dimensione del diametro pupillare (<i>pupil diameter</i>)	Diametro della pupilla, misurato in millimetri (mm).	Correlazione positiva	Biondi et al., 2023; Beatty e Kanheman, 1966; Bergstrom et al., 2014; Guo et al., 2022; Tokuda et al., 2011; Tsai et al., 2007; Upasani, 2023.

Le ricerche sul comportamento oculare dimostrano l'impatto del carico cognitivo su diverse metriche. Molti di questi indicatori sono, tuttavia, influenzati anche da altri fattori non correlati al carico di lavoro, come le variazioni individuali nella fisiologia oculare e le risposte naturali alla luce e alla profondità visiva. Alcune di queste metriche presentano, inoltre, una correlazione sia positiva che negativa, proprio a causa delle condizioni ambientali e fisiologiche. La difficoltà principale nell'uso di queste metriche per valutare il carico cognitivo è proprio quella di identificare gli effetti specifici e le cause delle variazioni di tali metriche.

4. SECONDARY TASK

Un metodo efficace per valutare il carico cognitivo è l'uso di task secondarie, che vengono svolte in parallelo al compito principale (Zheng, 2017).

Si possono effettuare attività secondarie di diverso tipo come acustiche, visive, di velocità, di calcolo, di memoria (Figura 4.1). Le variabili tipiche per la misura dei compiti secondari sono tempo di reazione, varianza della stima del tempo, accuratezza e tempo di risposta (a operazioni di aritmetica mentale o ricerca nella memoria), tassi di rilevamento dei segnali, prestazioni di tracciamento (come errore RMS o inversioni di controllo), numero di compiti contemporanei in un intervallo e percentuale di tempo occupato (Cain, 2007). Si prevede che la misurazione delle prestazioni in un compito secondario fornisca un'indicazione del carico cognitivo generato da un compito primario (Cain, 2007; Upasani, 2023). Quando si implementa una task secondaria, è cruciale che questa sia sufficientemente semplice da non diventare il focus dell'attenzione, ma abbastanza impegnativa da richiedere l'utilizzo di risorse cognitive residue (Young et al., 2015).

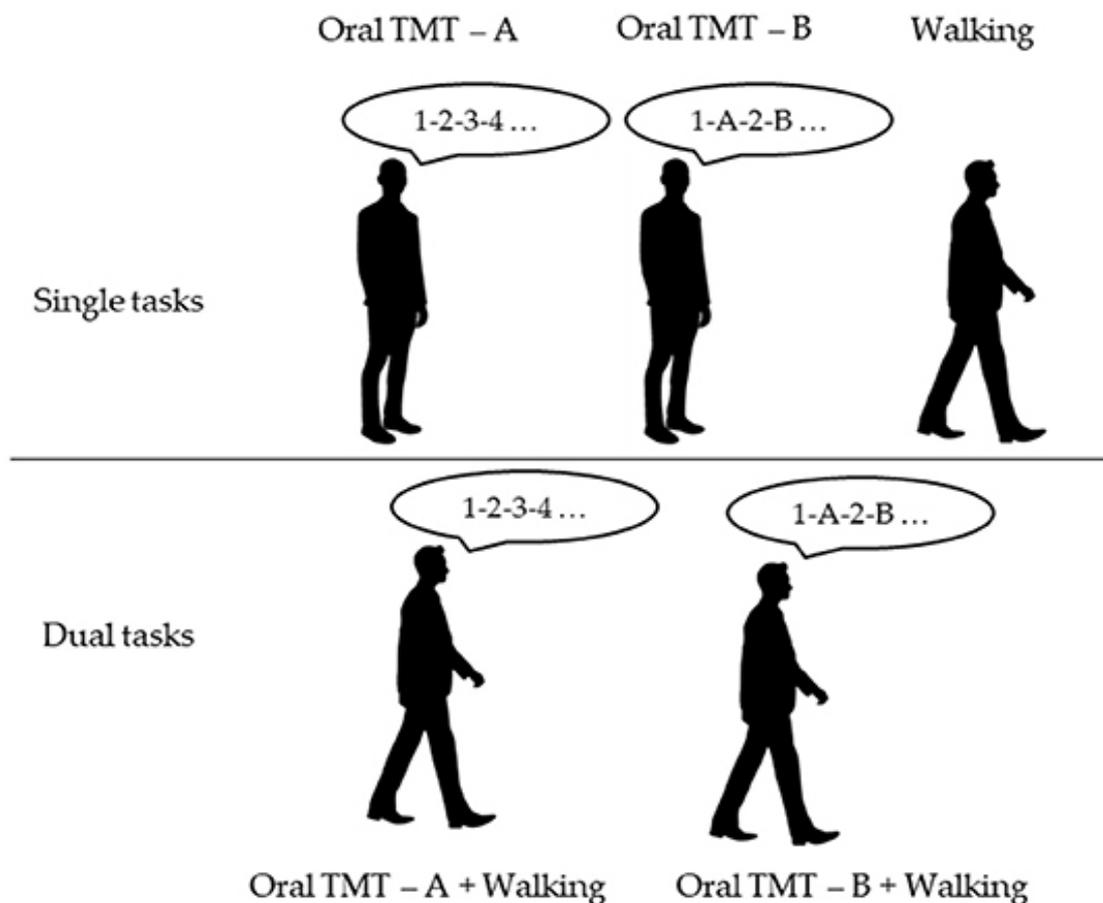


Figura 4.1 - Esempio di compito secondario tramite il Trail Making Test (TMT) eseguito oralmente e in movimento: in alto, soggetti svolgono singolarmente l'Oral TMT-A (sequenza crescente di soli numeri) e TMT-B (sequenza crescente e alternata di numeri e lettere) e la camminata; in basso, soggetti combinano l'Oral TMT con la camminata per valutare la capacità di multitasking e il carico cognitivo. (<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2021.712463/full>)

Questa tecnica è stata ampiamente utilizzata e di seguito vengono descritti alcuni degli studi presenti in letteratura.

Nello studio di Arana-De Las Casas et al. (2023) viene valutato il MWL tramite l'uso di compiti di Dual N-Back, in modo da indurre diversi livelli di carico di lavoro mentale nei partecipanti che interagiscono con un'interfaccia grafica utente (GUI). La prova prevede la visualizzazione di una matrice con degli operandi di cui i soggetti devono ricordare posizione e valore. Aumentando la difficoltà, alle persone coinvolte viene chiesto di svolgere operazioni aritmetiche di crescente complessità sottoponendole ad un carico cognitivo maggiore. Ciò che emerge è il raggiungimento di diverse percentuali di risposte corrette a seconda del livello di carico mentale indotto, mostrando una diminuzione delle risposte corrette all'aumentare del MWL.

Lo studio di Biondi et al. (2021) riporta l'effetto del carico cognitivo sulle prestazioni e sull'attività muscolare durante un compito di assemblaggio, svolto in contemporanea con un compito secondario di N-back a livelli crescenti di difficoltà. L'esperimento realizzato prevede la costruzione di un set LEGO in 3 condizioni di difficoltà crescente: la prima prova viene svolta senza eseguire il compito secondario, mentre nella seconda e terza prova viene rispettivamente associato un compito uditivo di 0-back (è richiesto di ricordare l'ultimo numero ascoltato) e uno di 2-back (è richiesto di ricordare il terzultimo numero della serie). I risultati mostrano che ad un maggiore carico cognitivo, corrispondono tempi di completamento dell'assemblaggio maggiori e prestazioni peggiori. La scelta del compito uditivo viene giustificata dalla volontà di ricreare situazioni simili al quotidiano come rispondere al telefono o ascoltare la radio. Anche le risposte del NASA-TLX rivelano valutazioni maggiori del carico di lavoro mentale durante le prove con difficoltà elevata.

Lo studio di Drouot et al. (2022) indaga la differenza di prestazioni ottenute utilizzando istruzioni in realtà aumentata (AR) e istruzioni computerizzate di un compito di assemblaggio. Dalle conclusioni si rileva che i partecipanti rilevano stimoli auditivi meno frequentemente quando utilizzano istruzioni in realtà aumentata (AR), suggerendo che il carico di lavoro mentale è maggiore quando si utilizza l'AR. Ciò è supportato anche dai tempi di reazione agli stimoli uditivi più lunghi rispetto a quelli durante l'uso del computer.

Un altro campo di applicazione della *secondary task* è l'addestramento chirurgico, studiato da Haji et al. (2015), che dimostrano come le prestazioni del compito secondario sono sensibili alle variazioni del carico cognitivo.

Park et al. (2015) propongono un nuovo metodo sperimentale per misurare il carico cognitivo attraverso una task secondaria, noto come “*Rhythm Method*”, che consiste nel battere un ritmo con il piede mentre si svolge un compito primario di apprendimento tramite materiale multimediale. La precisione nel riprodurre il ritmo è utilizzata come indicatore del carico cognitivo: maggiore è la precisione, minore è il carico cognitivo.

Nell'articolo di Prabhakar et al. (2018), si misura il carico cognitivo attraverso diametro pupillare, movimenti della testa ed EEG mentre dei conducenti svolgono il compito di guida e un compito secondario. Quest'ultimo consiste nello schiacciare pulsanti sul display del cruscotto in risposta ad un segnale acustico. L'utilità della task secondaria descritta è quella di fornire un modo per misurare l'aumento del carico cognitivo e la distrazione dei conducenti all'interno di un ambiente automobilistico.

In sintesi, la *secondary task* risulta essere un metodo valido per valutare il carico cognitivo, nonostante ci sia il rischio di proporre un compito secondario invasivo che può limitarne l'efficacia (Zheng, 2017).

5. PROVA DI ASSEMBLAGGIO IN HRC CON SECONDARY TASK

Terminata la parte di revisione della letteratura, l'attenzione si è spostata sul progettare un esperimento che prevedesse un processo di assemblaggio in collaborazione ad un braccio robotico, con l'aggiunta di un compito secondario da svolgere contemporaneamente per integrare diverse misure del carico cognitivo (pupillometria, EDA e HRV) e le prestazioni legate alla task secondaria.

5.1 Descrizione dell'esperimento

L'esperimento, realizzato presso il Mind4Lab del Politecnico di Torino, consiste in una fase preparatoria di circa 20 minuti (descritta in seguito), in una prova di assemblaggio della durata di 100 minuti e una fase finale di feedback di pochi minuti, per una durata complessiva di poco più di 2 ore. L'assemblaggio prevede il montaggio di una pompa a membrana (Figura 5.1), una tipologia di pompa volumetrica a doppia membrana funzionante mediante l'utilizzo di aria compressa.



Figura 5.1 - Viste della pompa a membrana

La pompa a membrana impiega una valvola pneumatica che dirige l'aria compressa avanti ed indietro tra i due lati della pompa e permette di movimentare liquidi con diversa viscosità.

I singoli componenti della pompa a membrana visibili in Figura 5.2 sono:

- F1: Flangia 1
- F2: Flangia 2
- M1: Prima membrana
- M2: Seconda membrana

- CT: Coperchio del tappo della pompa
- BM: Blocco motore
- SBM: Supporto del blocco motore
- V1: 2 viti per avvitare il supporto al blocco motore
- V2: 3 viti per la prima membrana
- V3: 3 viti per avvitare il coperchio del tappo della pompa alla flangia 2
- V4: 3 viti per avvitare il tappo della pompa al blocco motore



Figura 5.2 - Componenti della pompa a membrana

I passi da seguire per l'assemblaggio della pompa in collaborazione con il braccio robotico (Tabella 5.1), appositamente configurato, sono i seguenti:

- 1) L'operatore si posiziona davanti al banco di lavoro come in Figura 5.3. Alla sua sinistra si trova il vassoio contenente i vari componenti da assemblare, comprese le viti. Alla sua destra si trova il pulsante blu per comunicare con il Cobot e iniziare l'assemblaggio, oltre al cacciavite da utilizzare nel processo.

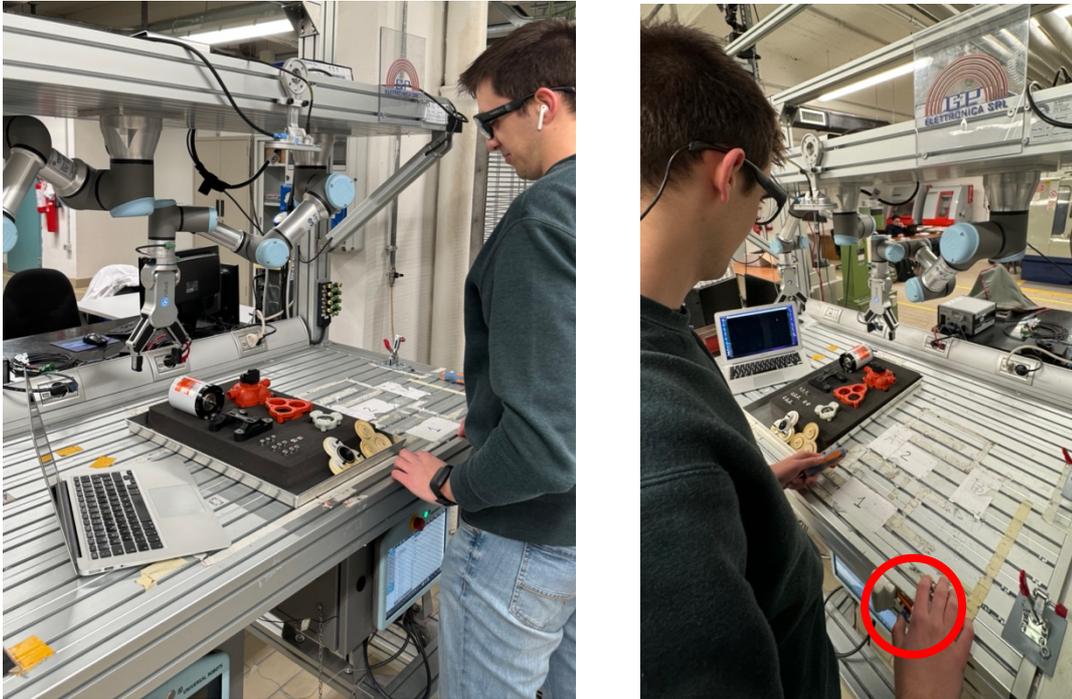


Figura 5.3 - Partecipante in posizione iniziale pronto ad iniziare la prova e posizione del tasto blu da premere per interagire con il Cobot cerchiata in rosso

- 2) L'operatore preme il pulsante blu e il Cobot si muove: posiziona sul piano di lavoro la flangia 1 e la flangia 2. L'operatore inserisce la flangia 1 nella flangia 2.
- 3) Una volta posizionata la prima membrana ad incastro con la flangia 1, l'operatore la avvita con tre viti. Si procede con l'inserimento della seconda membrana.
- 4) L'operatore per andare avanti deve premere il pulsante blu: il Cobot afferra il coperchio 1 e lo posiziona sul banco di lavoro. L'operatore procede ad avvitare il coperchio al pezzo precedentemente assemblato utilizzando tre viti sui fori esterni. La testa della pompa è assemblata.
- 5) L'operatore posiziona da parte il pezzo assemblato e preme il pulsante blu: il Cobot afferra il blocco motore e lo sorregge affinché l'operatore possa avvitare il supporto tramite due viti (Figura 5.4).

- 6) Assemblato il supporto, l'operatore preme il pulsante blu per farsi rilasciare il blocco motore. Una volta appoggiato sul banco di lavoro, l'operatore prende la testa della pompa, la inserisce nel blocco motore e la avvita con tre viti.

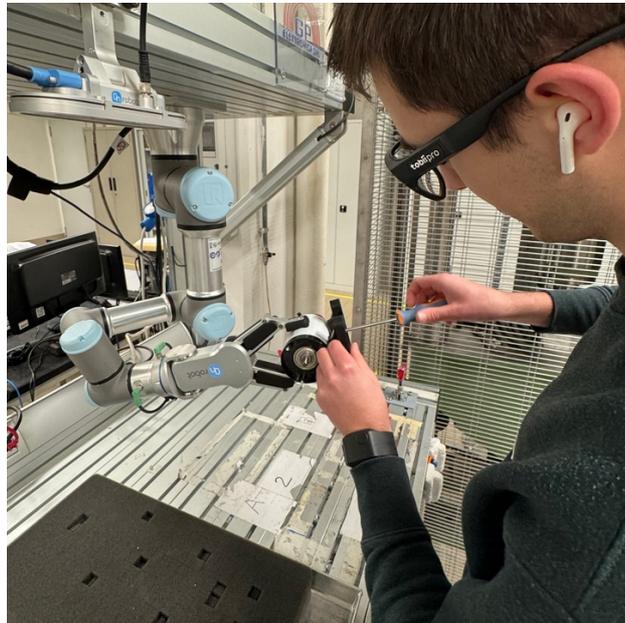


Figura 5.4 - Passo 5 della sequenza di assemblaggio

Tabella 5.1 - Schema riassuntivo dei ruoli associati alle operazioni della sequenza di assemblaggio

Sequenza di assemblaggio	Attore
Posizionamento flangia 1	Cobot
Posizionamento flangia 2	Cobot
Inserimento flangia 1 in flangia 2	Operatore umano
Inserimento prima membrana	Operatore umano
Inserimento viti e avvitatura membrana	Operatore umano
Inserimento seconda membrana	Operatore umano
Posizionamento coperchio arancione	Cobot
Avvitatura coperchio	Operatore umano
Posizionamento blocco motore	Cobot
Sostegno blocco motore	Cobot
Avvitatura supporto	Operatore umano
Inserimento testa su blocco motore	Operatore umano
Avvitatura testa	Operatore umano

Durante la prova, è stato chiesto all'operatore umano di compiere il maggiore numero di assemblaggi possibile fino allo scadere dei 100 minuti. La scelta di un intervallo abbastanza grande è motivata dal fatto che si è cercato di replicare una situazione reale di lavoro e dalla volontà di provocare un affaticamento maggiore nel partecipante.

5.2 Metodologia e strumenti utilizzati

5.2.1 Empatica E4

L'Empatica E4 (Figure 5.5 e 5.6) è un braccialetto indossabile progettato per il monitoraggio in tempo reale di parametri fisiologici critici. È un dispositivo dotato di sensori per misurare la risposta elettrodermica (EDA), la frequenza cardiaca, la temperatura della pelle e l'attività motoria. L'EDA, in particolare, è sensibile alle variazioni del livello di stress e di eccitazione emotiva, rendendo l'Empatica E4 uno strumento prezioso per valutare il carico cognitivo in condizioni di lavoro complesse. Nel contesto dell'esperimento, l'Empatica E4 permette di catturare variazioni fisiologiche che possono indicare un aumento dello stress o del carico cognitivo durante l'assemblaggio e la task secondaria.

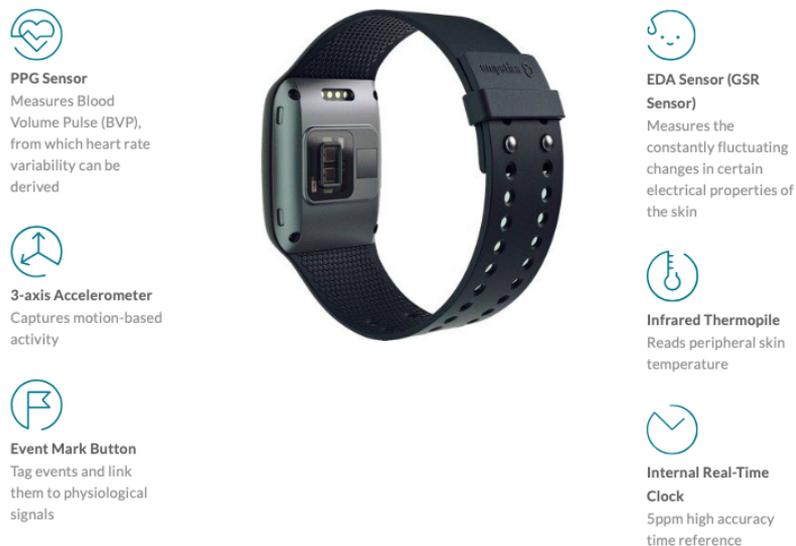


Figura 5.5 - Dispositivo indossabile multifunzione per il monitoraggio biometrico: dotato di sensore PPG per misurare il battito cardiaco e la variabilità della frequenza cardiaca (HRV), accelerometro 3-assi per la cattura dell'attività fisica, sensore EDA per il rilevamento della conduttanza cutanea legata allo stress, termometro a infrarossi per la temperatura periferica della pelle, e un pulsante per marcare eventi e sincronizzare segnali fisiologici con specifici eventi (<https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/>)

Technical specifications

Form Factor Case: 44mm x 40mm x 16mm Wrist: 110 - 190 mm Weight: 25 g		Splash Resistant Materials Band: polyurethane Case: polycarbonate and glass fiber Lenses: polycarbonate and silicon
Battery Streaming Mode: 24+ h Recording Mode: 32+ h Charging time: < 2 h		Regulatory Compliance CE Cert. No. 1876/MDD (93/42/EEC Directive, Medical Device class 2a) FCC CFR 47 Part 15b IC (Industry Canada) RoHS MIC Japan: BLE112 has type approval certification ID R209-J00046
Data Transfer Bluetooth Low Energy Smart® USB 2.0		
Flash memory Up to 60h of data storage		

Figura 5.6 - Specifiche tecniche dell'Empatica E4 (<https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/>)

5.2.2 Tobii Pro Glasses 3

I Tobii Pro Glasses 3 (Figura 5.7) sono un *eye tracker* binoculare che permette di registrare con precisione (spaziale e temporale) dove e come gli utenti guardano nell'ambiente che li circonda. Questo dispositivo è composto da un paio di occhiali dotati di telecamere e sensori in grado di tracciare i movimenti oculari e le fissazioni visive di entrambi gli occhi. L'utilizzo dei Tobii Pro Glasses 3 nell'esperimento è fondamentale per acquisire dati sul comportamento visivo dei partecipanti, che vengono successivamente analizzati per comprendere come il carico cognitivo influenzi i parametri della pupillometria durante l'assemblaggio e la task secondaria. Il sistema completo Tobii Glasses 3 è costituito dagli occhiali, da un'unità principale dove risiedono batteria e scheda di registrazione e dall'applicazione controller Tobii Glasses 3 installata su un dispositivo esterno.



Figura 5.7 - Tobii Pro Glasses 3 (<https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3>)

5.2.3 Computer fisso e portatile

Il computer fisso consente la connessione dei Tobii Pro Glasses 3 e la registrazione delle relative sessioni sull'applicazione Tobii Glasses 3.

La presenza di un computer portatile è necessaria per la realizzazione del setup dell'esperimento. Il pc riproduce i programmi in Python scritti su PyCharm e permette al partecipante di rispondere alla task secondaria tramite la pressione dei tasti associati. Viene posizionato a sinistra del partecipante oltre il vassoio contenente i componenti della pompa (Figura 5.8).

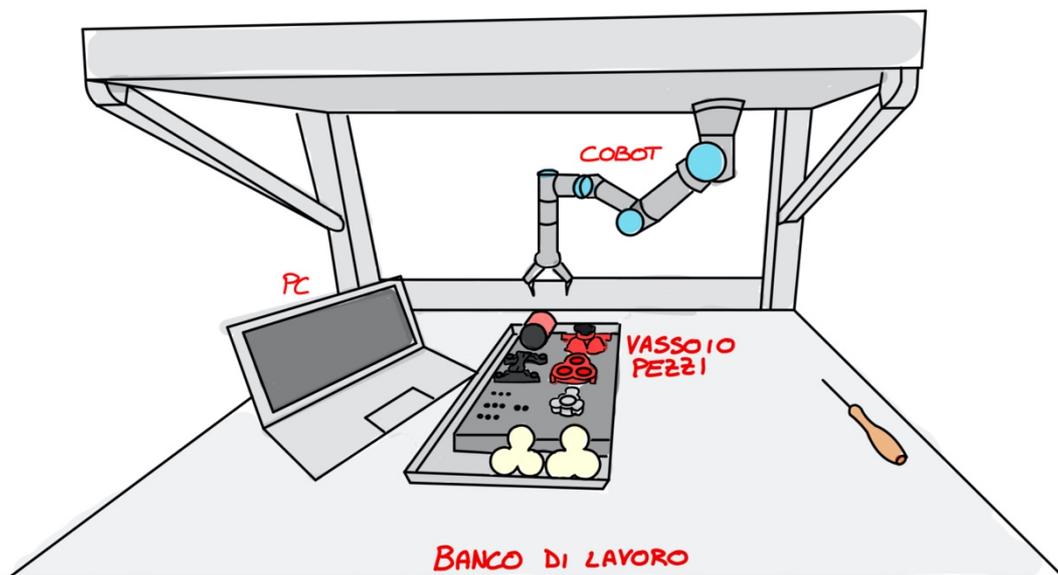


Figura 5.8 - Schema riassuntivo della stazione di lavoro

5.2.4 Cuffiette Bluetooth

Le cuffiette Bluetooth servono a trasmettere in modalità wireless i suoni associati alla task secondaria direttamente all'orecchio del partecipante, minimizzando le distrazioni esterne e garantendo che l'attenzione rimanga sull'assemblaggio. Inoltre, permettono di udire chiaramente i suoni distintamente senza la presenza di un filo di collegamento che limiti l'operatore nel compiere movimenti. Nel caso dell'esperimento, il partecipante indossa una singola cuffietta, mentre l'altra viene indossata da chi gestisce l'esperimento per controllare eventuali rischi e anomalie che possono insorgere.

5.2.5 Task secondaria

L'attività secondaria proposta nell'esperimento consiste nel distinguere due suoni, il suono di una moneta e un suono di errore, riprodotti in maniera casuale attraverso le cuffiette wireless (Figure 5.9 e 5.10). I partecipanti sono istruiti a reagire a questi stimoli premendo i tasti "C" (*Coin*) o "E" (*Error*) sulla tastiera il più rapidamente possibile a seconda del suono appena ascoltato. Questa task è progettata per essere svolta in parallelo all'assemblaggio della pompa a membrana, creando una situazione in cui i partecipanti devono gestire due compiti contemporaneamente. La rapidità e l'accuratezza delle risposte alla task secondaria forniscono una misura quantitativa dell'effetto del carico cognitivo sull'abilità dei partecipanti di processare e reagire agli stimoli acustici. Per realizzare l'attività è stato utilizzato il programma PyCharm, un ambiente di sviluppo integrato (IDE) specificamente progettato per la programmazione in Python. Nello svolgimento di questa attività, sono state considerate tre diverse casistiche: la prima consiste nel premere erroneamente il tasto associato al suono, la seconda si verifica quando il partecipante preme due volte lo stesso tasto per reagire al suono e la terza prevede la mancata risposta di reazione alla riproduzione di un suono. I primi due eventi rientrano nella categoria di suoni non riconosciuti correttamente, mentre la terza possibilità nella categoria di suoni mancati.



Figura 5.9 - Partecipante che reagisce al suono appena ascoltato e preme il tasto associato



Figura 5.10 - Registrazione della visuale del partecipante tramite Tobii Pro Glasses 3 mentre risponde alla task secondaria

5.2.6 Scrittura del codice della *secondary task*

Per la realizzazione dell'esperimento sono stati scritti tre programmi diversi su PyCharm (codici riportati in Appendice): i primi due rendono possibile la registrazione del test solo uditivo iniziale e finale della *secondary task*, mentre il terzo permette la registrazione della task uditiva durante la prova di assemblaggio.

- Test uditivo iniziale e finale: prevede la registrazione dei tempi di reazione del partecipante all'ascolto di 30 suoni riprodotti, salvando le informazioni sul tipo di suono emesso, sul pulsante premuto e sul relativo tempo di emissione e pressione del tasto su un file Excel denominato "baseline_8sec.xlsx", a cui si aggiungono di volta in volta delle righe sottostanti. Tra ciascun suono è previsto un gap temporale di 8 secondi che non viene comunicato al partecipante.
- *Secondary task* durante l'assemblaggio: questo compito prevede la riproduzione randomica dei due suoni precedenti durante la fase di assemblaggio con divario temporale di 45 secondi tra un suono e l'altro, non comunicato al partecipante. Grazie al codice scritto, è possibile tenere traccia del tempo di emissione del suono e del tempo di reazione del partecipante al suono su un file Excel, denominato "Dual-task_reaction45.xlsx", che si aggiorna automaticamente. Come già descritto, al momento di avvio del programma, si apre una schermata nera con il titolo di "Reazioni ai suoni" per evitare distrazioni e si sfruttano le librerie sopra elencate. A differenza del programma del test uditivo, è stato aggiunto un terzo tasto "Space" che viene premuto da chi gestisce l'esperimento ogni volta che viene portato a termine un assemblaggio. Anche di questo tasto si tiene traccia del timestamp in cui avviene la pressione.

Il protocollo seguito per lo svolgimento dell'esperimento è il seguente:

1) Preparazione del partecipante all'esperimento

- Invio del video di assemblaggio: i partecipanti ricevono un video il giorno precedente all'esperimento, per prendere confidenza con i vari passi del processo.

2) Fase preparatoria nel laboratorio Mind4Lab

- Introduzione generale all'esperimento: al partecipante viene spiegato che dovrà compiere degli assemblaggi ripetuti della pompa a membrana fino allo scadere di un intervallo di tempo non noto ed eseguire la task uditiva di distinzione dei suoni.
- Indossare l'Empatica E4: al partecipante si chiede di indossare il dispositivo Empatica E4.
- Spiegazione test iniziale della *secondary task*: al partecipante vengono fatti sentire i due suoni e viene spiegato il tasto ad essi associato. Si effettua un tentativo di 4 prove acustiche per chiarire le modalità di risposta.
- Registrazione del test iniziale della *secondary task*: si effettua una sessione di registrazione di 30 prove acustiche, con un intervallo di 8 secondi tra ciascuna, avviando il programma precedentemente descritto.
- Spiegazione dell'assemblaggio della pompa: vengono svolte due prove pratiche, la prima guidata in cui viene spiegata dettagliatamente la sequenza di assemblaggio e una eseguita in maniera autonoma. In questa fase la task secondaria non è presente.
- Registrazione *Baseline* Empatica E4: si registrano 2 minuti di rilassamento totale durante i quali il partecipante non può parlare, muoversi o tenere gli occhi aperti.
- Utilizzo dei Tobii Pro Glasses 3: il partecipante indossa l'*eye-tracker*.
- Calibrazione dell'*eye-tracker*: per la calibrazione, il partecipante estenderà il braccio in avanti e fisserà il centro di un bersaglio posto su un cartoncino.
- Registrazione baseline dell'*Eye Tracking*: si effettua una sessione di 30 secondi durante la quale il partecipante fissa una croce di colore rosso, mantenendo una distanza prefissata di tre mattonelle.

3) Svolgimento dell'esperimento

- Inizio della prova della durata di 100 minuti: viene avviato il programma della *secondary task* e il partecipante inizia la prova premendo contemporaneamente il pulsante blu del Cobot e il tag dell'Empatica E4. Ripete questa procedura per ogni

ciclo di assemblaggio. Al termine di ogni ciclo, preme nuovamente il tag dell'Empatica E4 per marcare la conclusione dell'assemblaggio. Un osservatore esterno si occupa di registrare la fine di ogni assemblaggio premendo il tasto “*Space*” e di posizionare ogni volta un nuovo vassoio con i pezzi da montare.

- Durante la prova, circa ogni 20 minuti, l'osservatore esterno chiede al partecipante di descrivere ciò che sente.

4) Conclusione e Feedback

- Registrazione test finale della task secondaria: al termine dei 100 minuti, una volta rimosso l'*eye-tracker*, si effettua un'altra sessione di 30 prove acustiche per valutare eventuali cambiamenti rispetto al test iniziale.
- Domande e Feedback: ai partecipanti verranno poste domande riguardanti la loro esperienza complessiva, le sensazioni prima e dopo l'esperimento, il ruolo e l'eventuale fastidio della task secondaria, oltre a valutazioni su sensazioni di stanchezza, frustrazione, confusione e reattività mentale su una scala da 1 a 10.

All'esperimento hanno preso parte 8 partecipanti, 5 ragazzi e 3 ragazze compresi tra i 23 e i 25 anni (Figura 5.11). L'analisi nel capitolo successivo illustra l'elaborazione dei dati risultanti dallo svolgimento delle 8 prove.

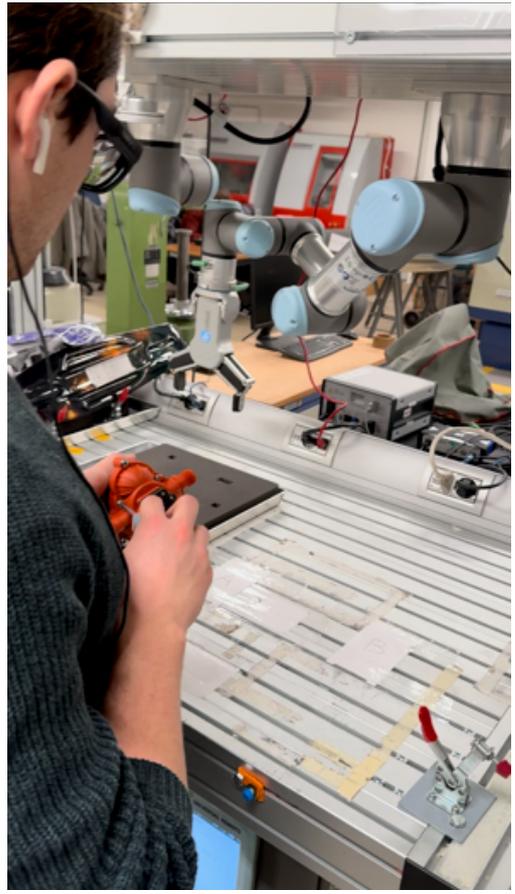


Figura 5.11 - Immagini di partecipanti durante la prova

6. ANALISI DEI DATI RACCOLTI

6.1 Metodologia e analisi

La gestione dei dati raccolti comprende diverse fasi di processamento. Prima di svolgere qualsiasi analisi, è necessario fare del pre-processing e pulire i dati da eventuali anomalie o rumori e/o da dati non necessari. Per comprendere meglio le fasi seguite, il pre-processing viene diviso per campo di applicazione.

6.1.1 Pre-processing tempi di reazione

Al termine dell'esperimento, PyCharm realizza tre file Excel diversi, due riferiti al test uditivo, iniziale e finale, della task secondaria e uno riferito alla task secondaria durante la prova. I file contenenti i tempi di reazione a ciascun suono sono stati visionati uno ad uno per individuare eventuali errori da parte del partecipante nel distinguere i suoni ascoltati.

6.1.2 Pre-processing EDA e frequenza cardiaca

I dati raccolti dall'Empatica E4 vengono scaricati come file zip tramite l'applicazione E4 Manager. Al suo interno si trovano diverse cartelle, ciascuna per ogni parametro registrato. Vengono selezionate quelle di interesse, ovvero EDA e frequenza cardiaca. Per quanto riguarda l'EDA, si procede con la decomposizione del segnale in *skin conductance level* (SCL) e *skin conductance response* (SCR).

6.1.3 Pre-processing pupillometria

Le sessioni video registrate dai Tobii Pro Glasses 3 vengono analizzate sull'applicazione Tobii Pro Lab (Figura 6.1). Ogni video viene rivisto per selezionare le regioni temporali di interesse (TOI) e fare un'analisi sui frammenti di video rilevanti. Al termine di questa fase, nell'esportazione delle metriche di *Eye Tracking* è possibile scegliere i *Time of Interest* (TOI), e decidere se prevedere o meno l'opzione Bin. Non selezionando tale opzione, vengono calcolate tutte le metriche (un valore per ogni metrica per ogni TOI assegnata). Nel caso considerato, invece, si è deciso di selezionare soltanto due grandi TOI (prima e seconda parte della prova) e di scegliere un Bin di 30.000 ms, per cui ogni 30 secondi sono stati salvati i valori relativi alle tre metriche numero di fissazioni (*Number of whole fixation starts*), diametro pupillare medio (*Average of whole fixation pupil diameter*) e numero di saccadi (*Number of saccade starts*).

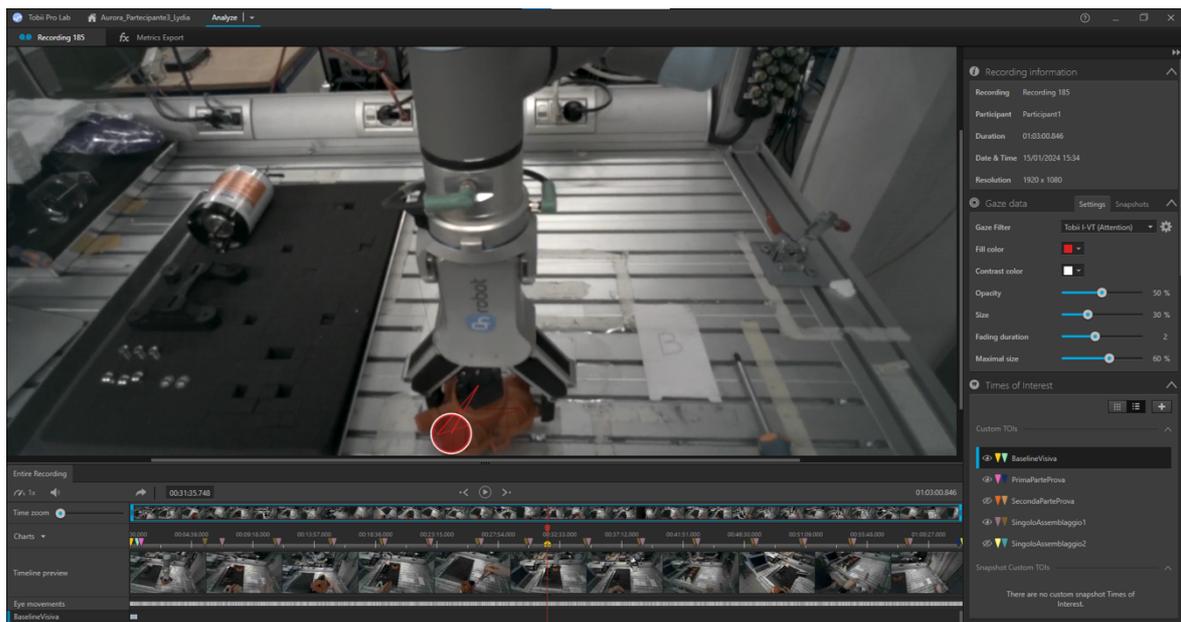


Figura 6.1 - Schermata che riporta l'interfaccia di Tobii Pro Lab

A seguito del pre-processing si passa alla costruzione dei database su Excel, formattati avendo come prima colonna quella relativa ai partecipanti e le successive colonne relative alle variabili di interesse, in modo da facilitare l'interrogazione sulla piattaforma statistica R e procedere con l'analisi dei dati.

Il primo database analizzato è quello relativo ai due test uditivi svolti, quello iniziale prima della prova di assemblaggio e quello finale, dopo la prova di assemblaggio. In Figura 6.2 si riporta la distribuzione dei dati registrati per ciascun partecipante nel test della *secondary task* iniziale, rappresentando i tempi di reazione e la relativa frequenza. Quasi tutti i tempi registrati assumono valori tra 1,2 e 2,7 secondi di reazione. Sommando le frequenze dei tempi del partecipante 4 e del partecipante 7, si nota che sono rispettivamente 29 e 27 i suoni registrati, poiché durante il test i partecipanti non hanno reagito correttamente ad alcuni suoni.

Analogamente si realizza per il test uditivo finale riportato in Figura 6.3. I tempi di reazione registrati assumono valori molto differenti tra i partecipanti. Eseguendo la somma delle frequenze assolute si nota che il partecipante 3 ha reagito correttamente ai 30 suoni tranne in un caso.

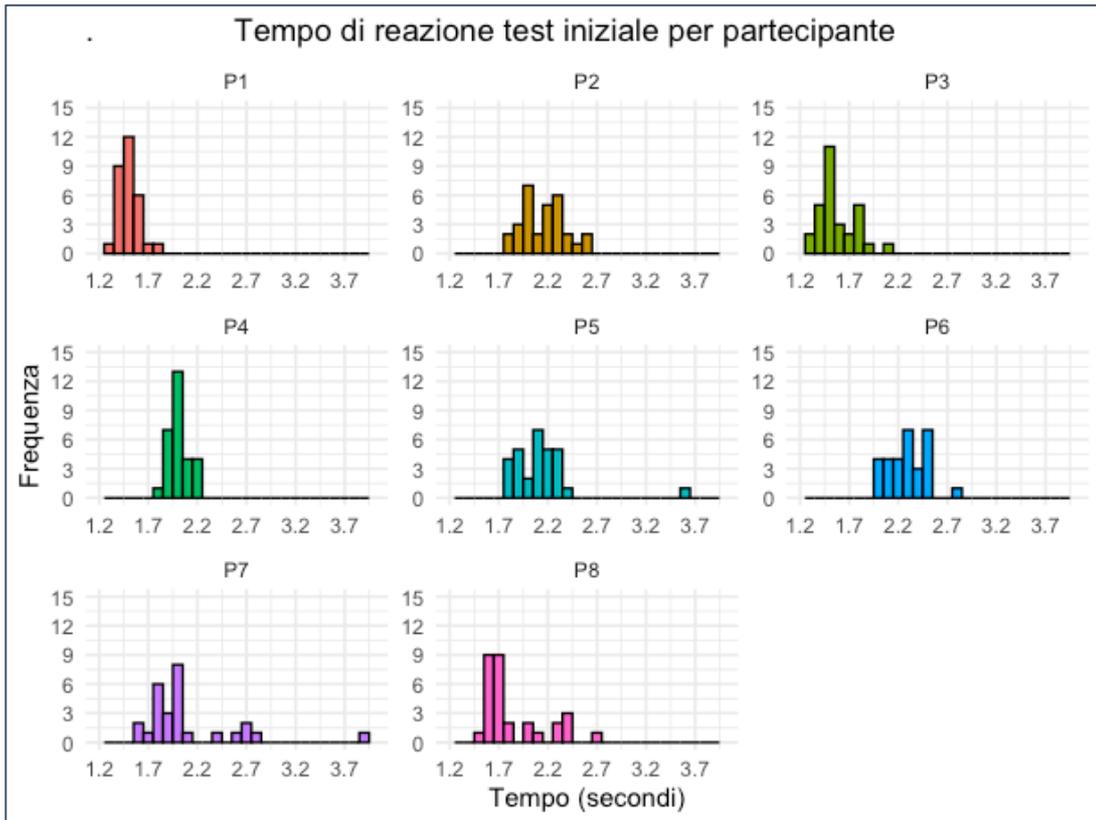


Figura 6.2 - Istogramma dei tempi di reazione al test uditivo iniziale di ogni partecipante

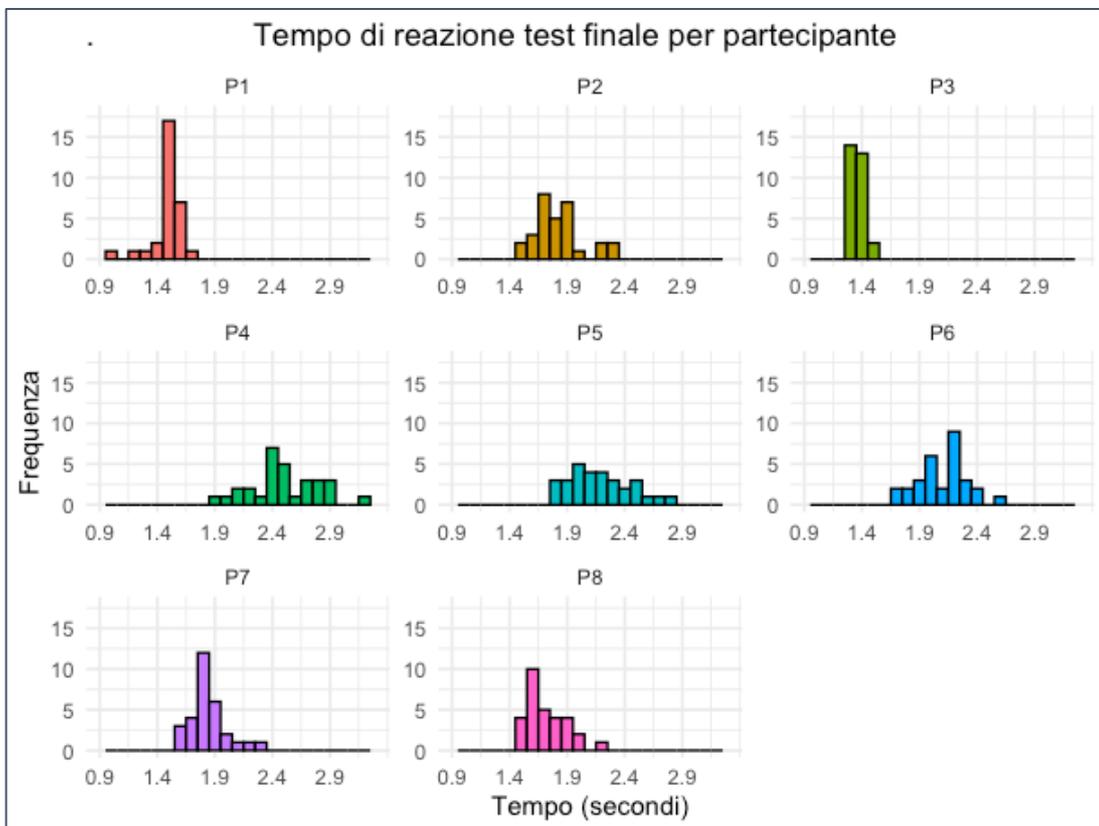


Figura 6.3 - Istogramma dei tempi di reazione al test uditivo finale di ogni partecipante

Procedendo con l'analisi dei dati del test iniziale e finale della *secondary task*, si verifica se i dati registrati seguano una distribuzione normale. Dopo aver creato un database contenente tutti i partecipanti e le relative medie e deviazioni standard del test iniziale e finale registrato (Tabella 6.1), si effettua la verifica di normalità del campione costituito dagli otto partecipanti.

Tabella 6.1 - Medie e Deviazioni standard dei test uditivi per partecipante

Partecipante	Media inizio (secondi)	Dev St Inizio (secondi)	Media fine (secondi)	Dev St Fine (secondi)
P1	1,492	0,096	1,496	0,126
P2	2,157	0,217	1,826	0,209
P3	1,578	0,186	1,358	0,056
P4	2,012	0,097	2,491	0,291
P5	2,134	0,323	2,196	0,273
P6	2,300	0,183	2,099	0,205
P7	2,093	0,486	1,843	0,164
P8	1,849	0,322	1,719	0,171

Il test di normalità utilizzato è quello di Shapiro-Wilk, in quanto risulta essere uno dei più potenti per la verifica di normalità e adatto a trattare campioni di piccola numerosità come nel caso in esame.

La statistica di test W nel test di Shapiro-Wilk è calcolata come:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

dove:

- n è il numero di osservazioni nel campione,
- $x_{(i)}$ sono le osservazioni ordinate in ordine crescente,
- \bar{x} è la media campionaria delle osservazioni,
- a_i sono i coefficienti calcolati che ottimizzano la valutazione della normalità di un campione, adattandosi specificamente alle sue caratteristiche.

Il valore di W può variare da 0 a 1, dove valori vicini a 1 indicano che il campione è probabilmente distribuito normalmente, mentre valori più bassi suggeriscono una deviazione dalla normalità. La decisione di rifiutare o meno l'ipotesi nulla si basa sul confronto del valore di W calcolato con un valore critico o sull'uso del p-value associato a W . Se il p-value

è minore di un livello di significatività prefissato, ossia in questo caso del 5%, allora si rifiuta l'ipotesi nulla. La Tabella 6.2 riporta i valori ottenuti tramite il test di normalità di Shapiro-Wilk.

Tabella 6.2 - Valori ottenuti con Shapiro-Wilk Test

Shapiro-Wilk Test	W	p-value
Media_inizio	0,907	0,335
Media_fine	0,978	0,950
Dev_st_Inizio	0,912	0,368
Dev_st_Fine	0,968	0,884

Dai risultati ottenuti, è possibile affermare che non si può rifiutare l'ipotesi nulla di distribuzione normale ($W \approx 1$ e $p\text{-value} > 0,05$).

Viene svolto successivamente un *Paired t-test* per verificare se la differenza delle medie, iniziale e finale, e quella delle deviazioni standard, iniziale e finale, siano significative. Dal t-test realizzato emergono i risultati in Tabella 6.3.

Tabella 6.3 - Valori ottenuti con paired t-test

Paired t-test	$H_0 = \mu_{finale} - \mu_{iniziale} = 0$	$H_0 = \sigma_{finale} - \sigma_{iniziale} = 0$
t	0,803	0,960
p-value	0,449	0,369
Intervallo di confidenza al 95%	[-0,143; 0,290]	[-0,076; 0,180]
Differenza delle medie stimata	0,073	0,052
Significatività	NO	NO

Infine, sono stati realizzati i boxplot relativi alle medie e alle deviazioni standard per visualizzare la distribuzione dei due gruppi di dati (inizio e fine) correlati tra loro. Viene riportato nuovamente il risultato del t-test per ribadire il fatto che non ci sia una differenza significativa tra test iniziale e finale, né per le medie, né per le deviazioni standard. Il boxplot permette, inoltre, di visualizzare se è presente una tendenza all'aumento o alla diminuzione

dei valori iniziali e finali. Nel caso delle medie (Figura 6.4) 3 partecipanti (P1, P4, P5) su 8 presentano un valore medio finale maggiore dell'iniziale, a testimoniare un rallentamento nei tempi di reazione al termine dell'assemblaggio di 100 minuti, rispetto al test uditivo iniziale.

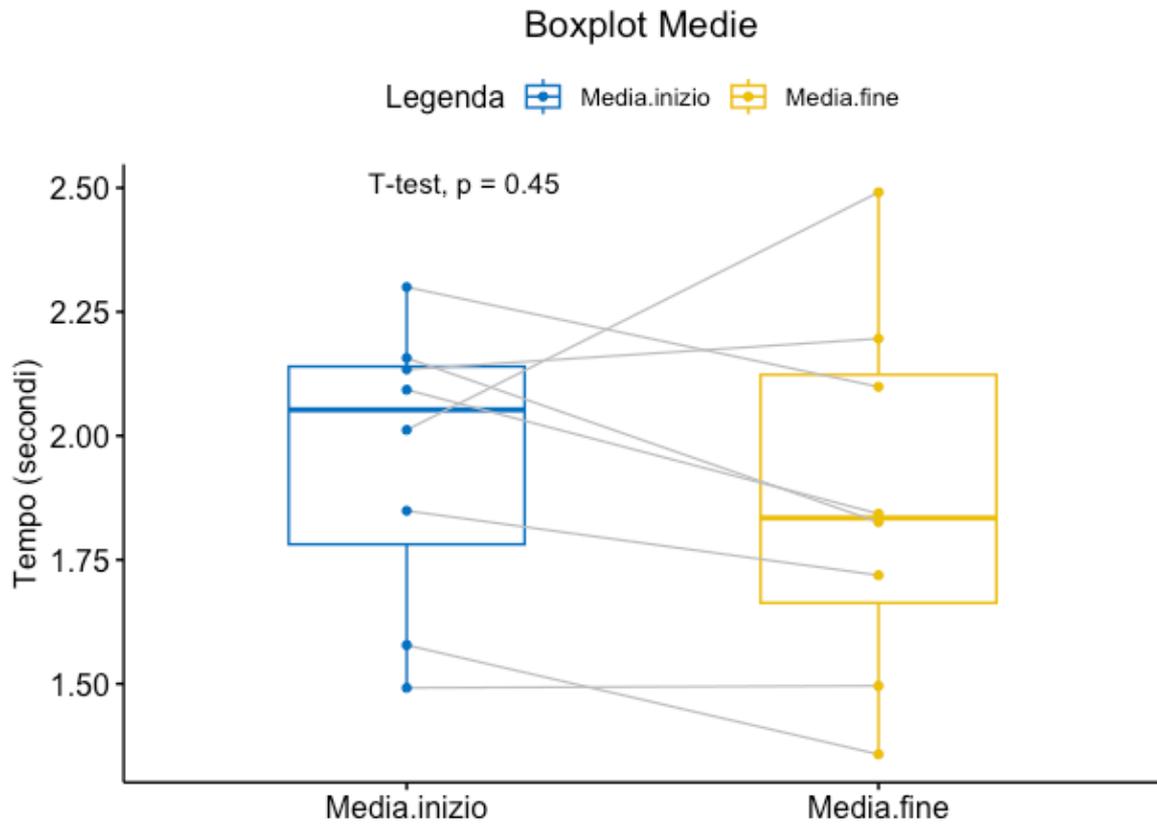


Figura 6.4 - Boxplot delle medie dei due test uditivi

Anche nel caso delle deviazioni standard (Figura 6.5) ci sono 3 partecipanti (P1, P4, P6) su 8 che presentano un valore di deviazione standard finale maggiore dell'iniziale, a testimoniare una maggiore variabilità nei tempi di risposta al termine dell'assemblaggio di 100 minuti, rispetto al test uditivo iniziale.

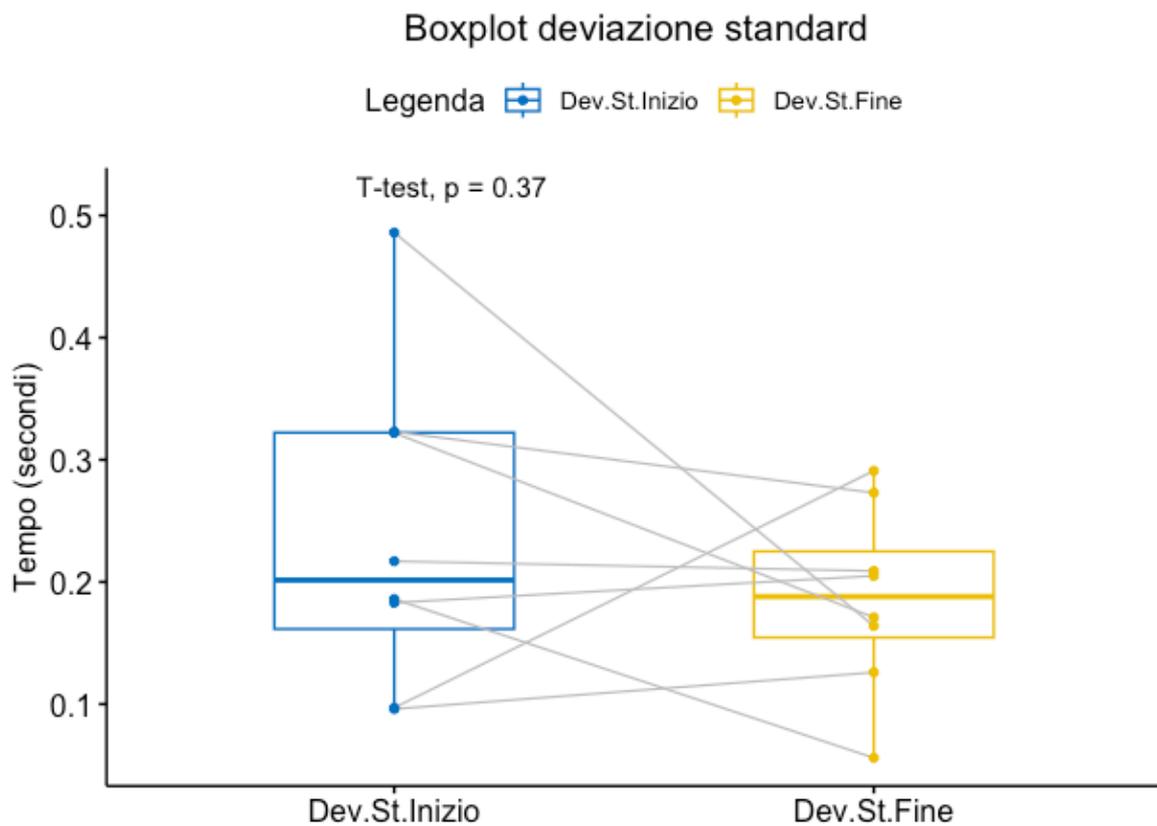


Figura 6.5 - Boxplot delle deviazioni standard dei due test uditivi

A seguito di queste considerazioni, si è deciso di procedere con un'analisi per partecipante, includendo oltre alle misure fisiologiche e ai i tempi di reazione, anche delle misure soggettive ottenute tramite domande poste durante e dopo la prova.

6.2 Partecipante 1

Per svolgere l'analisi del primo partecipante si riportano alcune caratteristiche identificative.

Partecipante 1	Sesso	Età	Professione
	M	24 anni	Studente

Le Figure 6.6 e 6.7 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti. Vengono raffigurati insieme al valore medio di ciascuna prova e si può notare ancora il leggero aumento del valore medio nella prova finale.

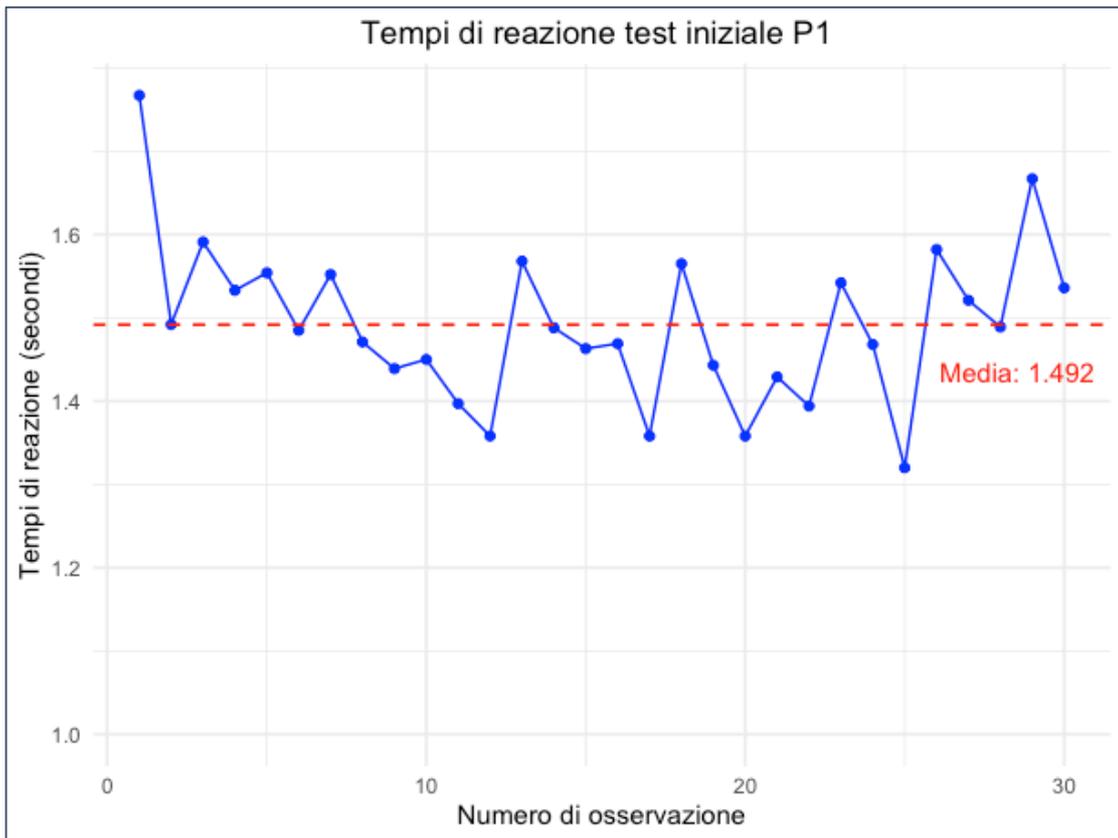


Figura 6.6 - Test uditivo iniziale del partecipante 1

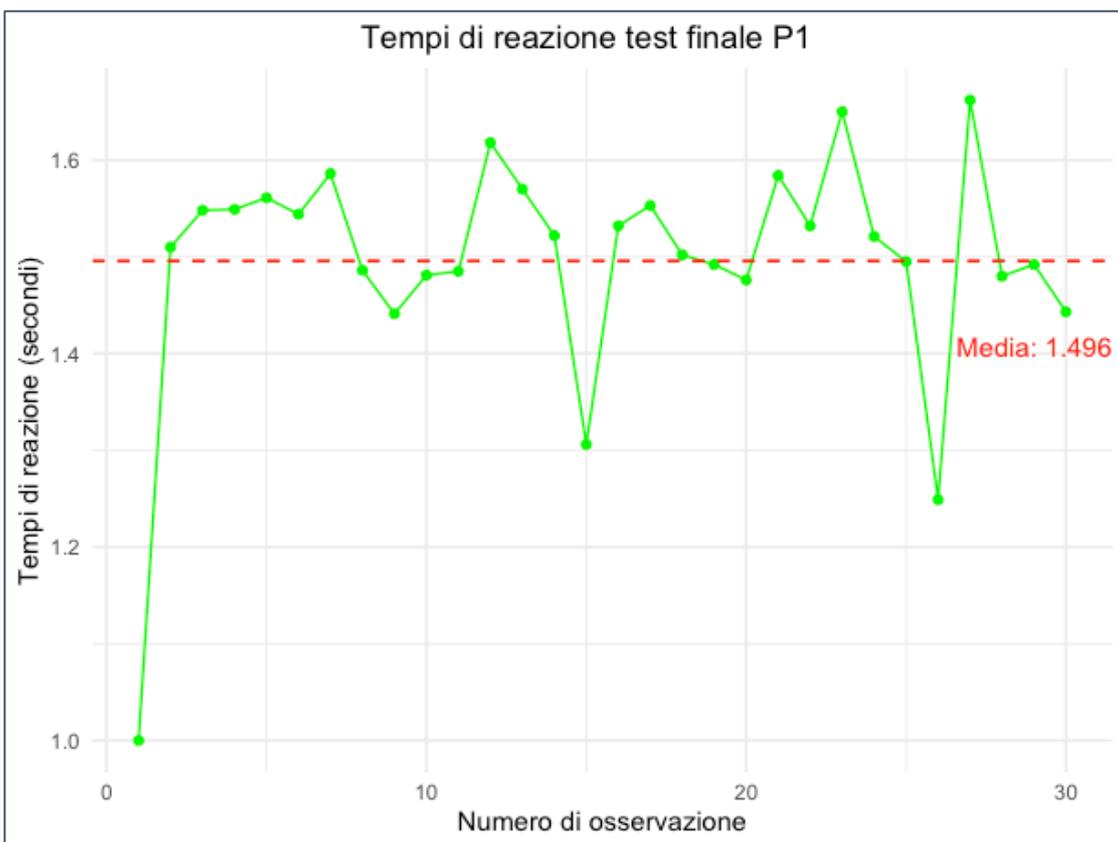


Figura 6.7 - Test uditivo finale del partecipante 1

Il partecipante 1 ha compiuto 28 assemblaggi, tutti svolti correttamente, durante la prova di 100 minuti. La Figura 6.8 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio e mostra un andamento decrescente dei tempi, a dimostrare la presenza di economie di apprendimento durante la prova che portano il partecipante 1 ad essere sempre più veloce. Nella parte finale sono visibili dei picchi in aumento nel tempo di completamento che potrebbero significare un affaticamento del partecipante.

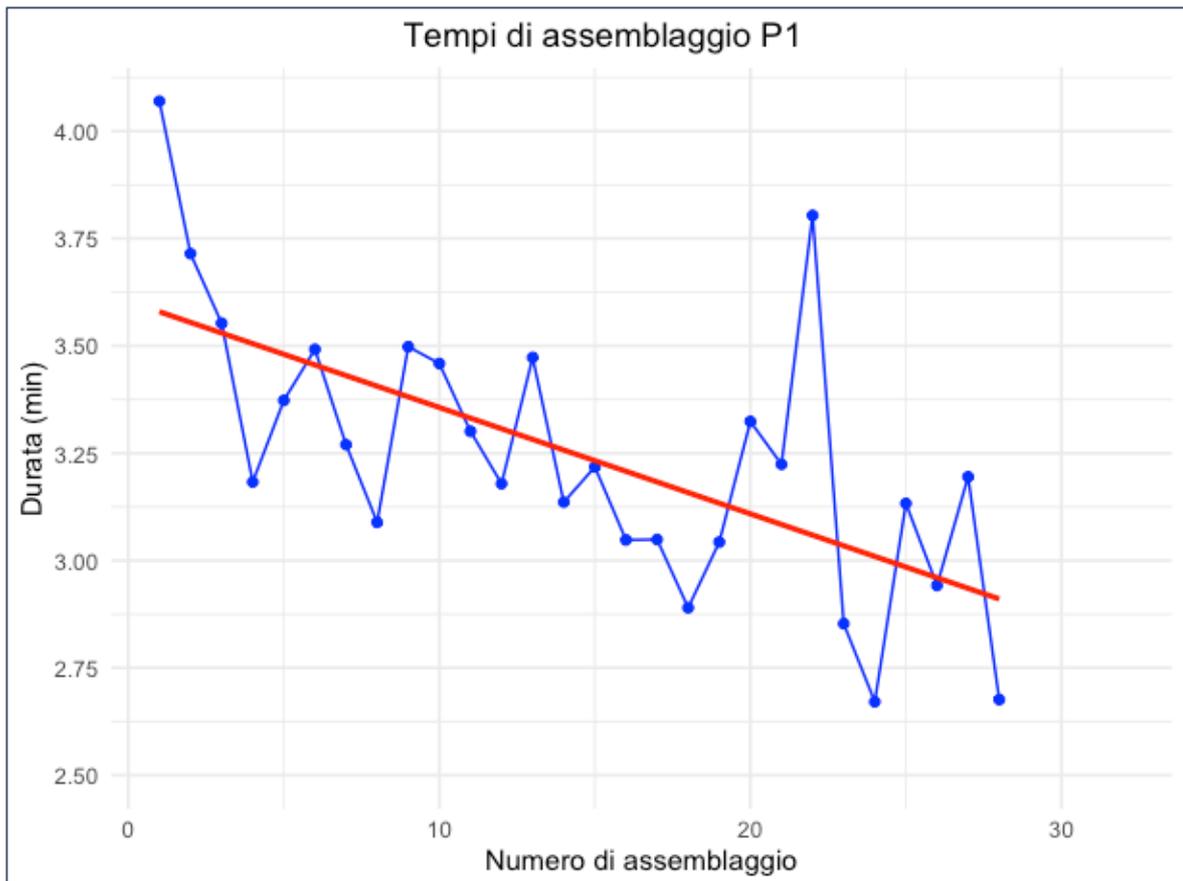


Figura 6.8 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 1

Per quanto riguarda i dati relativi alla *secondary task* registrati durante la prova, si è deciso di trattare i valori tramite una media mobile su un arco temporale fisso di 3 minuti. Questa scelta è dovuta alla volontà di allineare i diversi segnali raccolti (*secondary task*, Empatica E4 e *Eye Tracking*) considerando un multiplo comune contenente almeno 3 valori. In questo modo è possibile visualizzare dei grafici caratterizzati da andamenti più leggibili e facili da interpretare, riducendo l'effetto di picchi e fluttuazioni. La finestra temporale di 3 minuti è stata applicata per uniformità a tutti i dati raccolti e questa metodologia è stata applicata a tutti i partecipanti.

La Figura 6.9 riporta, pertanto, l'andamento dei tempi di reazione ai suoni della *secondary task*. In blu viene rappresentato il grafico relativo alla media mobile ottenuto considerando 4 valori in quanto dall'inizio della prova i suoni venivano emessi con cadenza regolare di 45 secondi (3 minuti = 180 sec = 45 sec x 4 → 4 valori da considerare in 3 minuti). In rosso, invece, si riporta la retta di regressione lineare stimata sui tempi di reazione per verificare se ci sia una tendenza crescente o decrescente e in questo caso, durante la prova, la retta fa registrare una diminuzione dei tempi e quindi delle prestazioni migliori nella parte finale della prova.

La Tabella 6.4 riporta un breve esempio di come è stata calcolata la media mobile sui primi dati del partecipante 1 per comprendere maggiormente l'applicazione di questo metodo.

Tabella 6.4 - Rappresentazione del calcolo della media mobile sui primi valori della prova: i primi tre valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 4 valori per volta

Tempo prova (secondi)	Tempo di reazione (secondi)	Media mobile (secondi)
45	2,245	NA
90	2,017	NA
135	1,910	NA
180	1,679	1,963
225	2,075	1,920
270	2,257	1,980
315	2,182	2,048
360	1,977	2,123

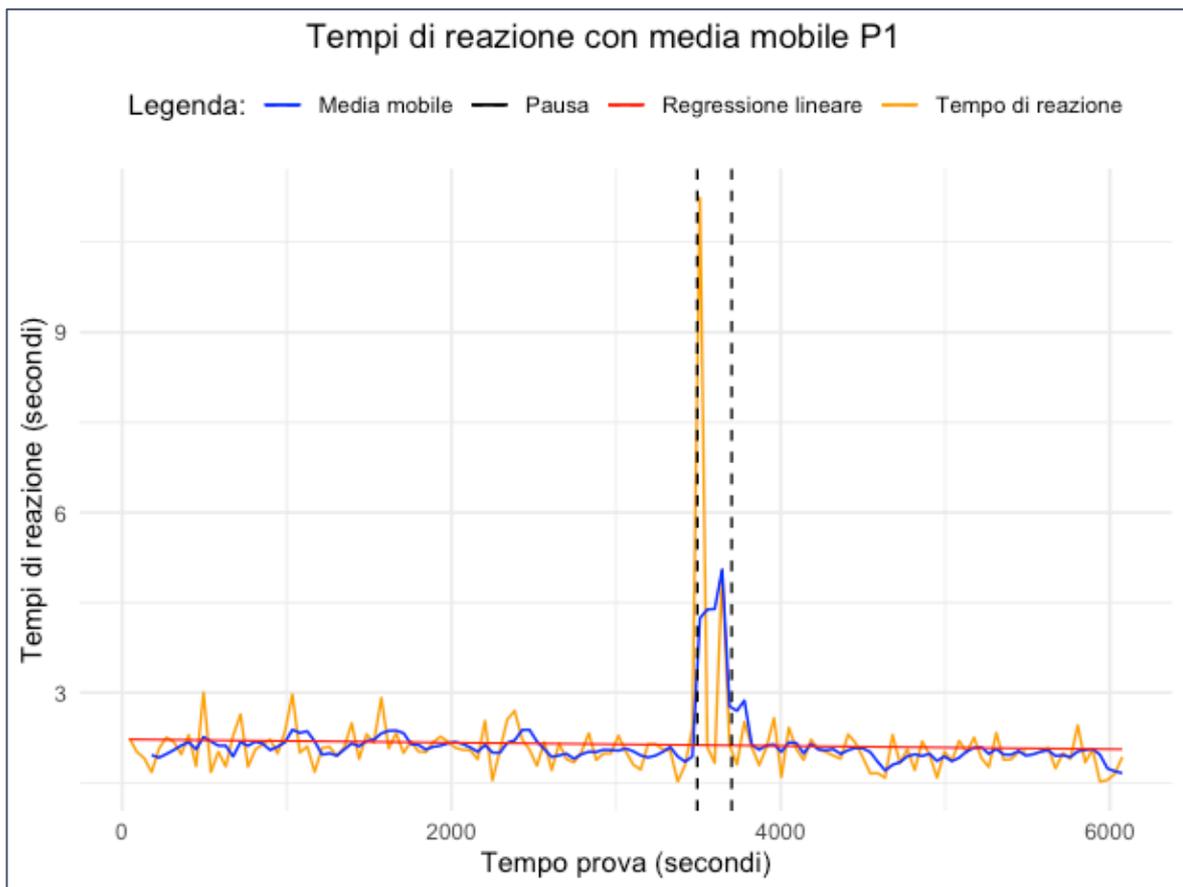


Figura 6.9 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 1

Tabella 6.5 - Prestazioni della secondary task del partecipante 1

Partecipante 1	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,143 secondi
Suoni riprodotti	134
Suoni corretti	133
Suoni mancati	1
Suoni non riconosciuti correttamente	0

Analizzando le prestazioni del partecipante 1, riportate in Tabella 6.5, risulta che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore sia rispetto al test uditivo iniziale che finale (Tabella 6.1). La ragione di ciò è comprensibile visto il carico cognitivo maggiore nel compiere due compiti contemporaneamente e il fatto di avere le mani spesso impegnate al momento della riproduzione del suono. Si può, inoltre, notare che, se durante il test iniziale e finale non vengono commessi errori, durante la prova il partecipante si dimentica di reagire ad uno dei suoni riprodotti, confermando una maggiore difficoltà nello svolgere due task in contemporanea.

Tabella 6.6 - Valutazione soggettiva del partecipante 1

Feedback del partecipante P1	
20° minuto	“Tranquillo”
40° minuto	“Annoiato, con la sensazione che il tempo tra i vari suoni diminuisca nel corso del tempo”
60° minuto	“Stanco, alienato, annoiato, lento su alcune attività, più veloce su altre”
80° minuto	“Stressato, quando si verifica il suono ed ha le mani occupate si infastidisce, più distratto, stanco mentalmente, attività monotona e inizia a sentire caldo”
100° minuto	“Sempre più fastidioso che deve fermarsi per premere il tasto corrispondente al suono sentito”
Fine prova	“Esperienza definita tediante e noiosa, si sente stanco, meno reattivo. Trova d’aiuto il braccio robotico durante l’assemblaggio e la task secondaria non invasiva. Stanco mentalmente: 7”

Nella Tabella 6.6 vengono raccolte le considerazioni del partecipante 1 riguardo alla prova affrontata. Dalle risposte emerge la consapevolezza di sentirsi più stanchi e meno reattivi alla fine della prova rispetto all’inizio, confermato anche dai valori registrati del test uditivo finale leggermente superiori a quelli iniziali. Molto rilevante è il feedback sulla task secondaria, che conferma la non invasività del compito progettato.

Prendendo in esame i dati raccolti con l’Empatica E4, si analizzano i valori relativi a *skin conductance level* (SCL), *skin conductance response* (SCR) e battito cardiaco, considerati più rilevanti e significativi.

La Figura 6.10 mostra l’andamento della *skin conductance level* (SCL) durante la prova. Il grafico in blu è stato costruito considerando una finestra mobile di 720 valori, corrispondente a 3 minuti, in quanto i valori della *skin conductance level* vengono registrati ogni quarto di secondo ($3 \text{ min} = 180 \text{ sec} = 180 \text{ sec} \times 4 = 720 \text{ quarti di sec} \rightarrow 720 \text{ valori da considerare in 3 minuti}$). Le linee tratteggiate in nero segnano il momento in cui sono state sostituite le batterie dell’*eye tracker*. In quel lasso di tempo sembra quasi che il partecipante si sia preso una pausa dalla prova e si rilassi abbassando i valori di SCL. Nel totale, si osserva un andamento crescente della SCL che dimostra uno stato di maggiore attivazione e stress.

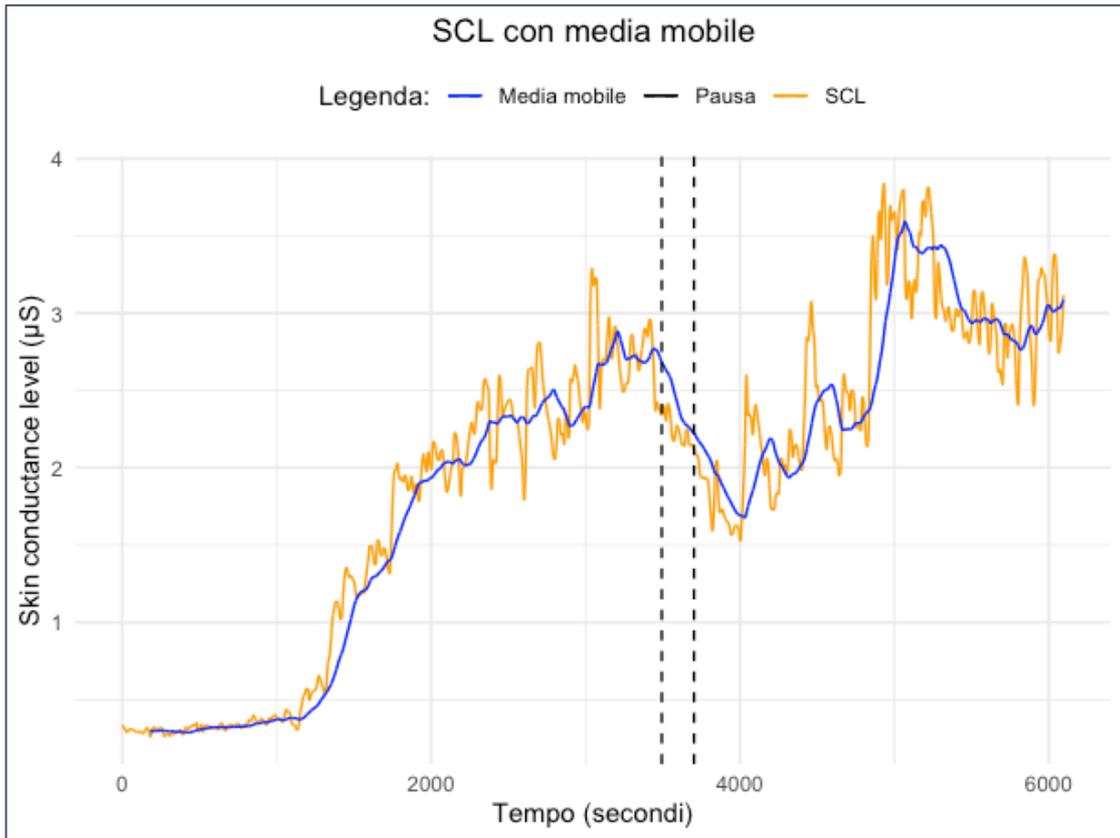


Figura 6.10 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 1

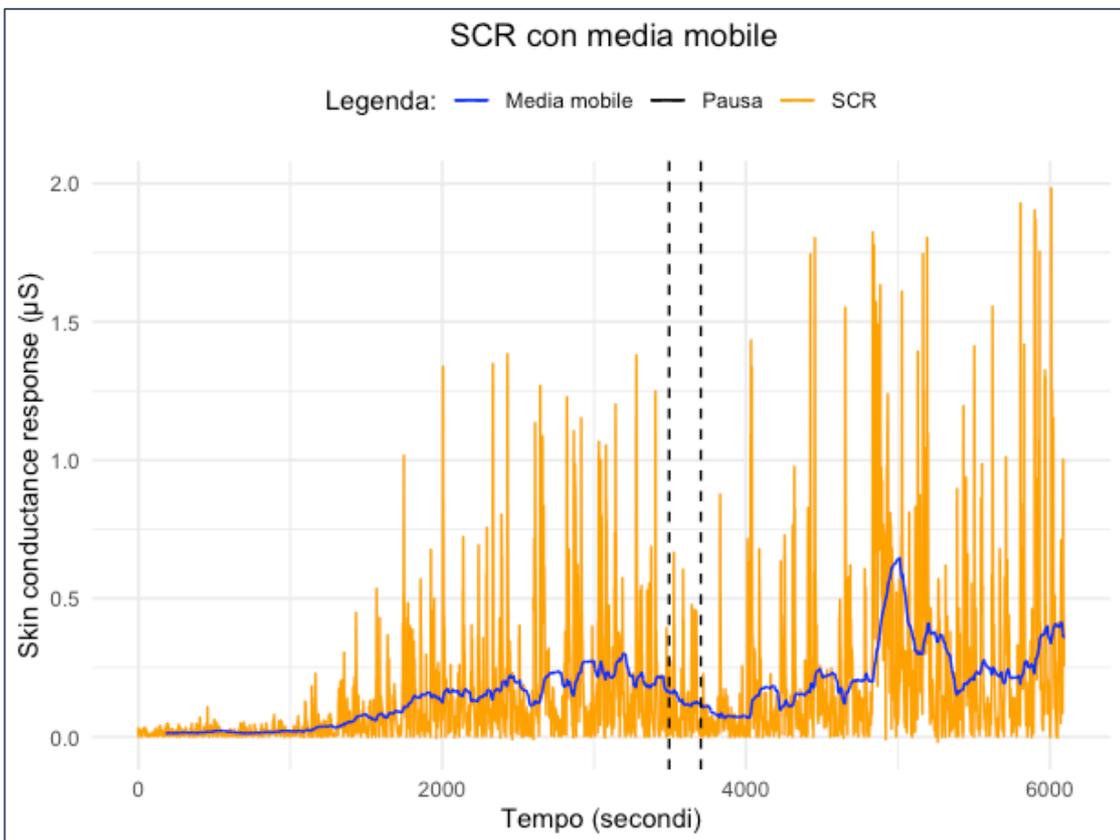


Figura 6.11 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 1

Anche la Figura 6.11, relativa alla *skin conductance response* (SCR) mostra un andamento crescente, seppure meno evidente. Nel periodo del cambio di batteria, si registra un calo dei valori della SCR.

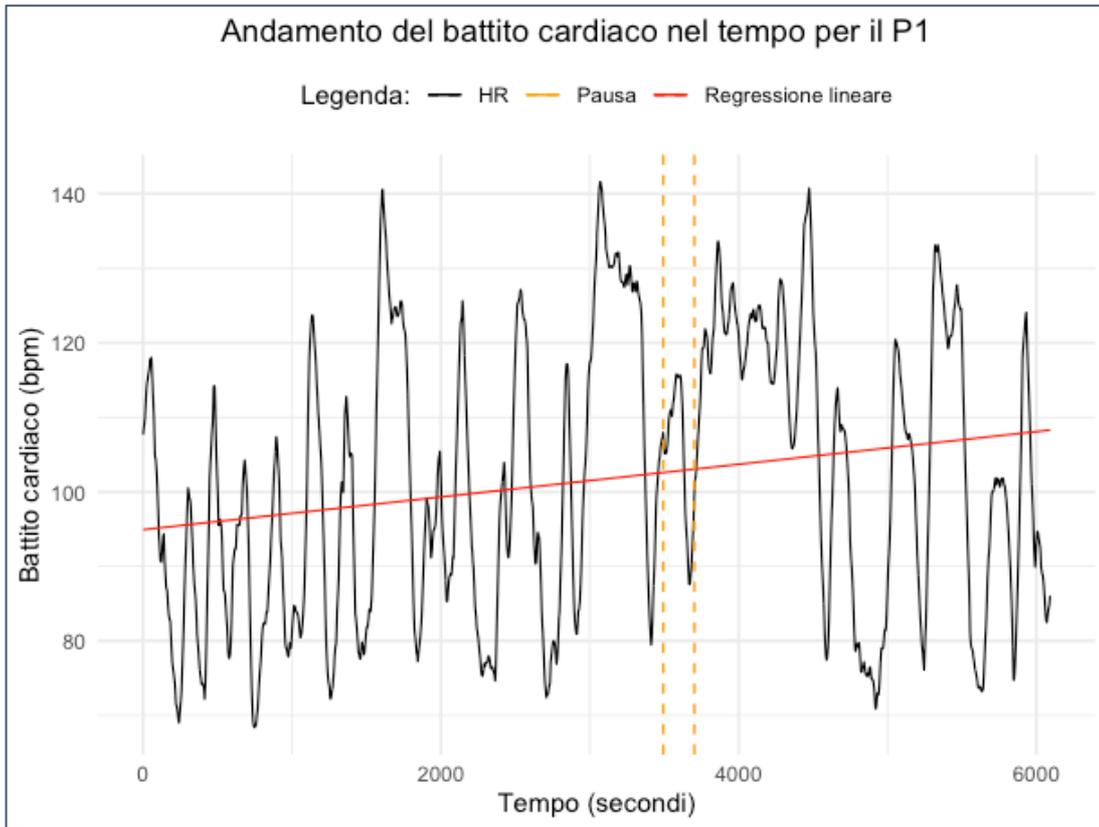


Figura 6.12 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 1

La Figura 6.12 mostra l'andamento del battito cardiaco del partecipante 1 durante la prova di assemblaggio di 100 minuti (nel grafico i dati vanno oltre i 6.000 secondi in quanto l'assemblaggio finale iniziato prima dello scadere dei 100 minuti è stato fatto portare a termine). La retta di regressione in rosso dimostra un andamento crescente del battito cardiaco, che permette di affermare che nella parte finale della prova il carico cognitivo fosse maggiore e pure lo stato di stress associato.

Continuando l'analisi con i dati ottenuti tramite l'*eye tracker*, è possibile rappresentare le metriche di *Number of whole fixation starts*, *Average whole fixation pupil diameter*, *Number_of_saccade_starts*. Le metriche sono ridotte per il motivo precedentemente descritto, ovvero che si è preferito seguire un approccio in cui i dati relativi alle tre metriche fossero rilevati ogni 30 secondi per avere dati più affidabili, invece di avere un singolo valore per più metriche. Il numero di fissazioni (Figura 6.13), come il numero di saccadi (Figura

6.14), presenta un andamento crescente, che suggerisce un aumento del carico cognitivo con l'avanzamento della prova. In blu viene rappresentato il grafico relativo alla media mobile ottenuto considerando 6 valori in quanto dall'inizio della prova i parametri venivano registrati con cadenza regolare di 30 secondi (3 minuti = 180 sec = 30 sec x 6 → 6 valori da considerare in 3 minuti). Nel periodo di cambio batteria, è visibile il vuoto di dati dovuto allo spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3. Il diametro pupillare medio (Figura 6.15) presenta, invece, un andamento lievemente decrescente con il tempo, probabilmente a causa dell'affaticamento che aumenta nella parte finale della prova e provoca un effetto a lungo termine di riduzione della pupilla. Va, anche, ricordato che il diametro pupillare è molto sensibile a fattori ambientali e fisiologici soggettivi e non sempre è semplice capire le vere cause delle variazioni del diametro.

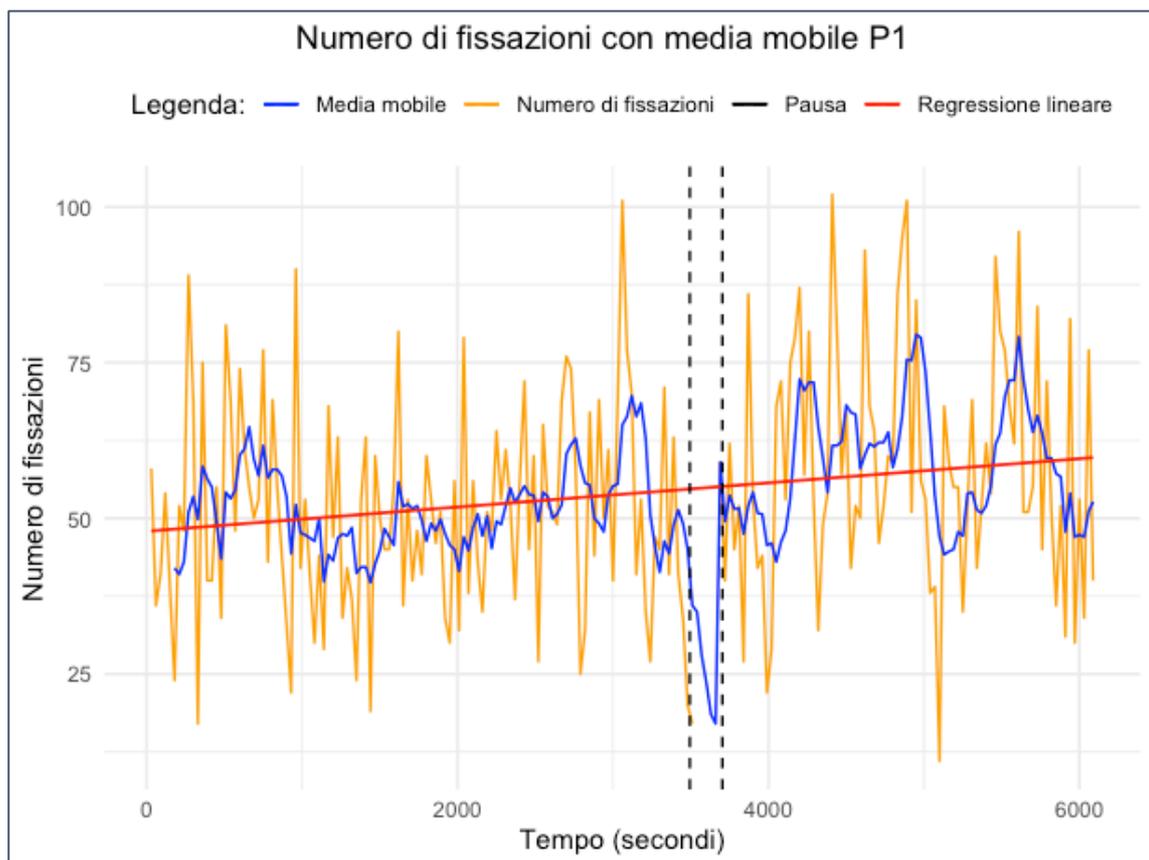


Figura 6.13 - Numero di fissazioni del partecipante 1

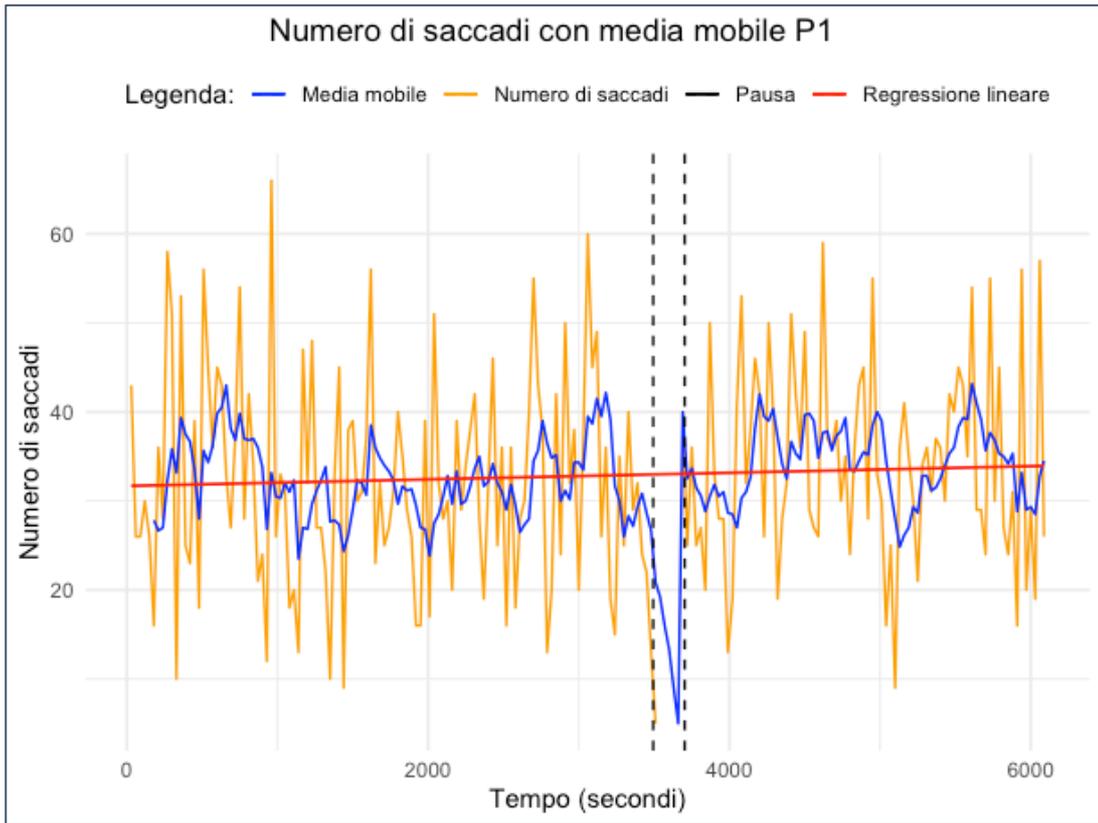


Figura 6.14 - Numero di saccadi del partecipante 1

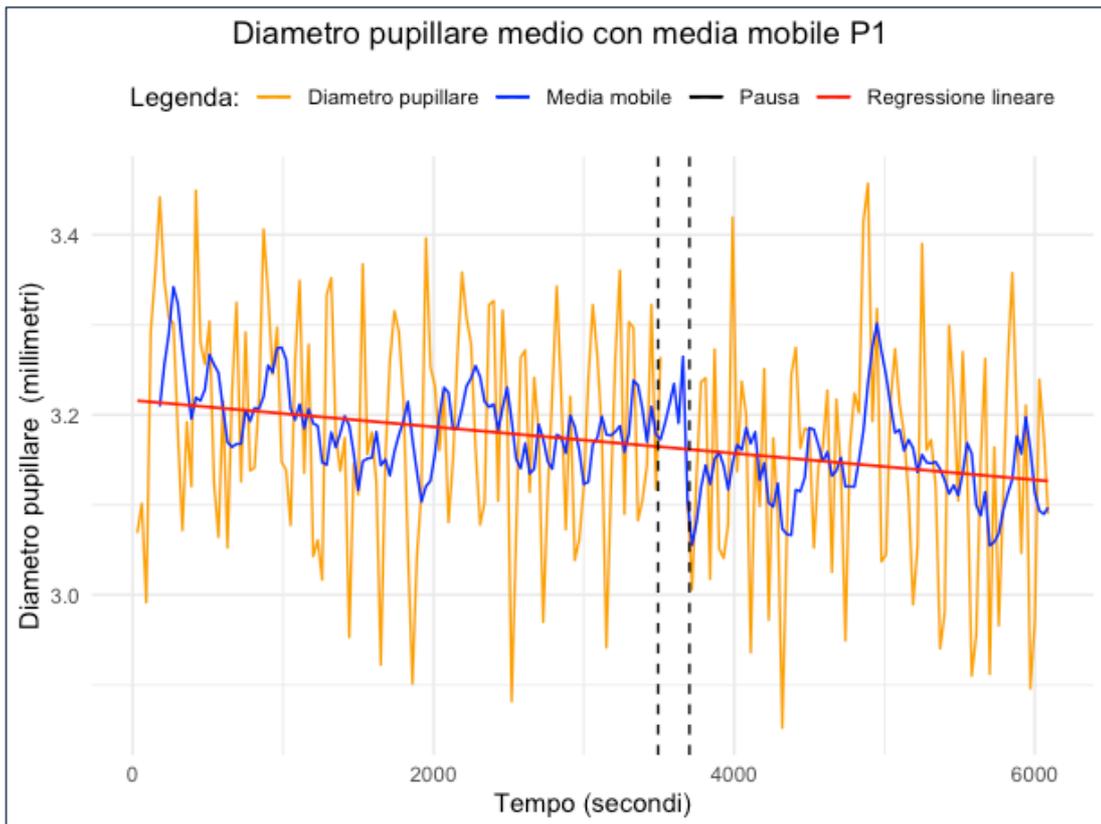


Figura 6.15 - Diametro pupillare medio del partecipante 1

6.2 Partecipante 2

Si riportano alcune caratteristiche identificative del secondo partecipante.

Partecipante 2	Sesso	Età	Professione
	M	24 anni	Studente

Le Figure 6.16 e 6.17 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti. Sono rappresentati insieme al valore medio di ciascuna prova. In questo caso, se durante il test uditivo iniziale i tempi di reazione assumono valori compresi tra 1.8 e 2.6, si può notare che nel test uditivo finale ci sia un andamento decrescente dei tempi di risposta, come se il partecipante durante la prova si fosse abituato a riconoscere facilmente i suoni e una volta liberato dallo svolgere il compito di assemblaggio fosse sempre più veloce.

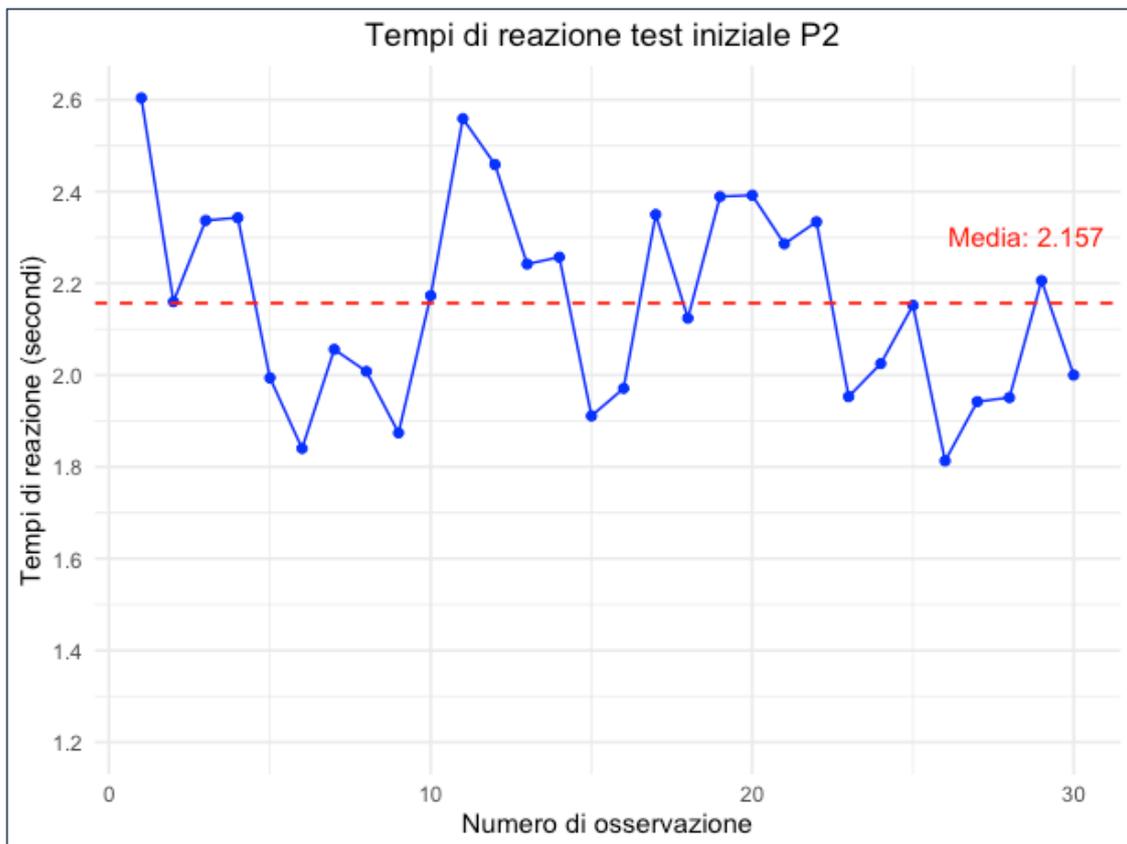


Figura 6.16 - Test uditivo iniziale del partecipante 2

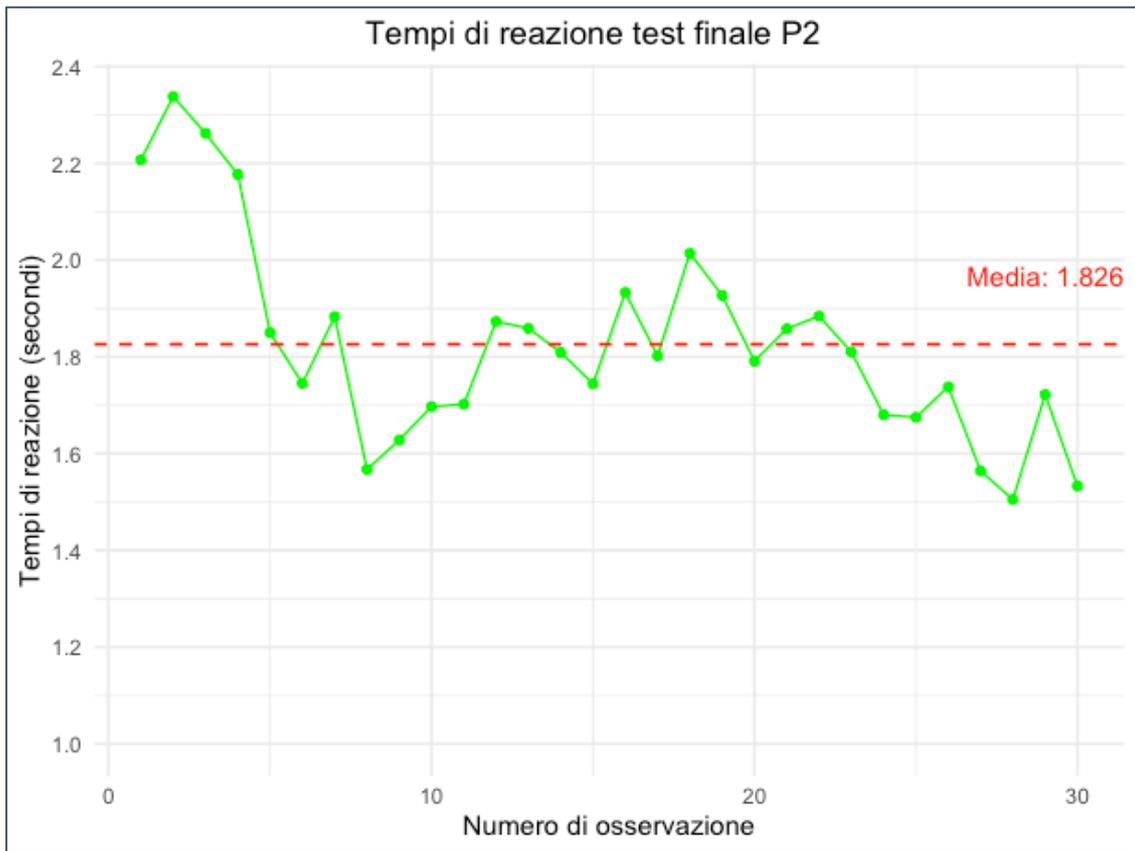


Figura 6.17 - Test uditivo finale del partecipante 2

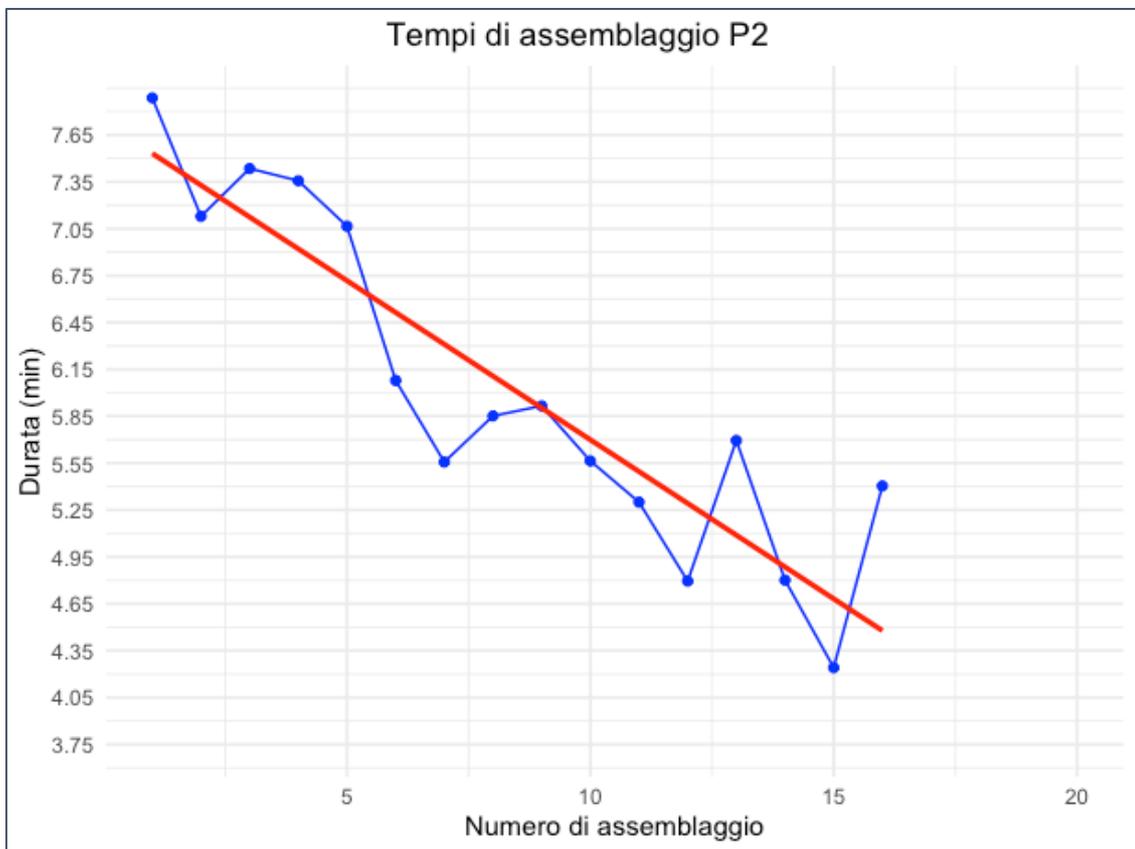


Figura 6.18 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 2

Il partecipante 2 ha compiuto 16 assemblaggi, tutti svolti correttamente, durante la prova di 100 minuti. La Figura 6.18 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio e mostra un andamento complessivo decrescente dei tempi, a dimostrare la presenza di economie di apprendimento durante la parte centrale della prova che portano il partecipante 2 ad essere sempre più veloce. Tuttavia, dall'assemblaggio numero 12 in poi, si registrano due picchi nella durata di assemblaggio che possono essere associati ad un rallentamento dovuto all'affaticamento e carico cognitivo maggiore.

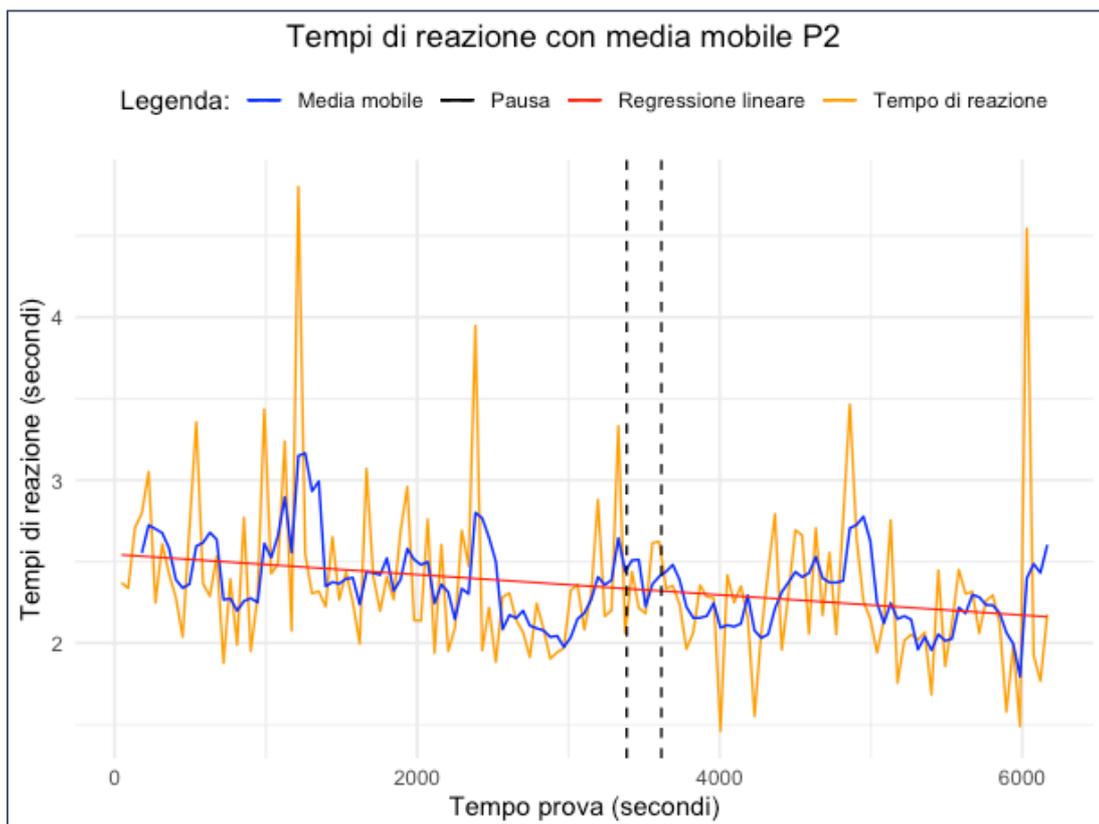


Figura 6.19 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 2

La Figura 6.19 riporta l'andamento dei tempi di reazione ai suoni della *secondary task*. Il grafico in blu attenua le fluttuazioni dei valori registrati, basandosi su una media mobile calcolata su 3 minuti. La retta di regressione in rosso è decrescente, registrando una diminuzione dei tempi e quindi delle prestazioni migliori nella parte finale della prova.

Tabella 6.7 - Prestazioni della secondary task del partecipante 2

Partecipante 2	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,352 secondi
Suoni riprodotti	137
Suoni corretti	136
Suoni mancati	1
Suoni non riconosciuti correttamente	0

Analizzando le prestazioni del partecipante 2, riportate in Tabella 6.7, risulta che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore anche per questo partecipante (Tabella 6.1). Si può notare che durante il test iniziale e finale non vengono commessi errori, mentre nel corso della prova il partecipante si dimentica di reagire ad uno dei suoni riprodotti, dimostrando ancora una maggiore difficoltà nello svolgere due task contemporaneamente.

Tabella 6.8 - Valutazione soggettiva del partecipante 2

Feedback del partecipante P2	
20° minuto	“Tranquillo, è frustrante quando il tappo della pompa non si incastra con il blocco motore o si sbaglia la sequenza di assemblaggio”
40° minuto	“Annoiato, compito ripetitivo ma non è stanco”
60° minuto	“Compito troppo monotono, si sente annoiato. È più veloce in alcuni passaggi perché ha compreso l’assemblaggio, ma più lento in altri perché annoiato”
80° minuto	“Stressato, frustrato, avverte un fastidio al braccio”
100° minuto	“Stanco mentalmente e fisicamente, vorrebbe smettere, si sente stressato”
Fine prova	“Esperienza definita lunga, frustrante e noiosa. Durante la prova, cerca qualcosa per distrarsi e rendere ogni assemblaggio diverso, magari facendosi portare i pezzi dal Cobot mentre che sta già facendo un’altra attività. Si sente mentalmente stanco, fisicamente non troppo. La task secondaria non è fastidiosa, né invasiva, si è abituato alla presenza dopo qualche assemblaggio. Stanco mentalmente: 7”

Nella Tabella 6.8 sono raccolte le considerazioni del partecipante 2 rispetto alla prova. Dalle risposte emerge la consapevolezza di sentirsi più stanchi mentalmente alla fine della prova rispetto all’inizio. Anche il partecipante 2 riconosce la non invasività della task secondaria che risulta fastidiosa solo nel momento in cui le mani sono impegnate.

Vengono successivamente esaminati i dati raccolti con l'Empatica E4, analizzando SCL, SCR e il battito cardiaco del partecipante. La Figura 6.20 mostra l'andamento della *skin conductance level* (SCL) durante la prova. Il grafico in blu è stato costruito considerando sempre una finestra di 3 minuti, di cui si riporta una parte di calcolo in Tabella 6.9, e presenta un andamento altalenante, causato da diversi stimoli interni ed esterni. Nel tempo di cambio delle batterie sembra che il partecipante si rilassi abbassando i valori di SCL, così come nella parte finale della prova.

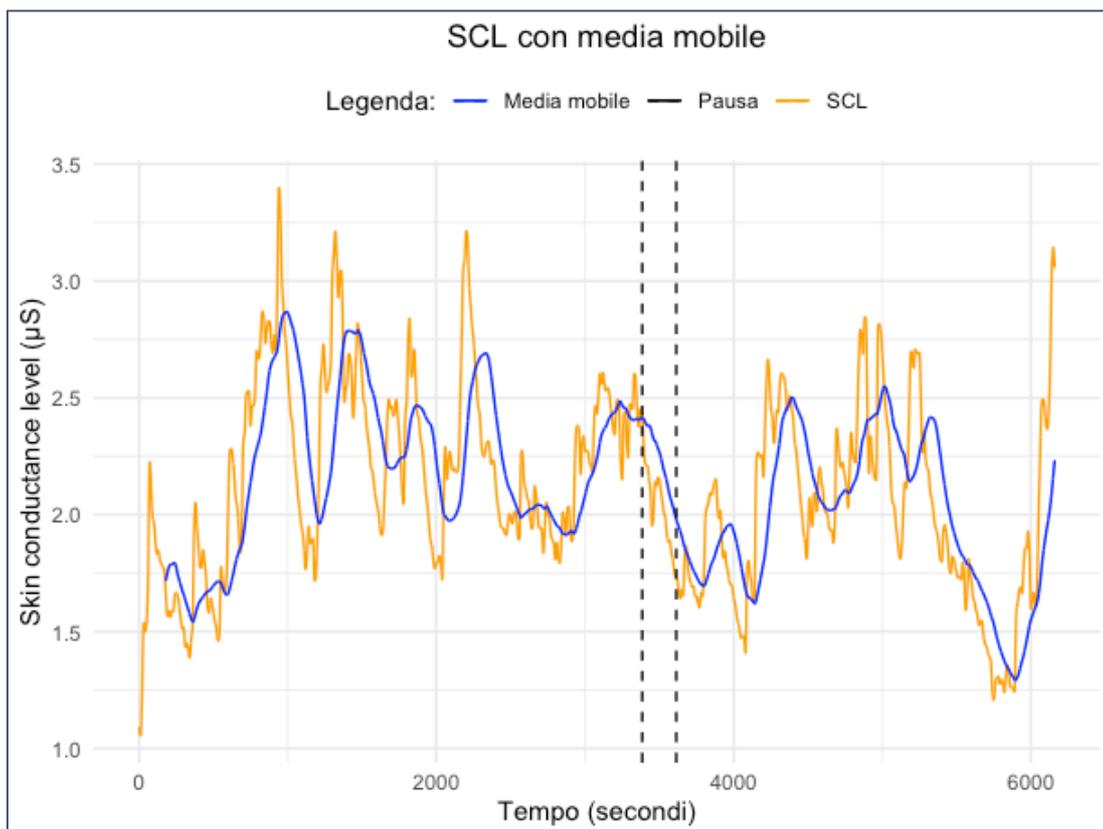


Figura 6.20 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 2

Tabella 6.9 - Rappresentazione del calcolo della media mobile su alcuni valori della prova: i primi due valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 720 valori per volta e il primo disponibile corrisponde ai 179,75 sec (ossia il 720-esimo valore contando lo 0)

Tempo prova (secondi)	SCL (μS)	Media mobile (μS)
179.25	1,723	NA
179.50	1,720	NA
179.75	1,714	1,7167
180.00	1,702	1,718
180.25	1,685	1,719
180.50	1,674	1,719
180.75	1,674	1,720
181.00	1,680	1,721

Anche la Figura 6.21, relativa alla SCR mostra un andamento fluttuante, con un calo dei valori durante la pausa e un picco nella parte finale della prova.

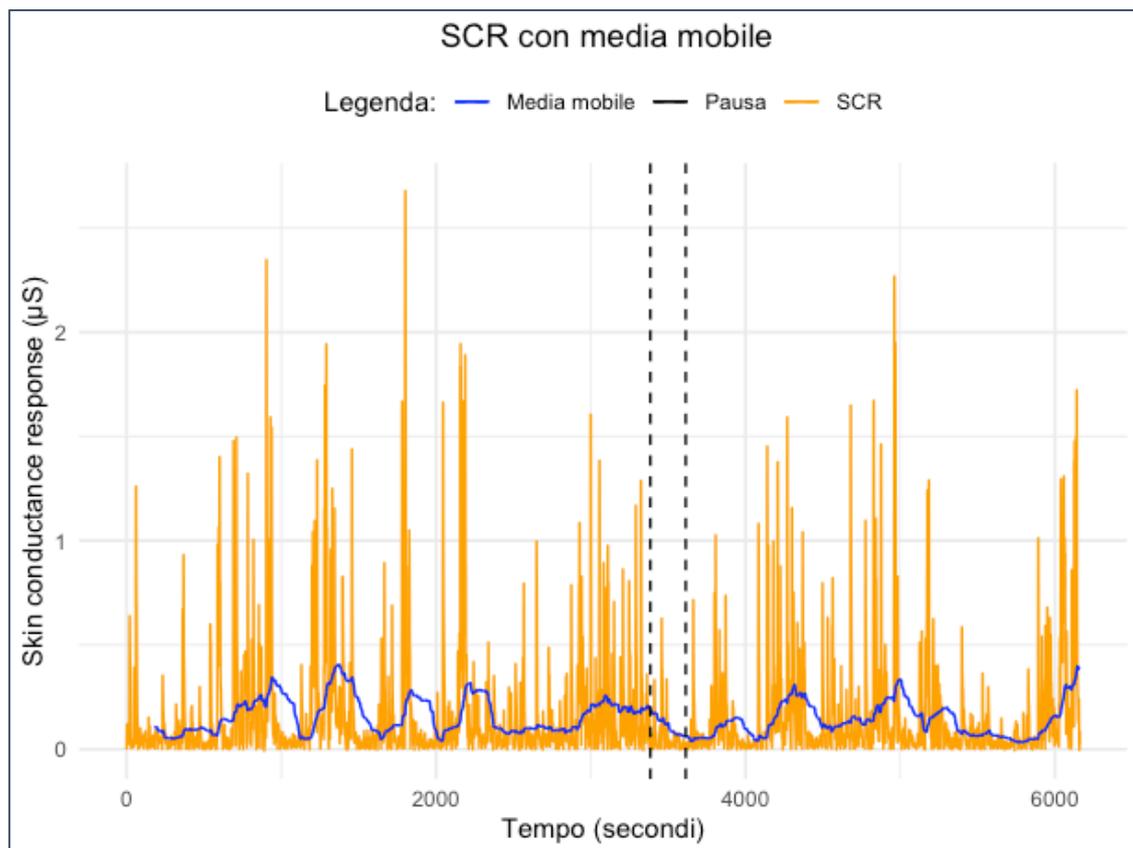


Figura 6.21 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 2

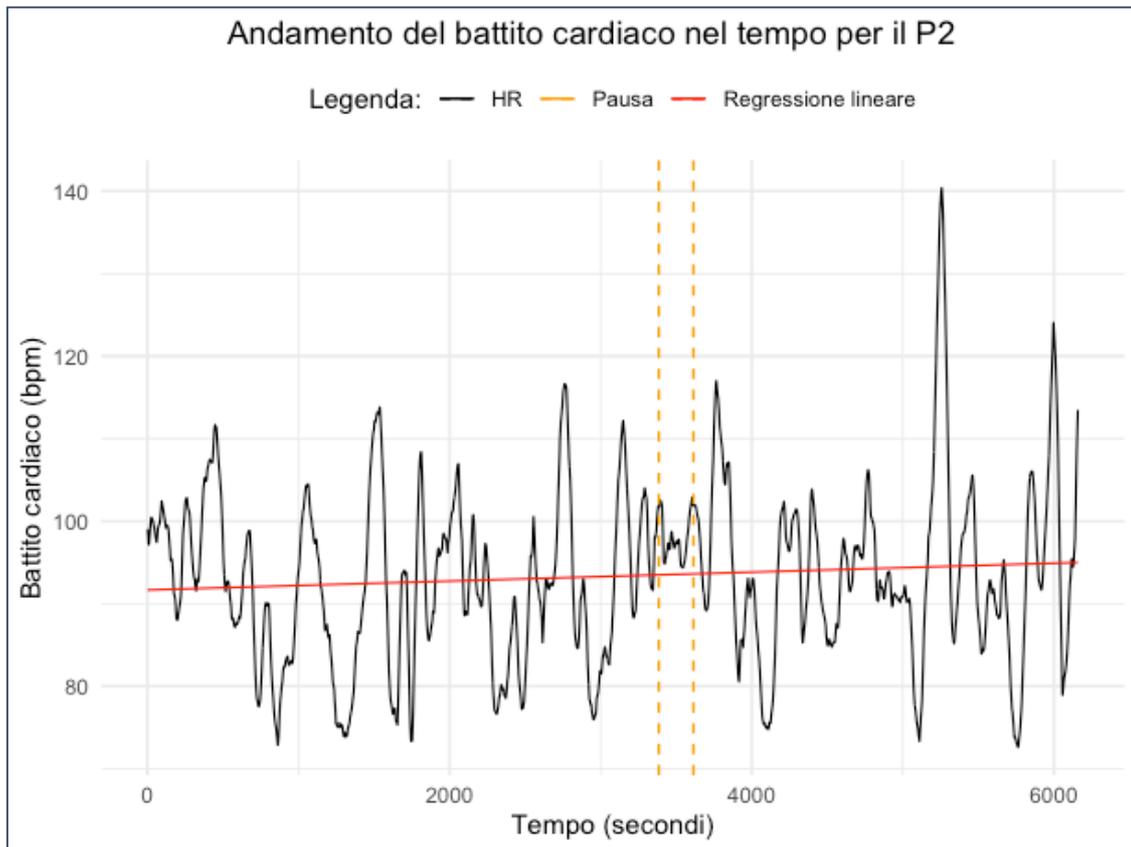


Figura 6.22 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 2

La Figura 6.22 mostra l'andamento del battito cardiaco del partecipante 2 durante la prova di assemblaggio di 100 minuti. La retta di regressione in rosso dimostra un lieve andamento crescente del battito cardiaco, che permette di affermare la presenza di un carico cognitivo maggiore nella parte finale della prova.

Dall'analisi dei dati ottenuti tramite l'*eye tracker*, è possibile rappresentare le metriche di *Number of whole fixation starts*, *Average whole fixation pupil diameter*, *Number of saccade starts*. Il numero di fissazioni (Figura 6.23), come il numero di saccadi (Figura 6.24), presenta un andamento crescente che fa ritenere un aumento del carico cognitivo con l'avanzamento della prova. Nel periodo di cambio batteria, è visibile il vuoto di dati dovuto allo spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3. Il diametro pupillare medio (Figura 6.25) presenta, invece, un andamento piatto nel tempo, influenzato anche da fattori ambientali e fisiologici.

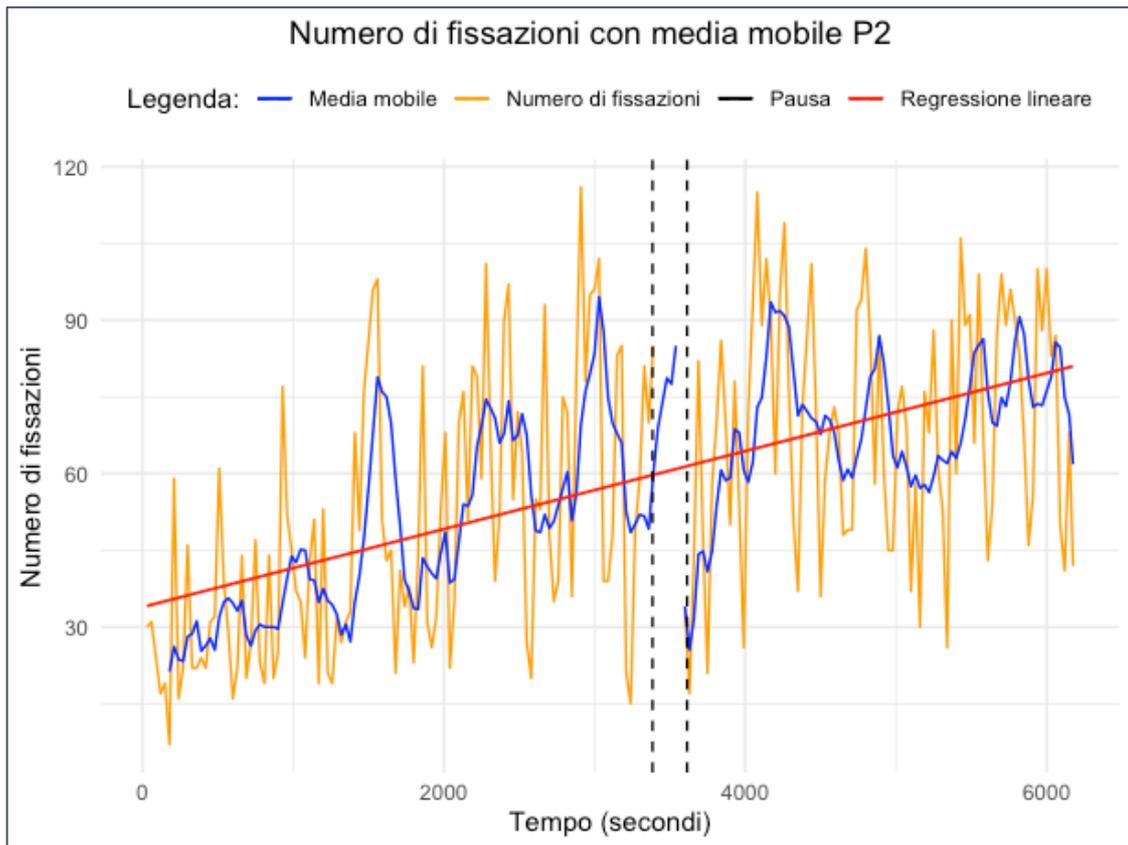


Figura 6.23 - Numero di fissazioni del partecipante 2

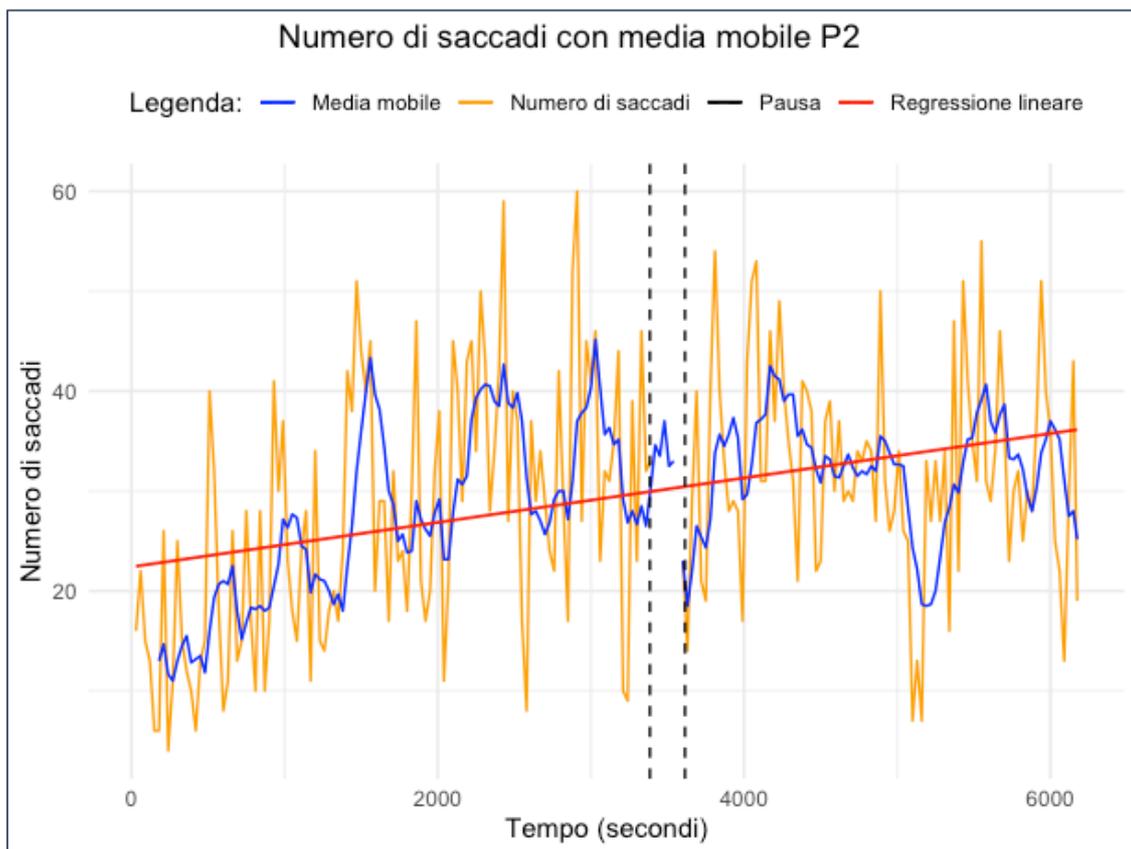


Figura 6.24 - Numero di saccadi del partecipante 2

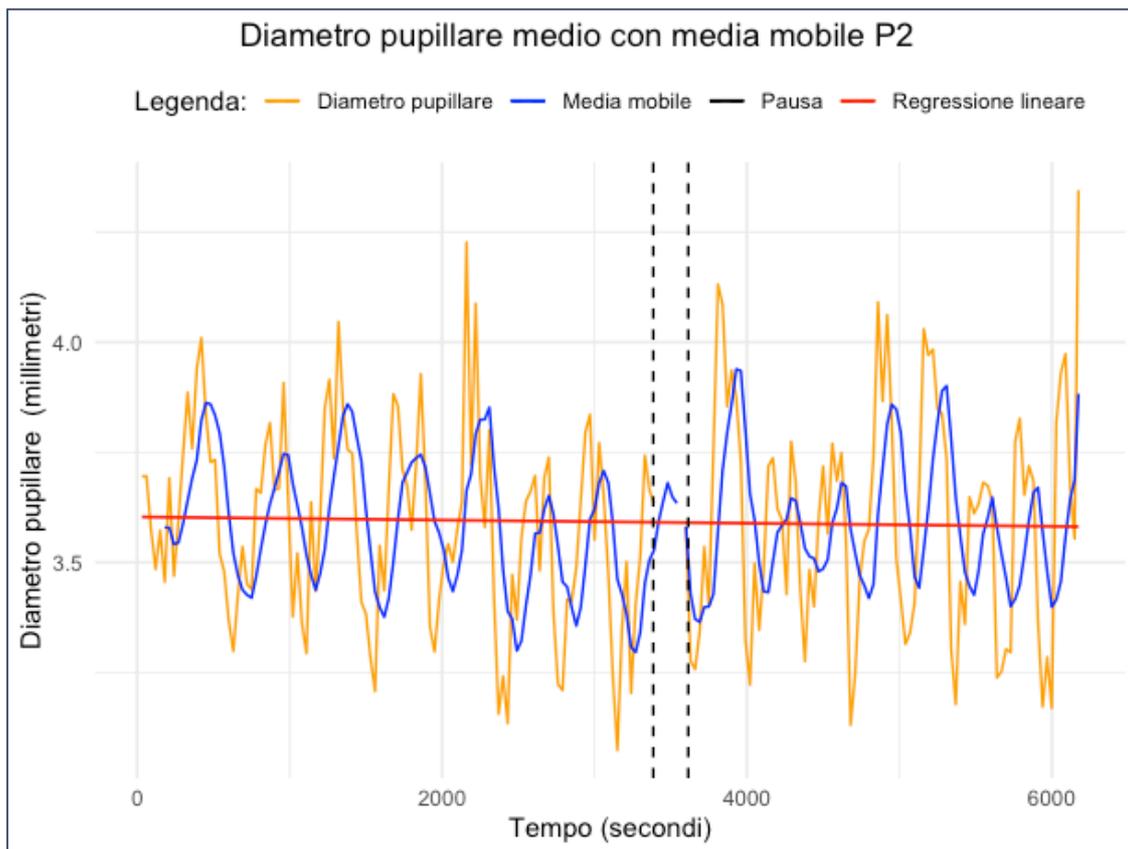


Figura 6.25 - Diametro pupillare medio del partecipante 2

6.3 Partecipante 3

Per svolgere l'analisi del terzo partecipante si riportano alcune caratteristiche identificative.

Partecipante 3	Sesso	Età	Professione
	F	23 anni	Studentessa

Le Figure 6.26 e 6.27 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti, con il relativo valore medio. In questo caso, se durante il test uditivo iniziale i tempi di reazione assumono una tendenza decrescente, si può osservare che nel test uditivo finale ci sia un andamento abbastanza piatto dei tempi di risposta, con un valore medio minore rispetto all'inizio, che sta ad indicare la maggiore familiarità ai suoni. Tuttavia, nel test uditivo finale, un suono non è stato riconosciuto dal partecipante, probabilmente a causa della maggiore stanchezza dopo la prova.

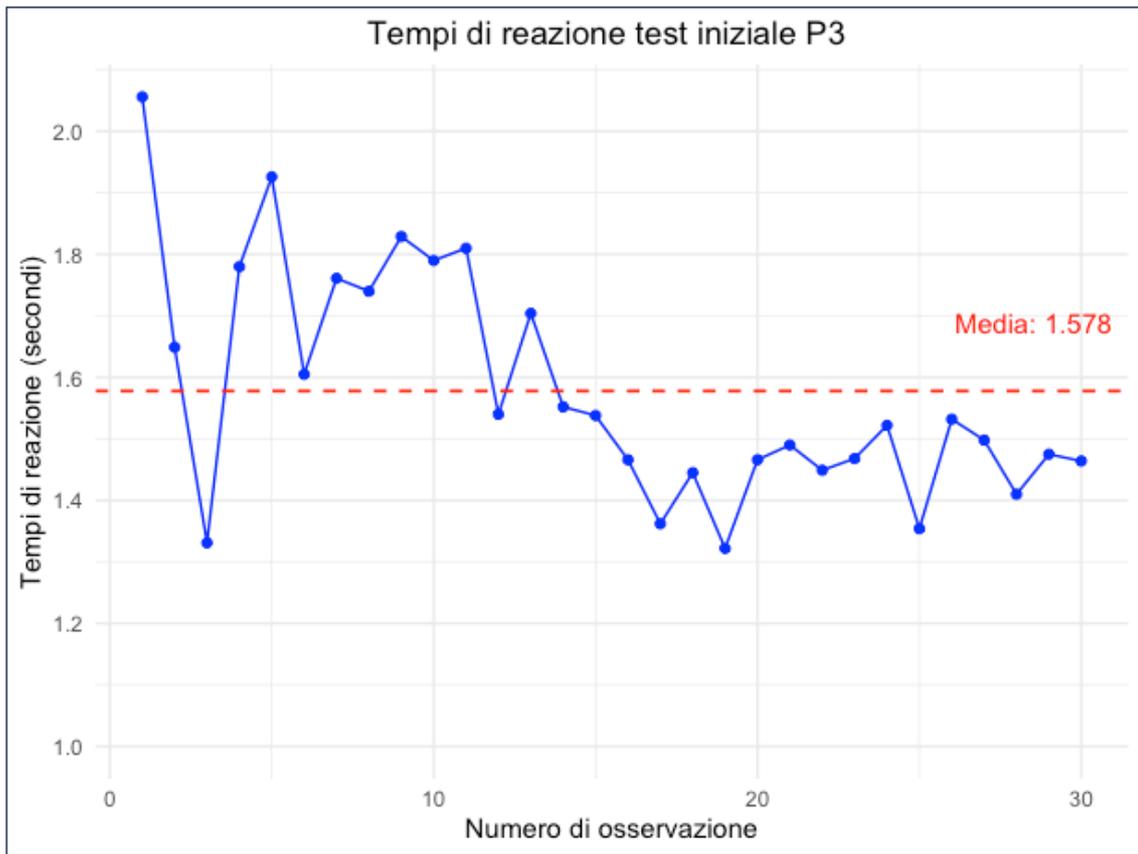


Figura 6.26 - Test uditivo iniziale del partecipante 3

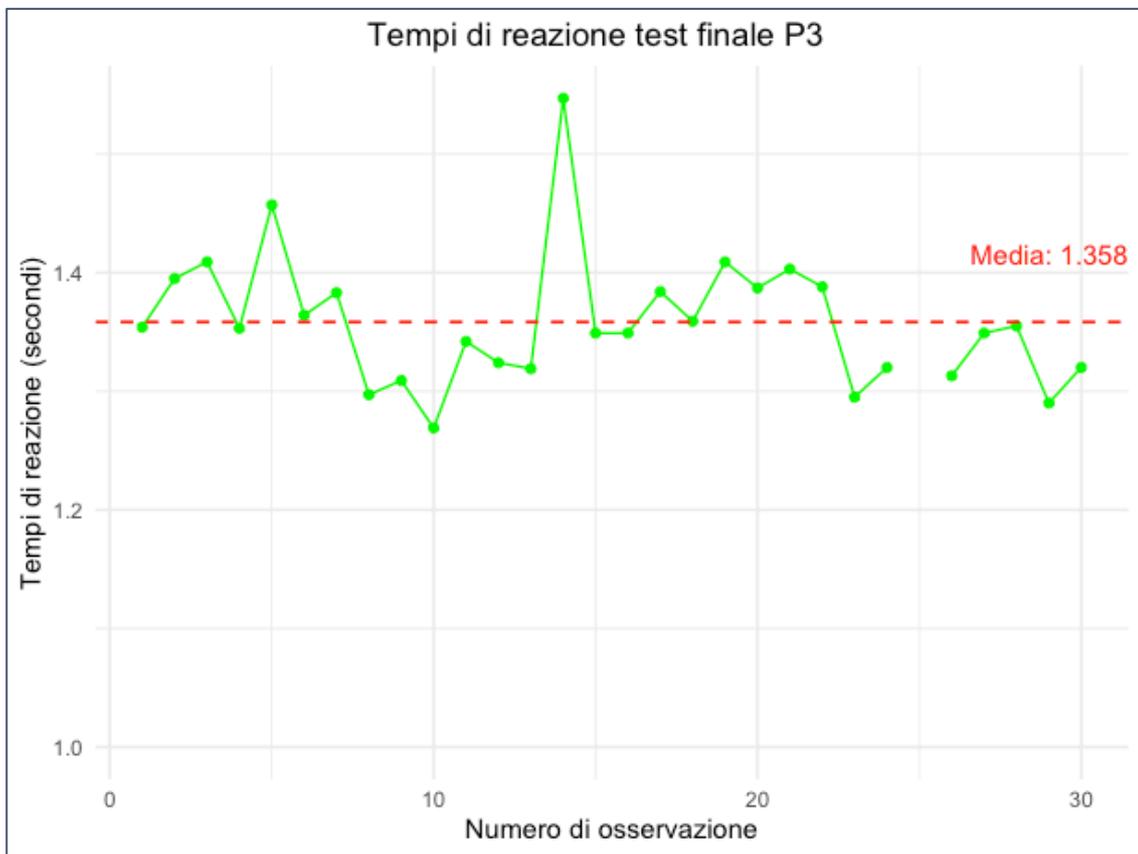


Figura 6.27 - Test uditivo finale del partecipante 3

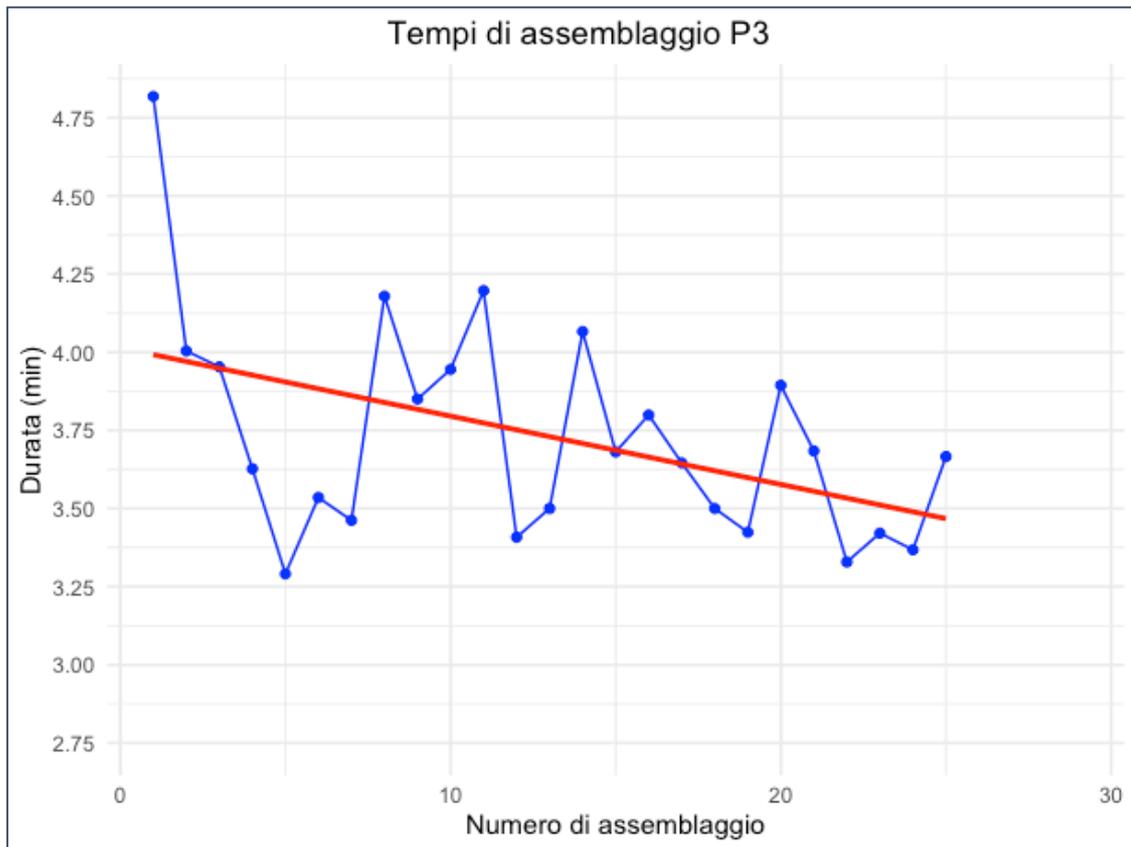


Figura 6.28 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 3

Il partecipante 3 ha compiuto 25 assemblaggi, svolti correttamente tranne uno. La Figura 6.28 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio e mostra un andamento decrescente dei tempi, a conferma di economie di apprendimento durante la prova che portano il partecipante 3 ad essere sempre più veloce. Tempi più lunghi sono spesso dovuti all'ultima fase di assemblaggio della pompa che prevede l'inserimento del tappo della membrana nel blocco motore.

La Figura 6.29 riporta l'andamento dei tempi di reazione ai suoni della *secondary task*. Anche in questo caso la media mobile è calcolata su 3 minuti e la retta di regressione in rosso è decrescente, registrando una diminuzione dei tempi e quindi delle prestazioni migliori nella parte finale della prova per il partecipante 3.

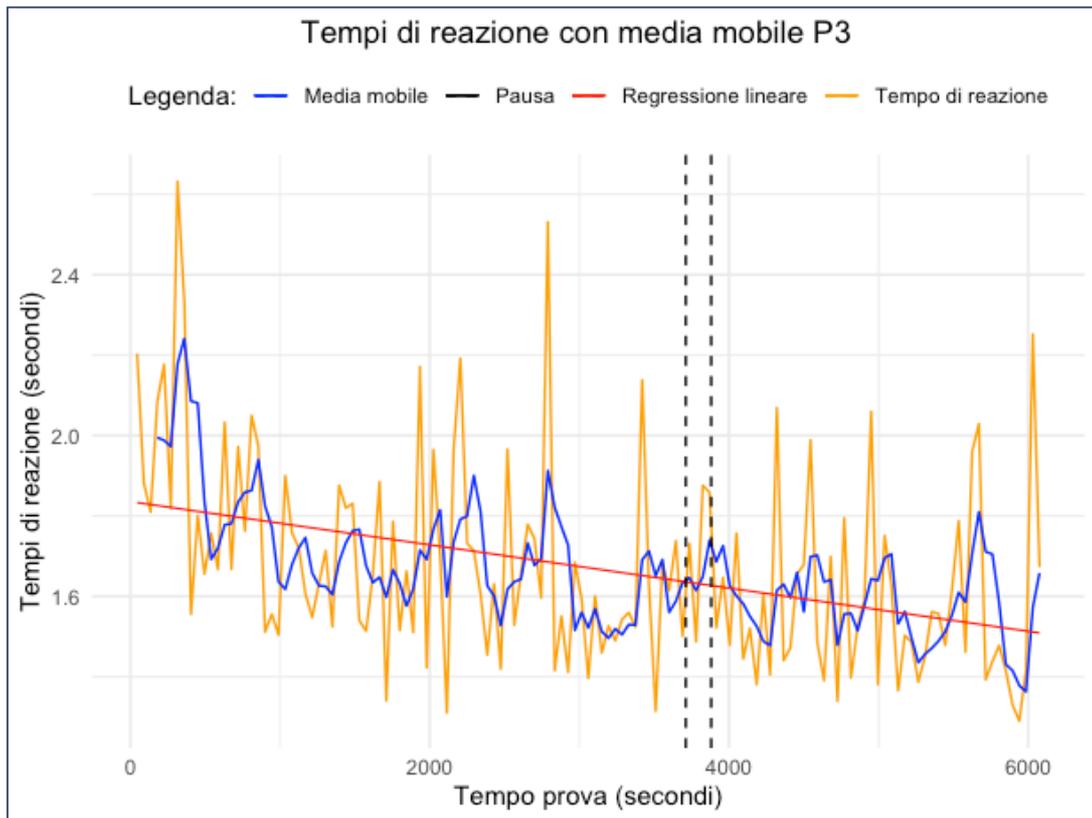


Figura 6.29 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 3

Nella Tabella 6.10 sono riportate le prestazioni del partecipante 3, da cui risulta che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore anche per questo partecipante, nonostante sia molto vicino ai valori del test uditivo iniziale e finale (Tabella 6.1). Si può notare, inoltre, che durante la prova il partecipante non commette alcun tipo di errore nel riconoscere i suoni, dimostrando una buona gestione del carico cognitivo per tutta la durata dell'esperimento.

Tabella 6.10 - Prestazioni della secondary task del partecipante 3

Partecipante 3	
Media dei tempi di reazione durante la prova	1,671 secondi
Suoni riprodotti	135
Suoni corretti	135
Suoni mancati	0
Suoni non riconosciuti correttamente	0

Nella Tabella 6.11 sono raccolte le considerazioni del partecipante 3 rispetto alla prova. Dalle risposte si rileva una sensazione di fatica e stanchezza iniziale, per poi abituarsi alla prova e trovare quasi piacere nello svolgerla. Anche il partecipante 3 ha ritenuto che la task secondaria non sia invasiva, nonostante la ripetizione continua degli stessi suoni possa provocare una sensazione di disorientamento.

Tabella 6.11 - Valutazione soggettiva del partecipante 3

Feedback del partecipante P3	
20° minuto	“Si trova bene ed è tranquillo”
40° minuto	“Si sente un po’ spossato perché è un compito molto manuale e le fanno male gli occhi”
60° minuto	“Compito troppo monotono, si sente un po’ annoiato. È più veloce in alcuni passaggi perché ha compreso l’assemblaggio, ma più lento in altri perché annoiato”
80° minuto	“Non si sente troppo stanco, ma è infastidito che l’ultima fase di inserimento del tappo della membrana nel blocco motore non riesca al primo colpo”
100° minuto	“Compito non troppo pesante, ha trovato il suo ritmo e si sta quasi divertendo”
Fine prova	“Alla fine, si sentiva più sicuro dell’inizio, aveva imparato il processo e velocizzato i passaggi, mentre inizialmente faceva fatica. Non si sente troppo stanco fisicamente. Avverte che l’udito sia un po’ distorto per aver indossato due ore la cuffietta con i suoni. Esperienza definita intrigante, stimolante, cercava come assemblare sempre più velocemente. Task secondaria non fastidiosa, solo delle volte il suono si verificava inaspettatamente durante la prova. Stanco mentalmente: 7”

Si procede nell’analisi valutando i grafici di SCL e SCR (Figure 6.30 e 6.31). I due parametri presentano andamenti simili: sono inizialmente crescenti a testimoniare una maggiore attivazione del sistema nervoso associabile ad un maggior carico cognitivo che si risolve nella parte finale della prova in cui si nota un rilassamento della persona. Anche poco prima della pausa, circa dopo mezz’ora dall’inizio, risulta un calo nei valori, che testimonia la capacità del partecipante di abituarsi alla prova. Durante la pausa i valori continuano a diminuire, per poi rialzarsi al momento della ripresa della prova, in cui si ritorna ad essere soggetti ad un maggior carico cognitivo.

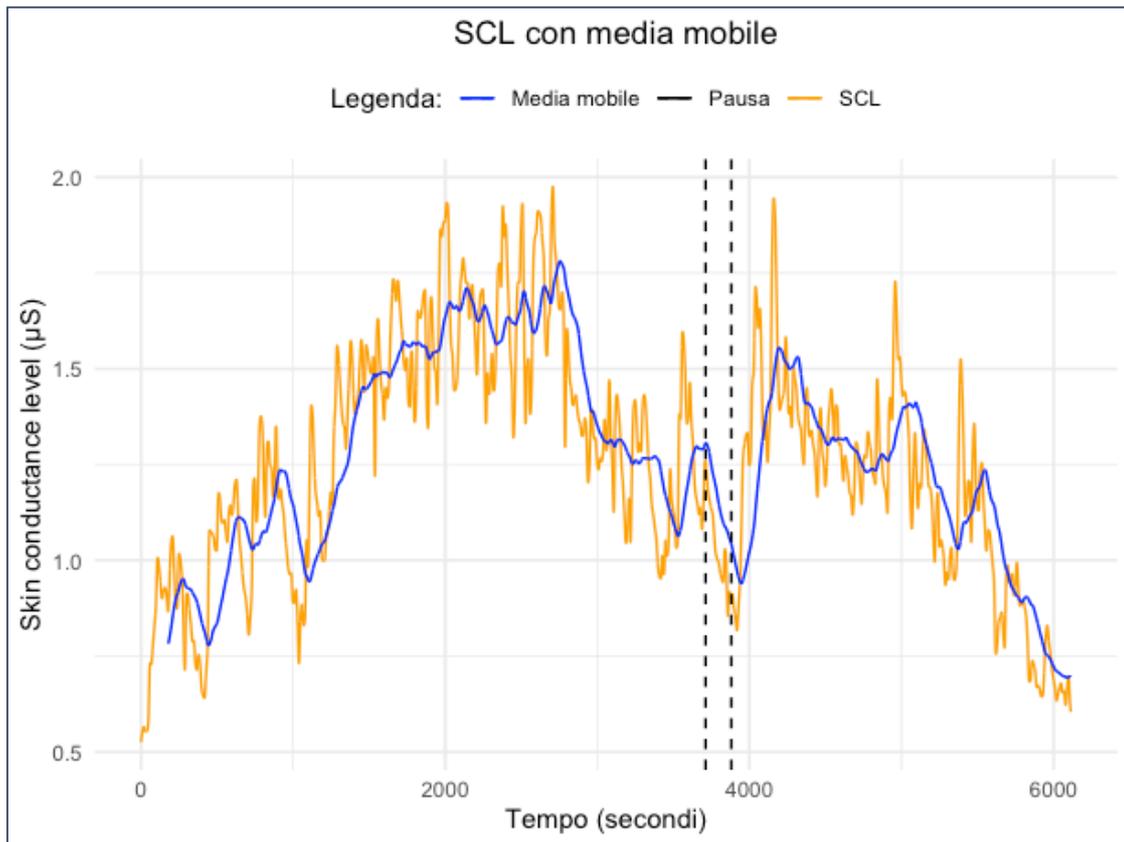


Figura 6.30 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 3

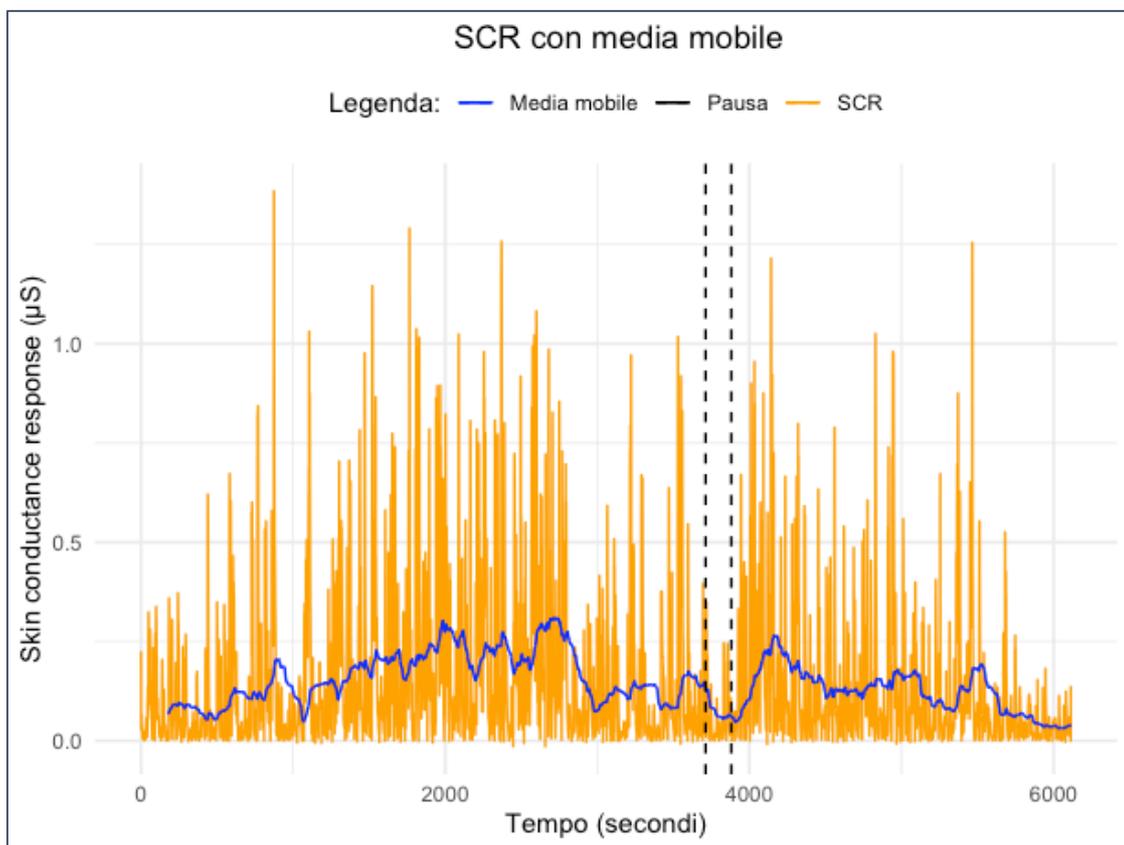


Figura 6.31 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 3

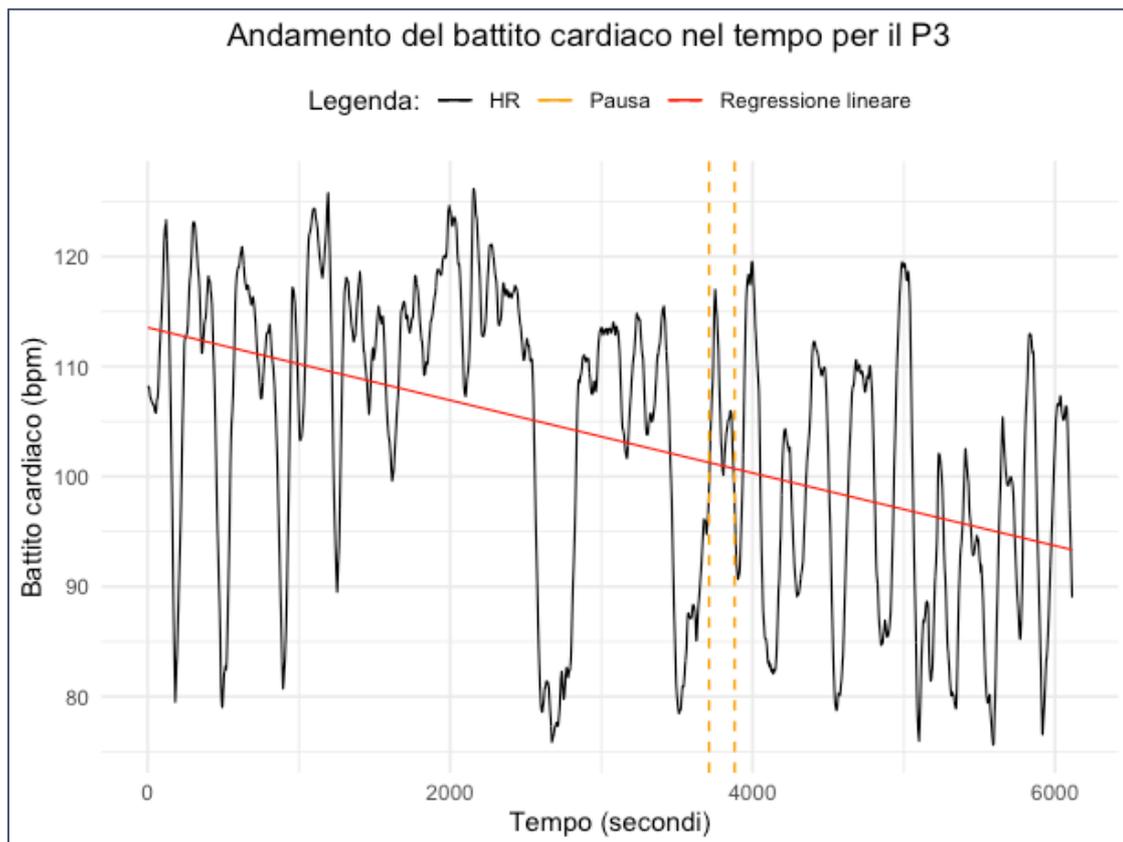


Figura 6.32 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 3

La Figura 6.32 mostra l'andamento del battito cardiaco del partecipante 3 durante la prova di assemblaggio di 100 minuti. La retta di regressione in rosso mostra un andamento decrescente del battito cardiaco, che fa presupporre che nel corso della prova ci sia stato un rilassamento.

Continuando l'analisi con i dati ottenuti tramite l'*eye tracker*, è possibile rappresentare le metriche di *Number of whole fixation starts*, *Average whole fixation pupil diameter*, *Number_of_saccade_starts*. La Tabella 6.12 riporta la prima parte di calcolo della media mobile applicata. Il numero di fissazioni (Figura 6.33), come il numero di saccadi (Figura 6.34) presentano un andamento piatto nella prima parte della prova e crescente nella seconda parte, dopo la pausa. Il diametro pupillare medio (Figura 6.35), invece, presenta un andamento decrescente nel tempo. Tutti questi parametri sono influenzati da fattori ambientali, fisiologici e anche dalla vicinanza del punto di attenzione. Tuttavia, la crescita nella parte finale dei valori relativi a fissazioni e saccadi può attestare un aumento del carico cognitivo. Nel periodo di cambio batteria, è visibile il vuoto di dati dovuto allo spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3.

Tabella 6.12 - Rappresentazione del calcolo della media mobile del numero di fissazioni su alcuni valori della prova: i primi cinque valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 6 valori per volta

Tempo prova (secondi)	Numero di fissazioni	Media mobile
30	63	NA
60	34	NA
90	77	NA
120	86	NA
150	16	NA
180	45	53,50
210	33	48,50
240	43	50,00

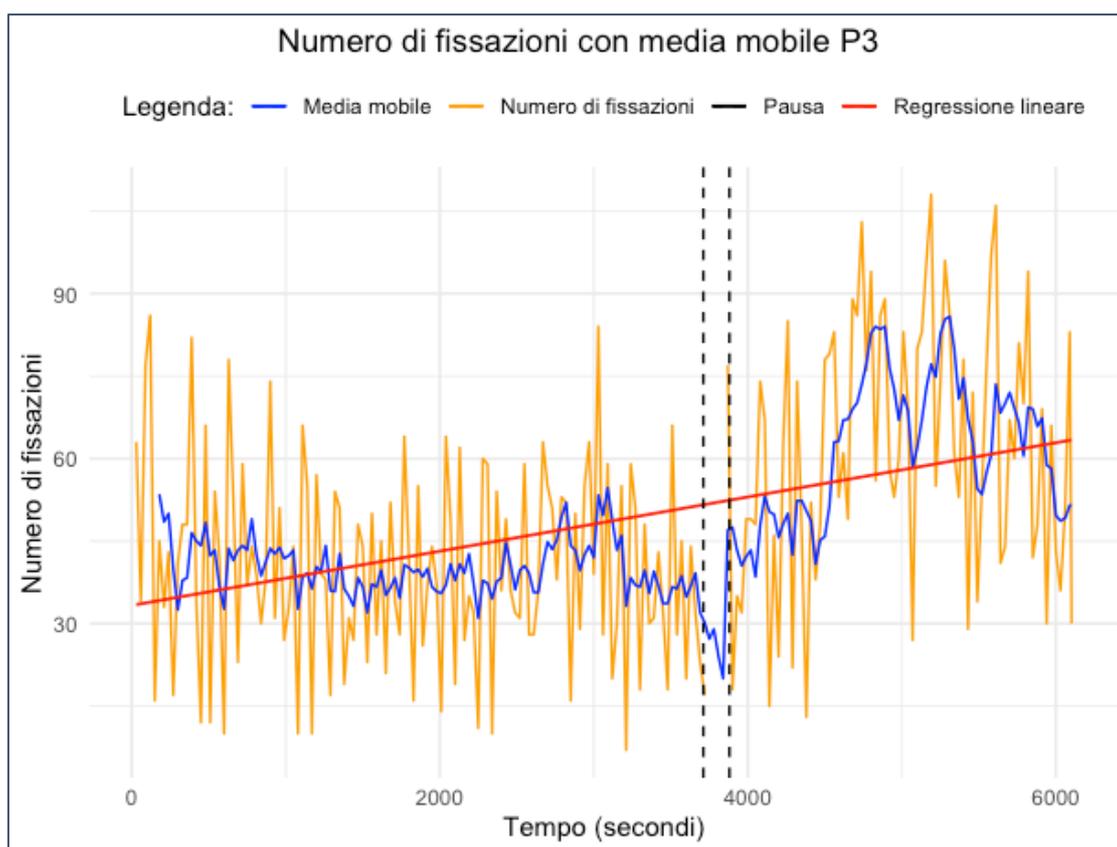


Figura 6.33 - Numero di fissazioni del partecipante 3

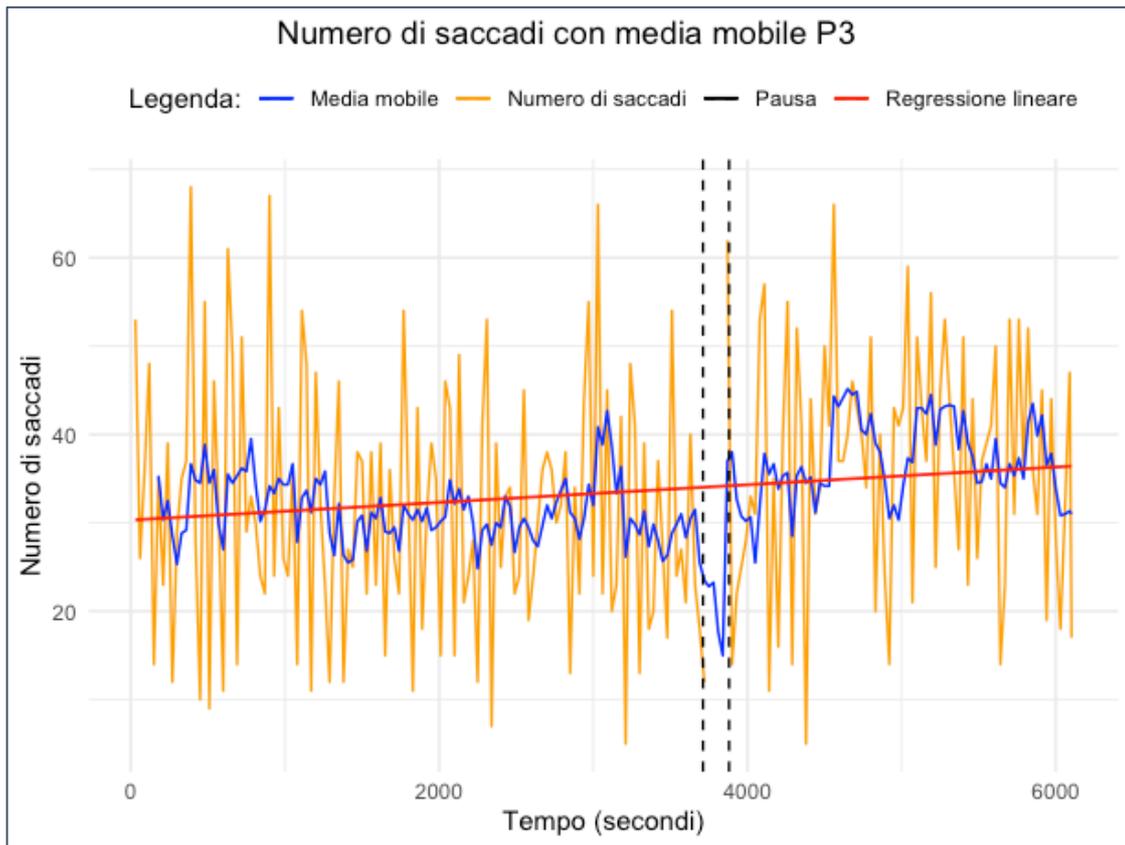


Figura 6.34 - Numero di saccadi del partecipante 3

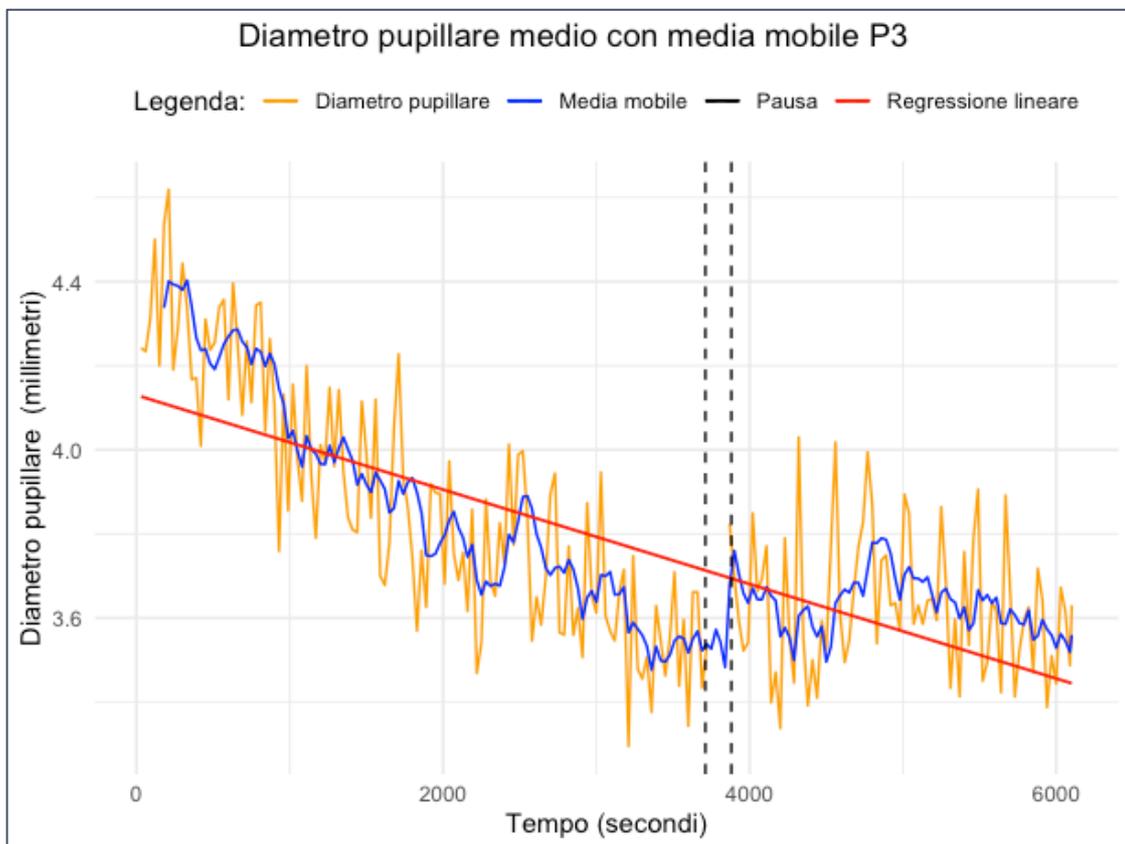


Figura 6.35 - Diametro pupillare medio del partecipante 3

6.4 Partecipante 4

Di seguito si riportano alcune caratteristiche identificative del quarto partecipante.

Partecipante 4	Sesso	Età	Professione
	F	24 anni	Lavoratrice

Le Figure 6.36 e 6.37 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti, con il relativo valore medio. In questo caso, durante il test uditivo finale, i tempi di reazione presentano un valore medio superiore rispetto a quello del test uditivo iniziale. Tuttavia, nel test uditivo iniziale, si registra un suono che non è stato colto dal partecipante, che probabilmente non si è accorto della riproduzione.

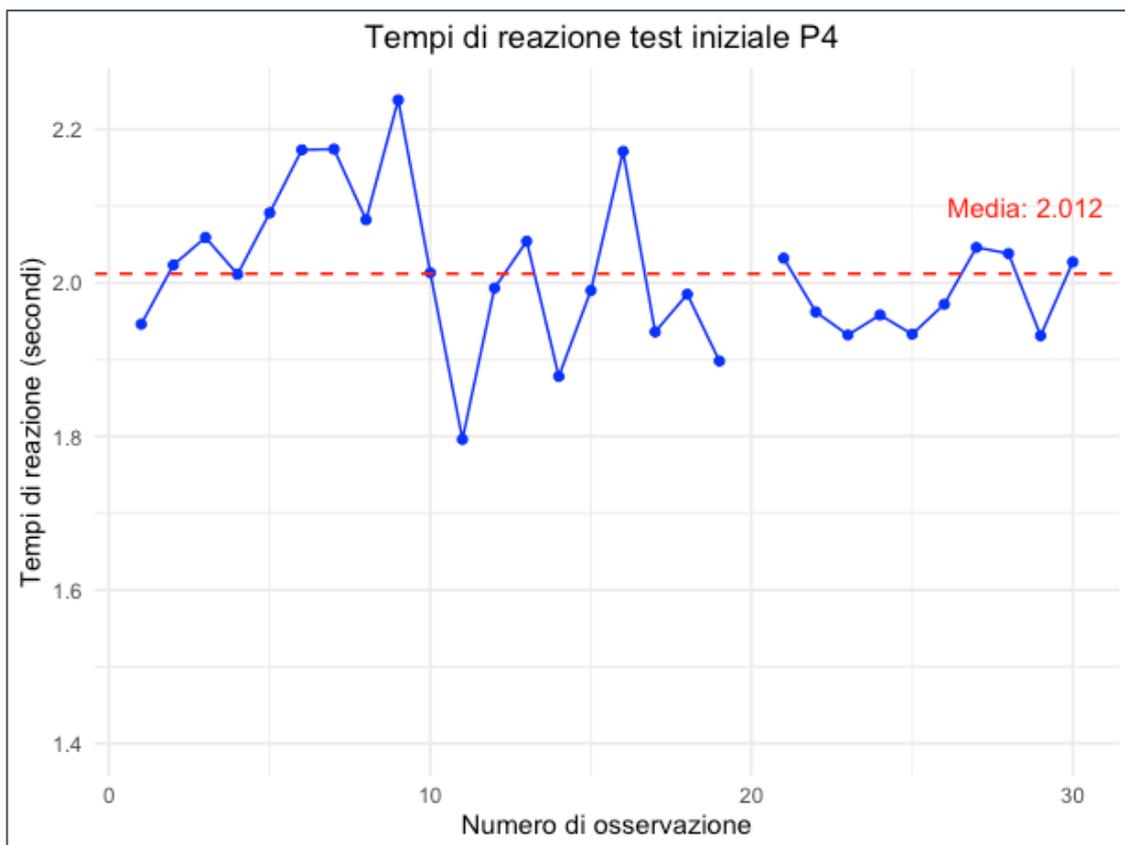


Figura 6.36 - Test uditivo iniziale del partecipante 4

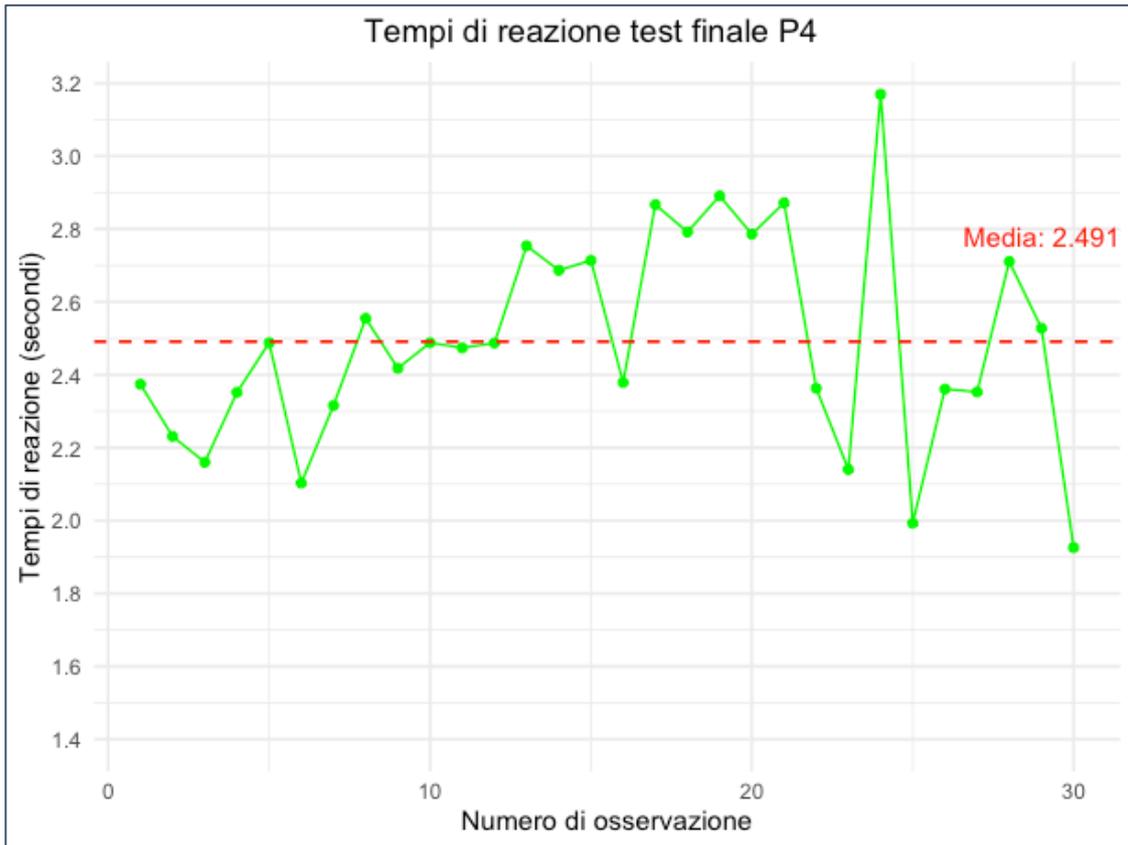


Figura 6.37 - Test uditivo finale del partecipante 4

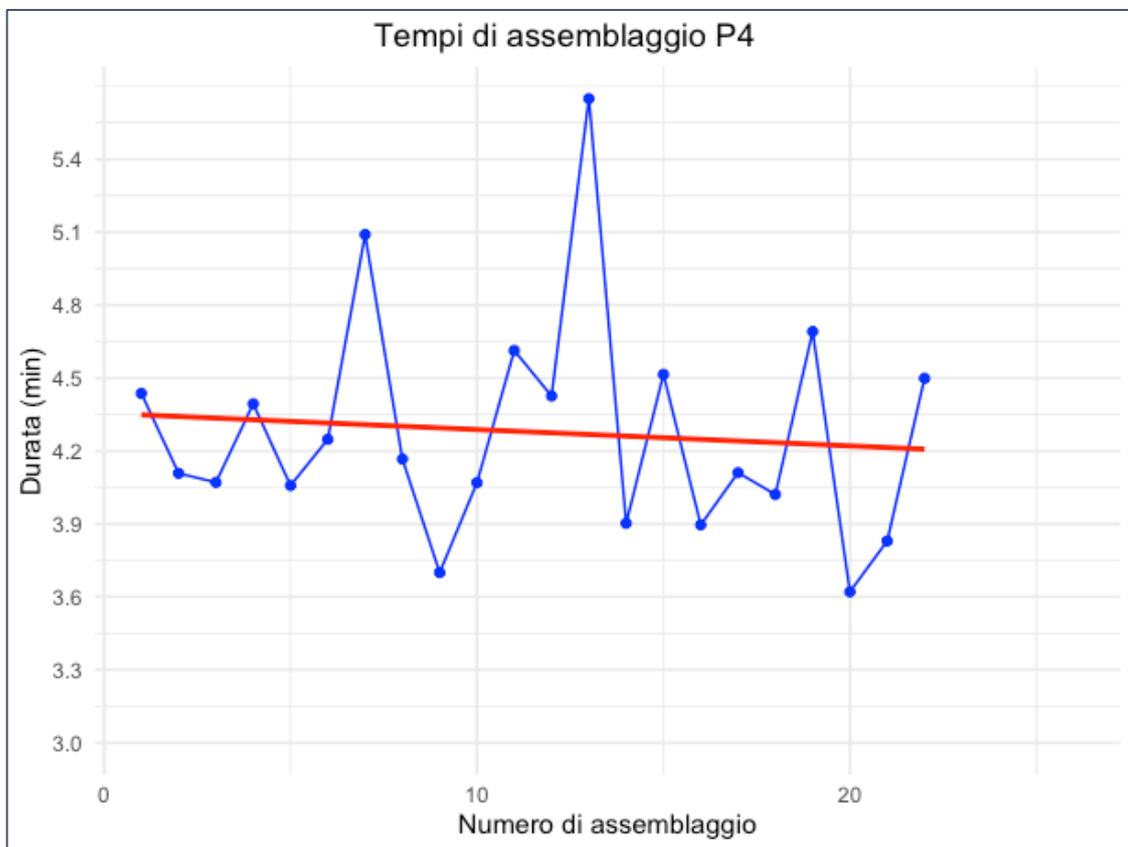


Figura 6.38 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 4

Il partecipante 4 ha eseguito 22 assemblaggi, soltanto uno non è stato svolto correttamente. La Figura 6.38 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio e mostra un andamento lievemente decrescente dei tempi, segnalando la presenza di economie di apprendimento durante la prova, che, tuttavia, non porta ad una significativa compressione dei tempi, probabilmente anche a causa della stanchezza che si può manifestare con l'avanzamento della prova.

In Figura 6.39 si può vedere l'andamento dei tempi di reazione ai suoni della *secondary task* originario e quello calcolato con una media mobile su una finestra temporale di 3 minuti. La retta di regressione in rosso ha andamento crescente, mostrando un aumento dei tempi e quindi rilevando delle prestazioni peggiori nella parte finale della prova, associabile ad un maggiore carico cognitivo.

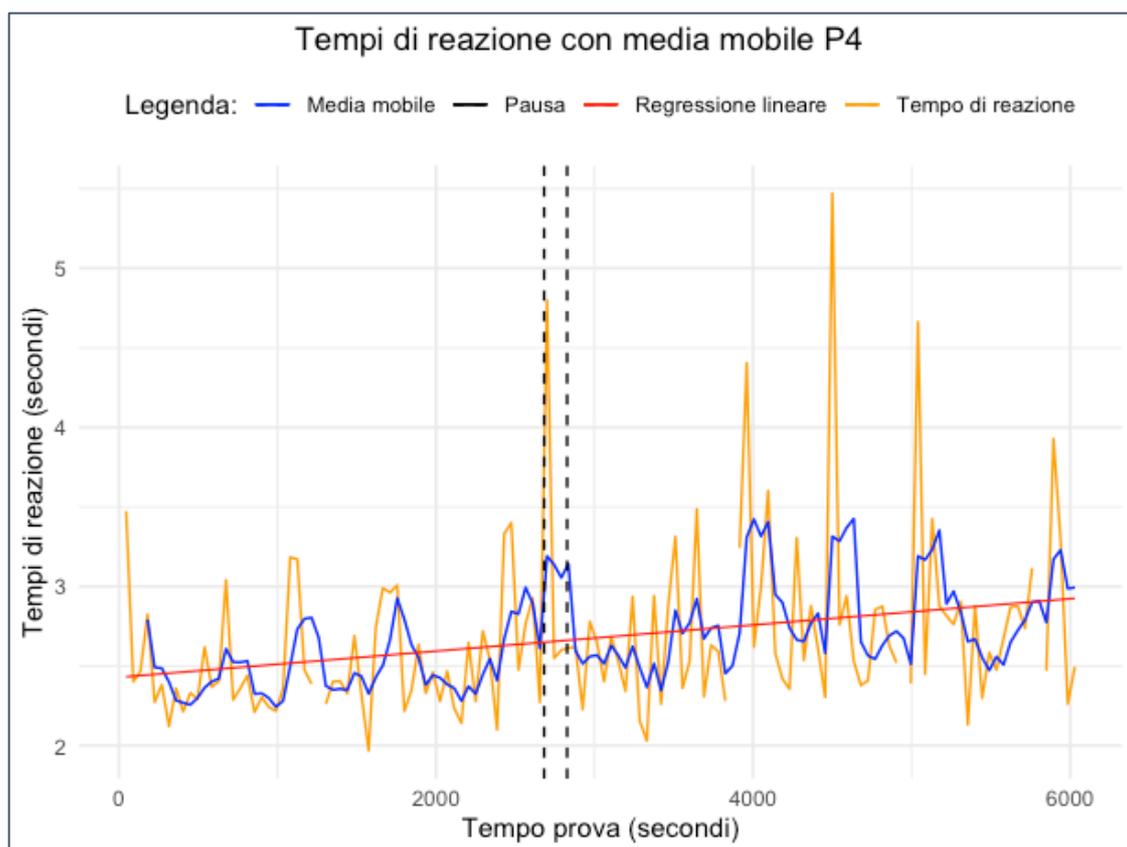


Figura 6.39 - Tempi di risposta alla *secondary task* del partecipante 4

Nella Tabella 6.13, vengono riportate le prestazioni del partecipante 4 relative alla *secondary task*, da cui si evince che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore anche per questo partecipante ai valori dei due test uditivi (Tabella 6.1). Si può notare, inoltre, che durante la

prova il partecipante commette diversi errori: non si accorge di 4 suoni e non distingue correttamente 3 suoni, dimostrando una certa difficoltà nel gestire i due compiti contemporaneamente.

Tabella 6.13 - Prestazioni della secondary task del partecipante 4

Partecipante 4	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,676 secondi
Suoni riprodotti	134
Suoni corretti	127
Suoni mancati	4
Suoni non riconosciuti correttamente	3

La Tabella 6.14 raccoglie le considerazioni del partecipante 4 rispetto alla prova. Dalle risposte emerge chiaramente un maggiore di livello di stanchezza nello svolgere ripetutamente l'assemblaggio. Nonostante l'attività secondaria venga ritenuta non invasiva, la necessità di fermarsi per reagire al suono crea del fastidio.

Tabella 6.14 - Valutazione soggettiva del partecipante 4

Feedback del partecipante P4	
20° minuto	“Si trova bene ed è tranquillo”
40° minuto	“Va tutto bene, si sente un po' annoiato”
60° minuto	“Annoiato, più lento e meno concentrato”
80° minuto	“Si sente sempre più stanco”
100° minuto	“E' stanco, prova fastidio agli occhi e al polso, affaticato mentalmente ma di più fisicamente”
Fine prova	“Esperienza definita lunga, faticosa, stancante, perde la concentrazione, si dimentica che ci fosse il suono a cui reagire, frustrazione nel dover sempre ricominciare quando viene interrotto dal suono, meno reattività e maggiore distrazione. <i>Secondary task</i> non invasiva, ma delle volte fastidiosa. Stanco mentalmente: 6”

Procedendo, si valutano i grafici di SCL e SCR (Figure 6.40 e 6.41). I due parametri presentano degli andamenti simili e piatti, con un picco nei valori poco prima del cambio batteria. Sembra che il partecipante non subisca significative variazioni che attivino il sistema nervoso e portino a evidenti cambiamenti nei valori di conduttanza cutanea.

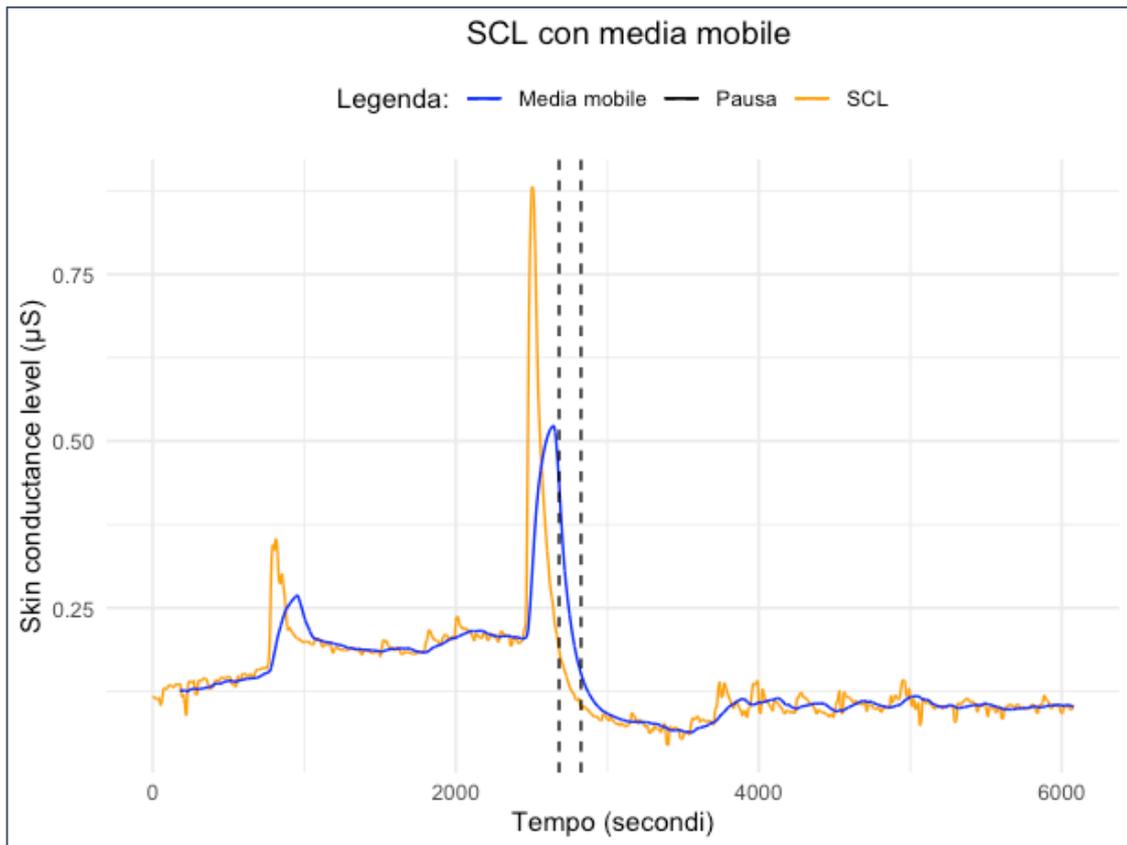


Figura 6.40 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 4

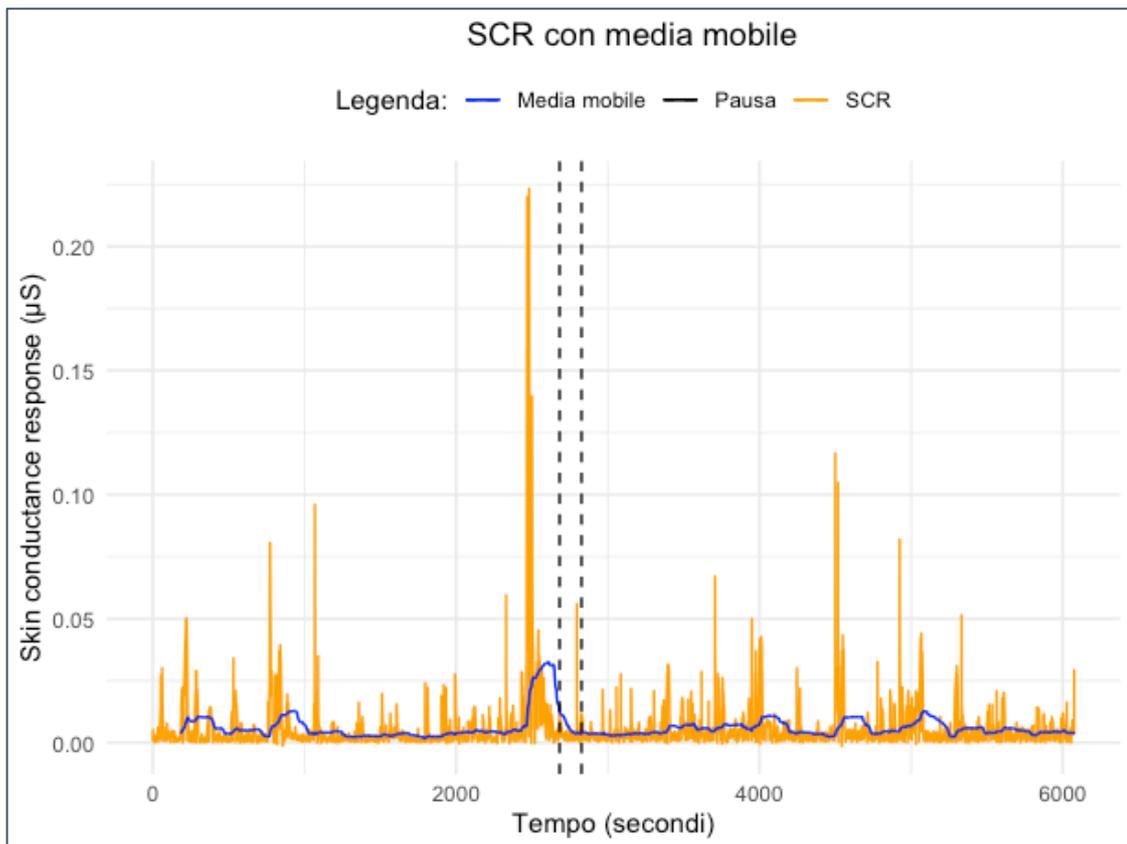


Figura 6.41 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 4

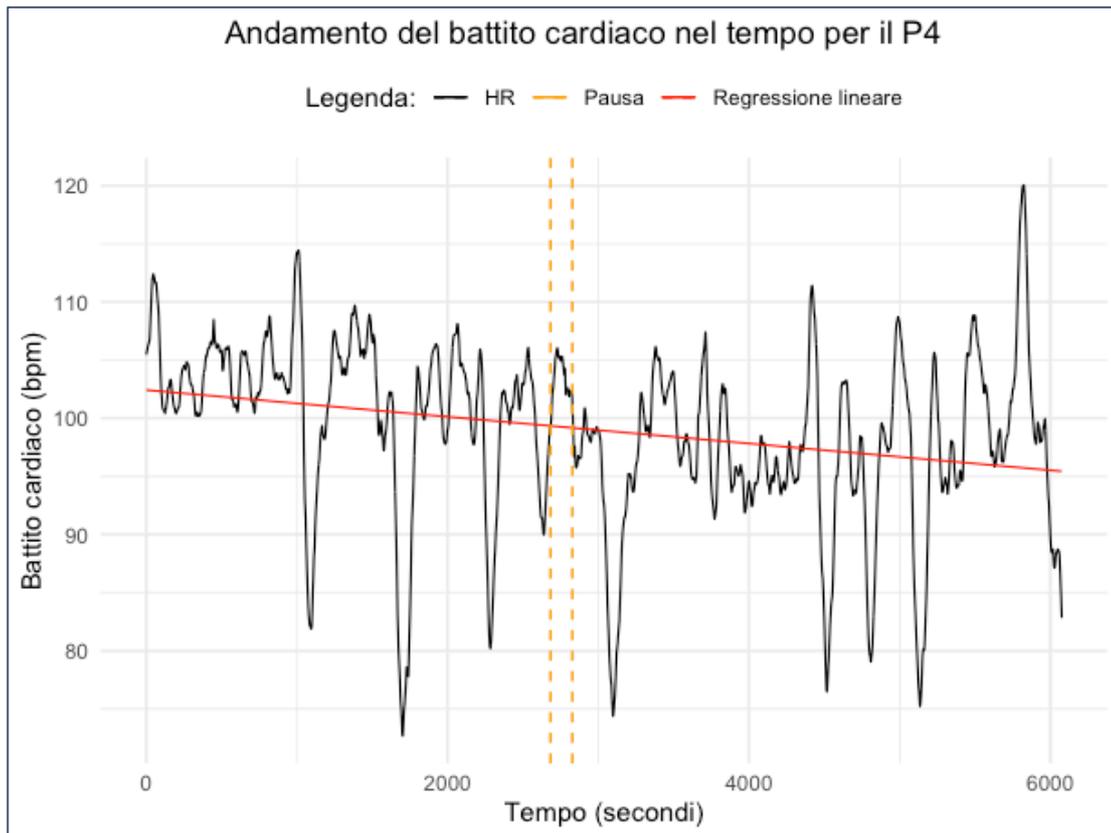


Figura 6.42 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 4

In Figura 6.42 viene mostrato l'andamento del battito cardiaco del partecipante 4 durante la prova di 100 minuti. La retta di regressione in rosso mostra un andamento decrescente del battito cardiaco.

Dai dati ottenuti tramite l'*eye tracker*, è possibile rappresentare le metriche di *Number of whole fixation starts*, *Average whole fixation pupil diameter*, *Number of saccade starts*, sia il numero di fissazioni (Figura 6.43), che quello delle saccadi (Figura 6.44) presentano un andamento piatto durante tutta la prova. La Tabella 6.15 riporta un frammento del calcolo della media mobile del numero di saccadi. Il diametro pupillare medio (Figura 6.45) presenta, invece, una tendenza decrescente nel tempo. I grafici risultanti non permettono di trarre delle conclusioni univoche sul carico cognitivo a cui il partecipante è stato sottoposto. Nel periodo di cambio batteria, non si verifica la registrazione dei dati a causa dello spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3.

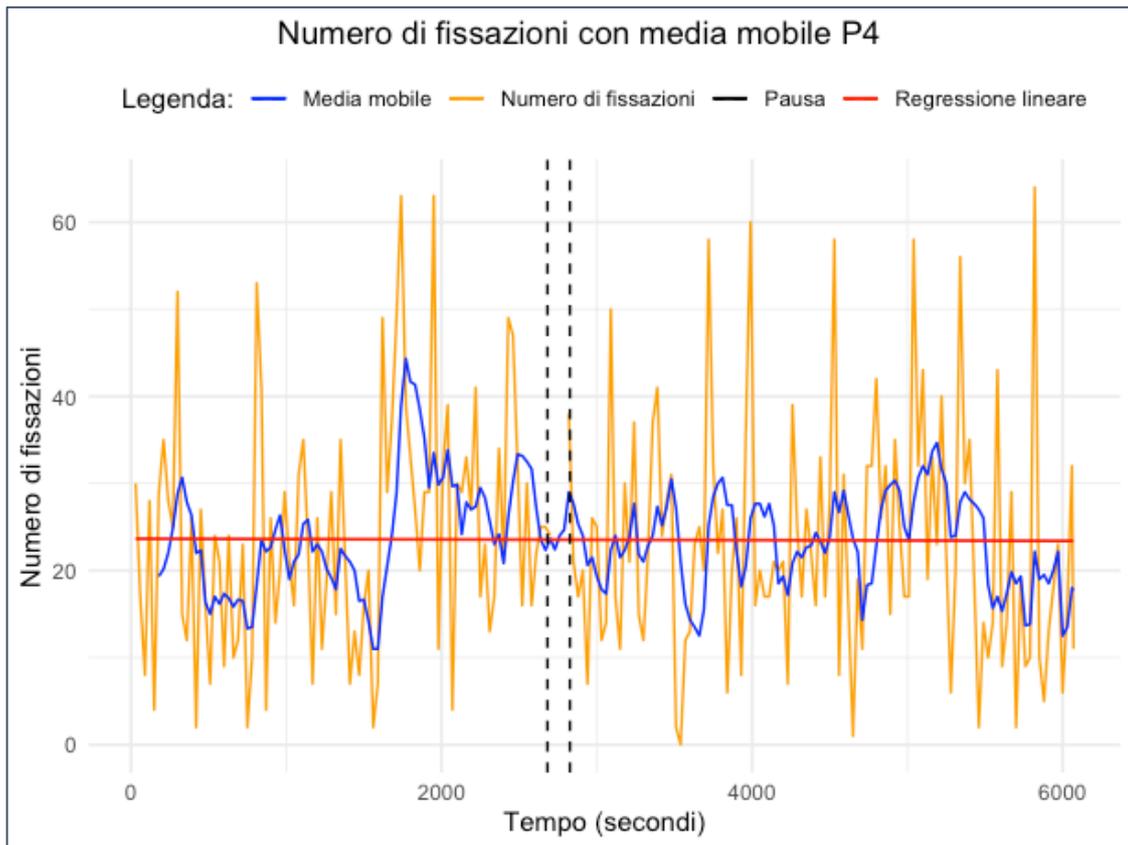


Figura 6.43 - Numero di fissazioni del partecipante 4

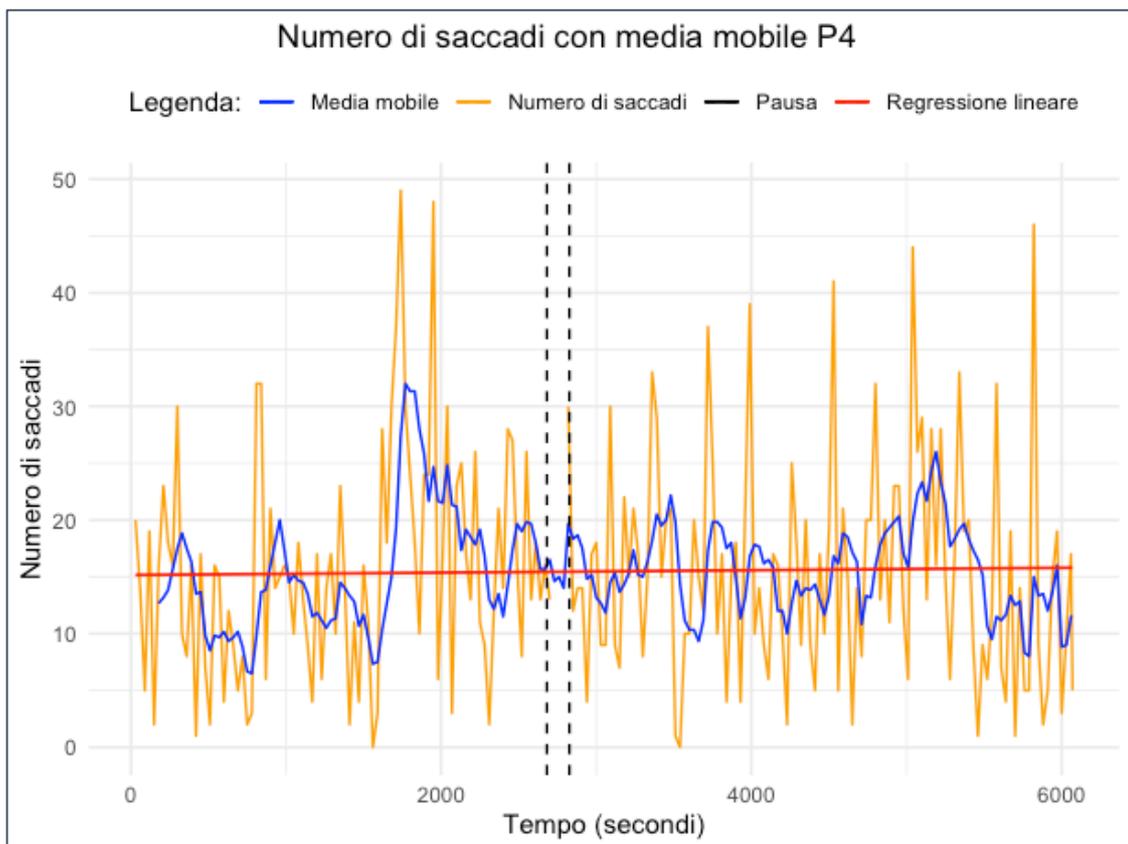


Figura 6.44 - Numero di saccadi del partecipante 4

Tabella 6.15 - Rappresentazione del calcolo della media mobile del numero di saccadi su alcuni valori della prova: i primi cinque valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 6 valori per volta

Tempo prova (secondi)	Numero di saccadi	Media mobile
30	20	NA
60	14	NA
90	5	NA
120	19	NA
150	2	NA
180	16	12,67
210	23	13,17
240	18	13,83

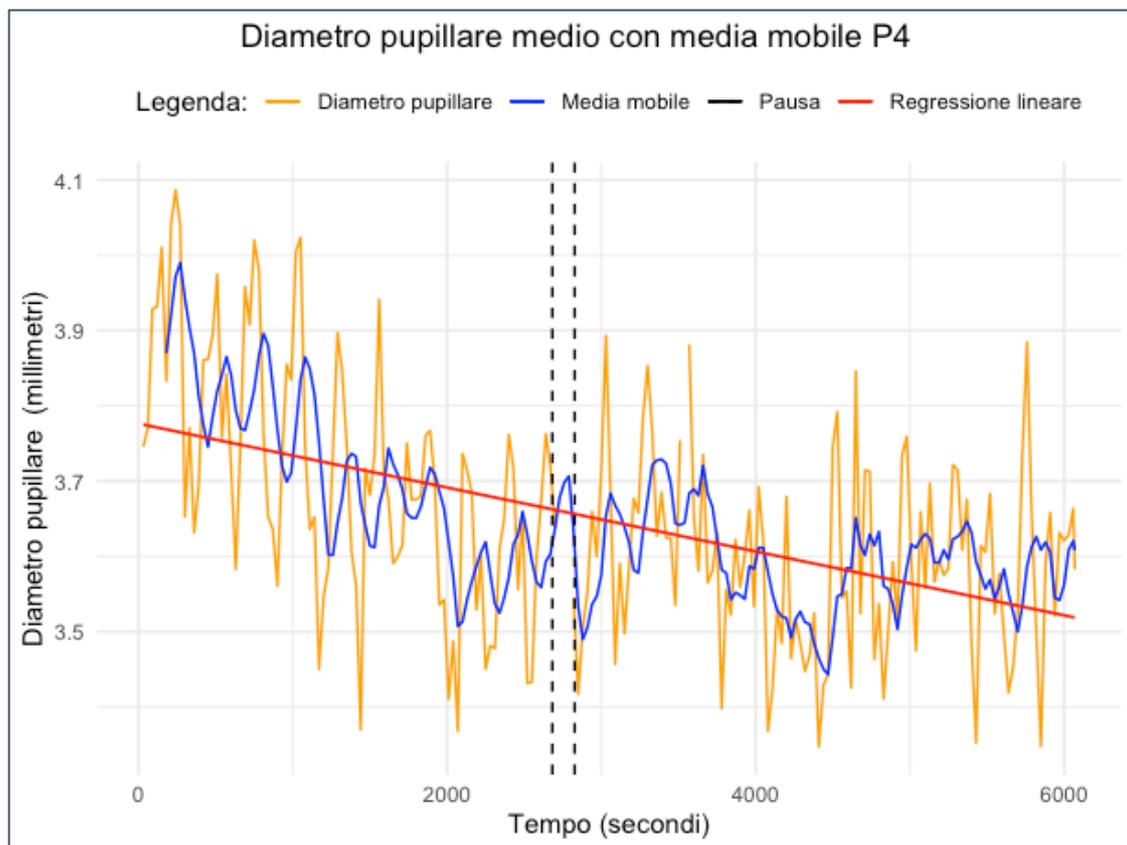


Figura 6.45 - Diametro pupillare medio del partecipante 4

6.5 Partecipante 5

Di seguito, si riportano alcune caratteristiche identificative del quinto partecipante.

Partecipante 5	Sesso	Età	Professione
	F	25 anni	Studente-Lavoratrice

Le Figure 6.46 e 6.47 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti, insieme al rispettivo valore medio. Il test uditivo finale presenta un valore medio inferiore, probabilmente dovuto alla maggiore familiarità del partecipante a riconoscere i suoni, acquisita durante la prova di assemblaggio.

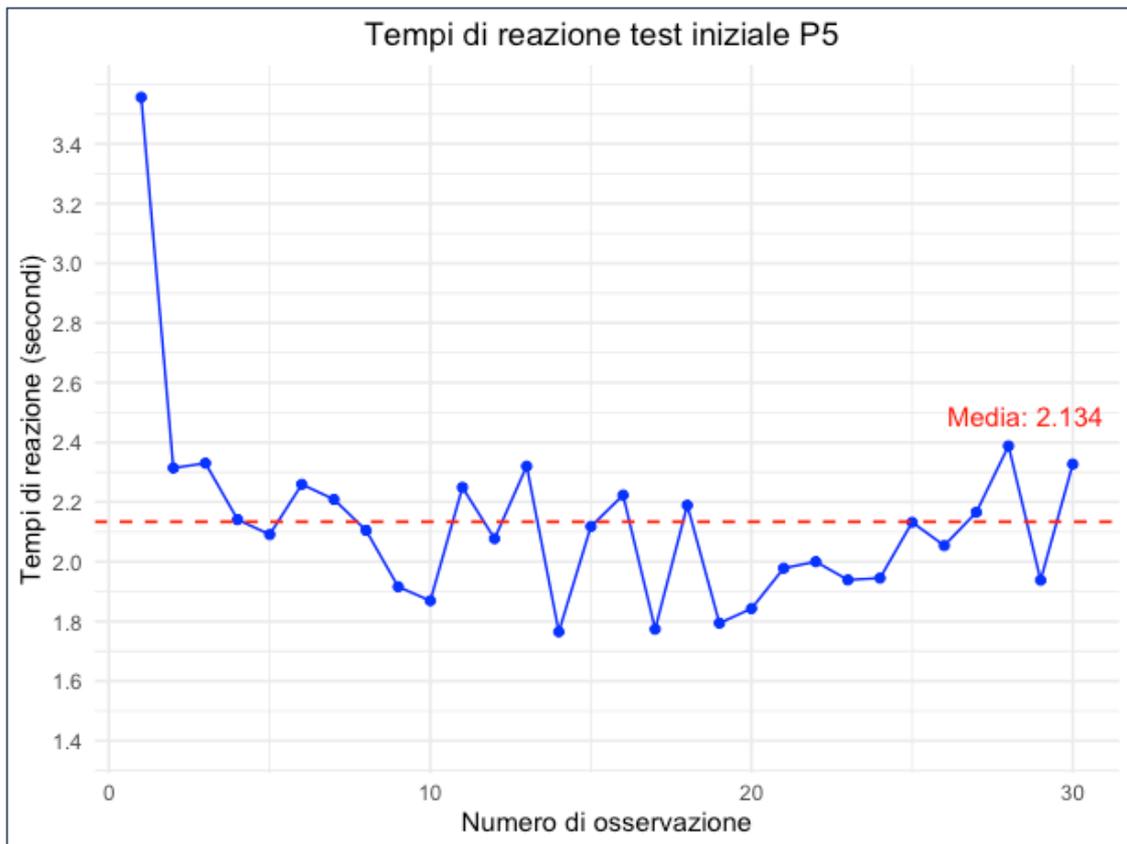


Figura 6.46 - Test uditivo iniziale del partecipante 5

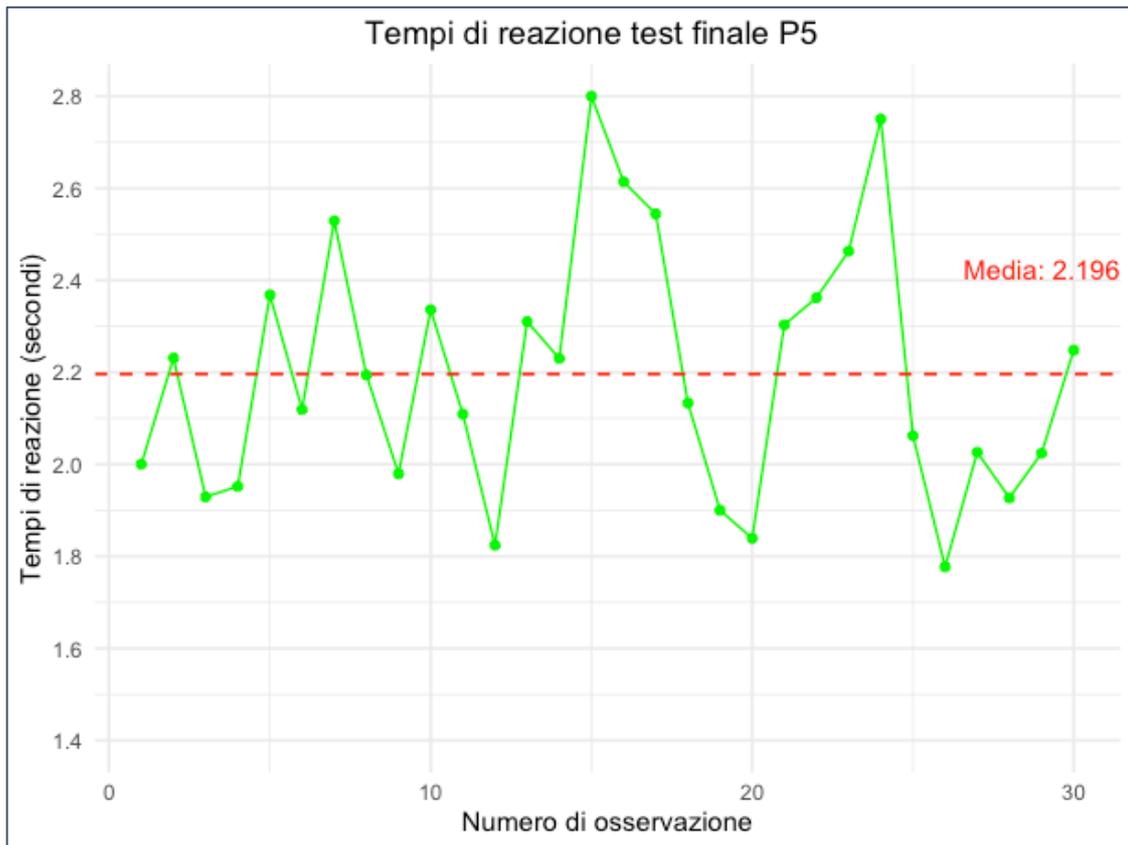


Figura 6.47 - Test uditivo finale del partecipante 5

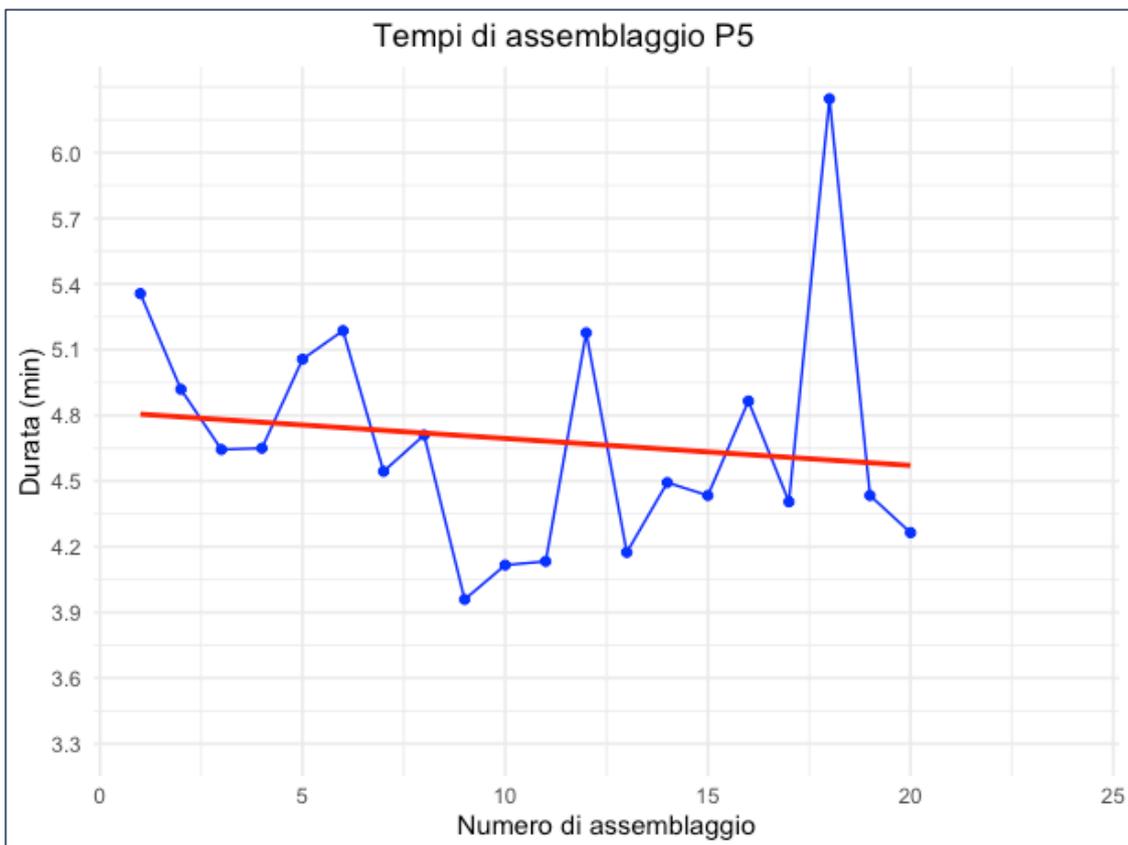


Figura 6.48 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 5

Il partecipante 5 ha compiuto 20 assemblaggi, tutti svolti correttamente. La Figura 6.48 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio e mostra un andamento lievemente decrescente dei tempi, a dimostrare la presenza di economie di apprendimento durante la prova che, tuttavia, sono contrastate dal crescente affaticamento che colpisce il partecipante.

Per quanto riguarda i dati relativi alla *secondary task* durante la prova, i dati in blu sono ottenuti tramite una media mobile su un arco temporale di 3 minuti. La Figura 6.49 evidenzia un andamento lievemente decrescente, che fa registrare una minima diminuzione dei tempi e prestazioni leggermente migliori nella parte finale della prova.

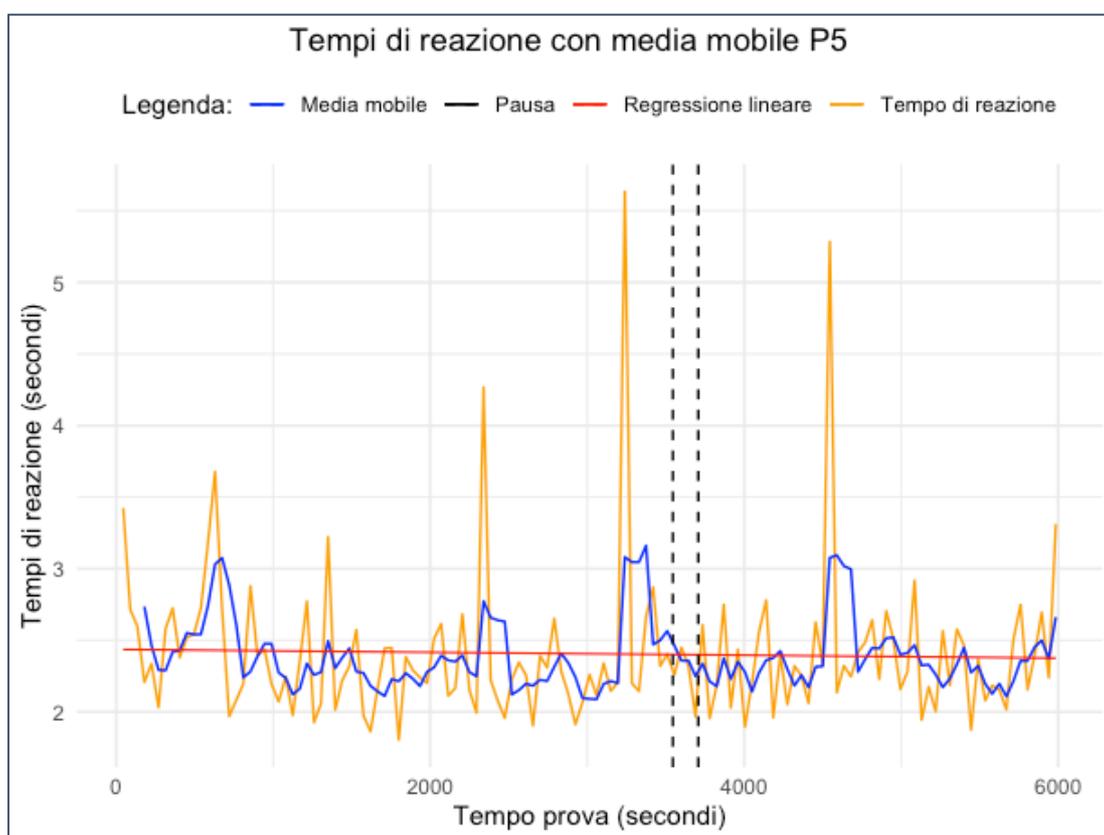


Figura 6.49 - Tempi di risposta alla *secondary task* del partecipante 5

Analizzando le prestazioni del partecipante 5, riportate in Tabella 6.16, risulta che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore sia rispetto al test uditivo iniziale (Tabella 6.1) e finale ed è comprensibile visto il carico cognitivo maggiore nel compiere due compiti contemporaneamente e la condizione di avere le mani spesso impegnate al momento della riproduzione del suono. Non si registra nessun errore durante la prova.

Tabella 6.16 - Prestazioni della secondary task del partecipante 5

Partecipante 5	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,406 secondi
Suoni riprodotti	133
Suoni corretti	133
Suoni mancati	0
Suoni non riconosciuti correttamente	0

Nella Tabella 6.17 vengono raccolte le considerazioni del partecipante 5 riguardo alla prova affrontata. Dalle risposte emerge la consapevolezza di sentirsi più stanchi ma ancora attenti alla fine della prova rispetto all'inizio. Molto rilevante è il feedback sulla task secondaria, che conferma la non invasività del compito progettato, nonostante il fastidio che sorge quando il suono si manifesta mentre si è impegnati.

Tabella 6.17 - Valutazione soggettiva del partecipante 5

Feedback del partecipante P5	
20° minuto	“Si sta divertendo, va tutto bene”
40° minuto	“Ancora divertito, stanco a stare sempre in piedi ma tutto ok”
60° minuto	“Meno divertito e sempre più stanco di stare in piedi”
80° minuto	“Si sta annoiando, è un po' frustrato, trova la prova monotona”
100° minuto	“Si sente stanco fisicamente, ha fastidio alla schiena, a stare in piedi e un po' all'orecchio della cuffietta, ma ancora attento e ricettivo”
Fine prova	“Esperienza definita positiva, interessante vedere come si reagisce ad una dual task, stanco fisicamente, ma non mentalmente. Il suono non è fastidioso, c'è un basso lasso di tempo tra i due suoni. Nella parte finale prova avversione verso il compito. Ritiene di avere la stessa reattività tra prima e dopo. Il suono non è fastidioso, c'è un basso lasso di tempo tra i due suoni. La <i>secondary task</i> non è invasiva, anche i suoni non sono forti o fastidiosi. Stanco mentalmente: 2”

La Figura 6.50 mostra l'andamento della *skin conductance level* (SCL) durante la prova. Il grafico in blu che corregge le fluttuazioni e facilita la lettura, presenta un andamento inizialmente crescente e poi decrescente, ad indicare che all'inizio il partecipante abbia riscontrato più fatica e difficoltà, per poi abituarsi al compito e rilassarsi nel corso della prova. Anche SCR (Figura 6.51) presenta un andamento simile, anche se meno evidente.

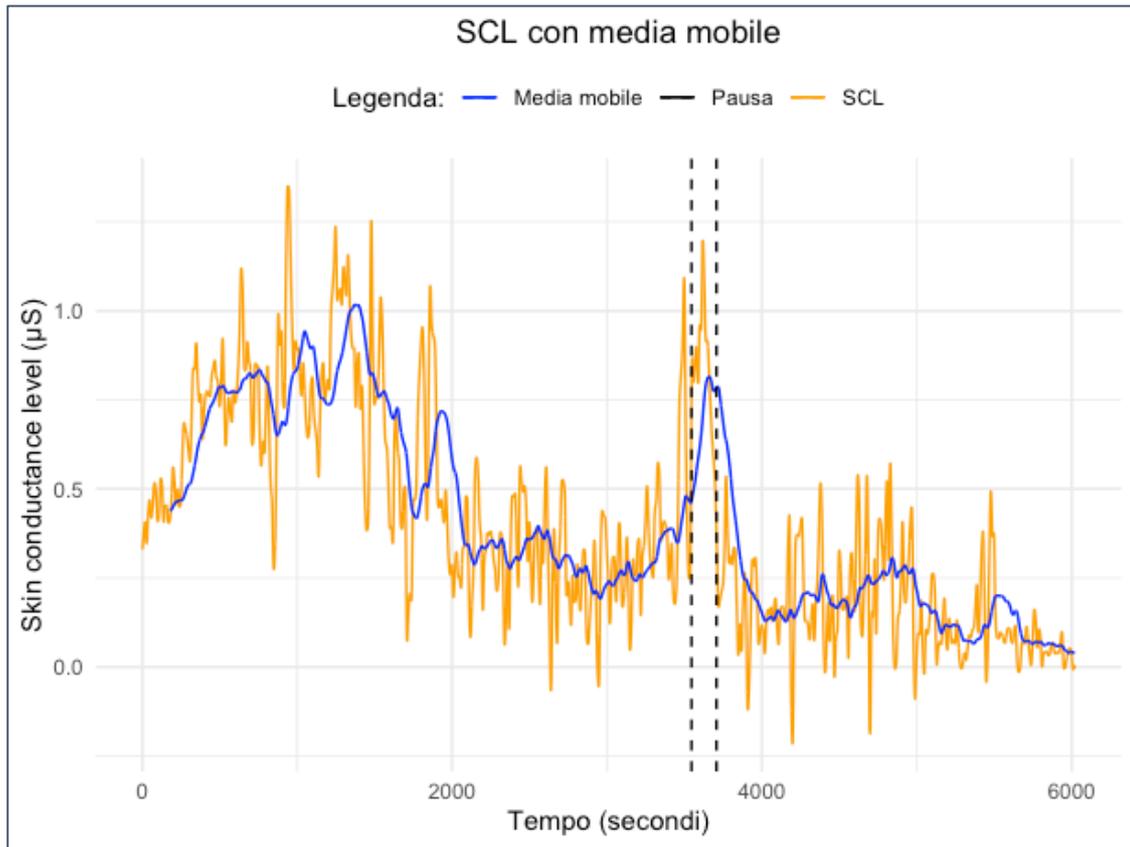


Figura 6.50 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 5

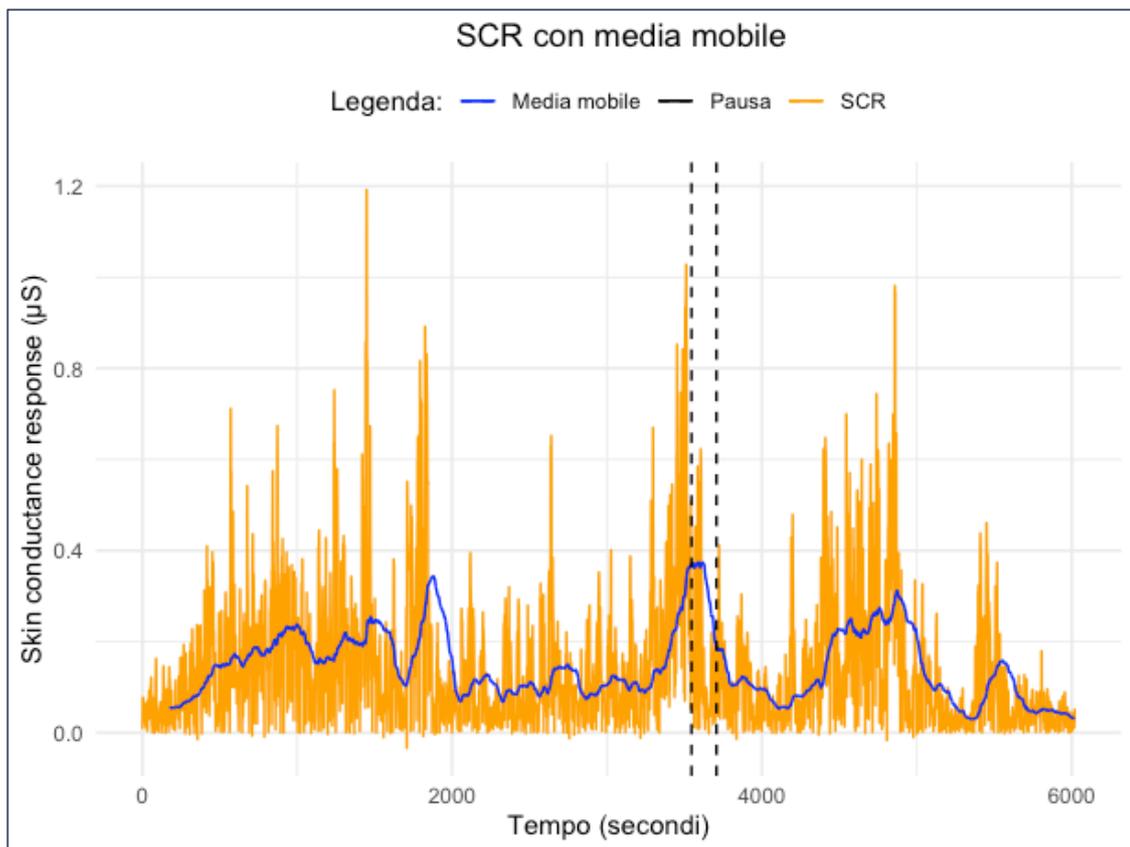


Figura 6.51 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 5

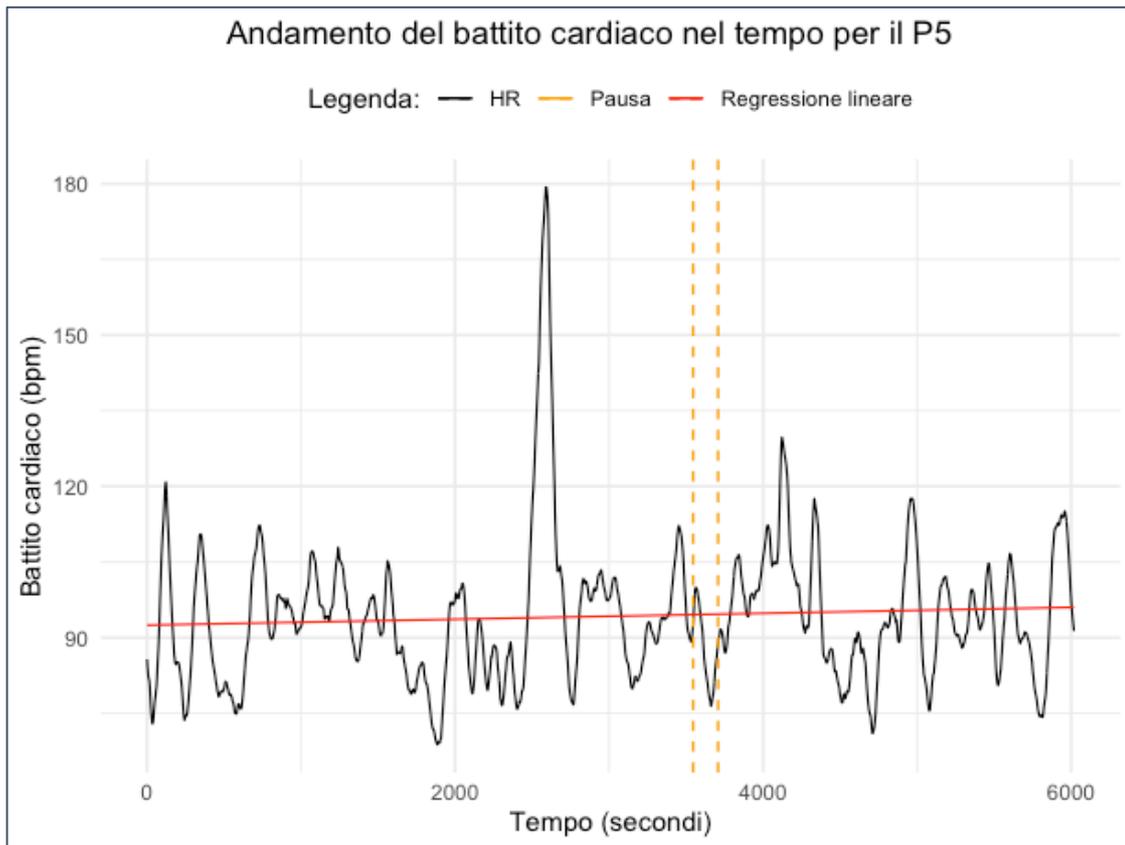


Figura 6.52 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 5

La Figura 6.52 mostra l'andamento del battito cardiaco del partecipante 5. La retta di regressione in rosso è lievemente crescente.

Continuando l'analisi, è possibile rappresentare le metriche di *Number of whole fixation starts*, *Average_whole_fixation_pupil_diameter*, *Number_of_saccade_starts*. Il numero di fissazioni (Figura 6.53) presenta un andamento crescente, nella stessa direzione si muove il numero di saccadi (Figura 6.54), probabilmente a suggerire un aumento del carico cognitivo con l'avanzamento della prova. In Tabella 6.18 si riporta una parte del calcolo per trovare la media mobile relativa al diametro pupillare medio. Quest'ultimo in Figura 6.55 presenta, al contrario, un andamento decrescente con il tempo, probabilmente a causa dell'affaticamento che aumenta nella parte finale della prova e provoca un effetto a lungo termine di riduzione della pupilla. Va, anche, ricordato che il diametro pupillare è molto sensibile a fattori ambientali e fisiologici soggettivi e non sempre è possibile capire le vere cause delle variazioni del diametro. Nel periodo di cambio batteria, è rappresentato il vuoto di dati per lo spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3.

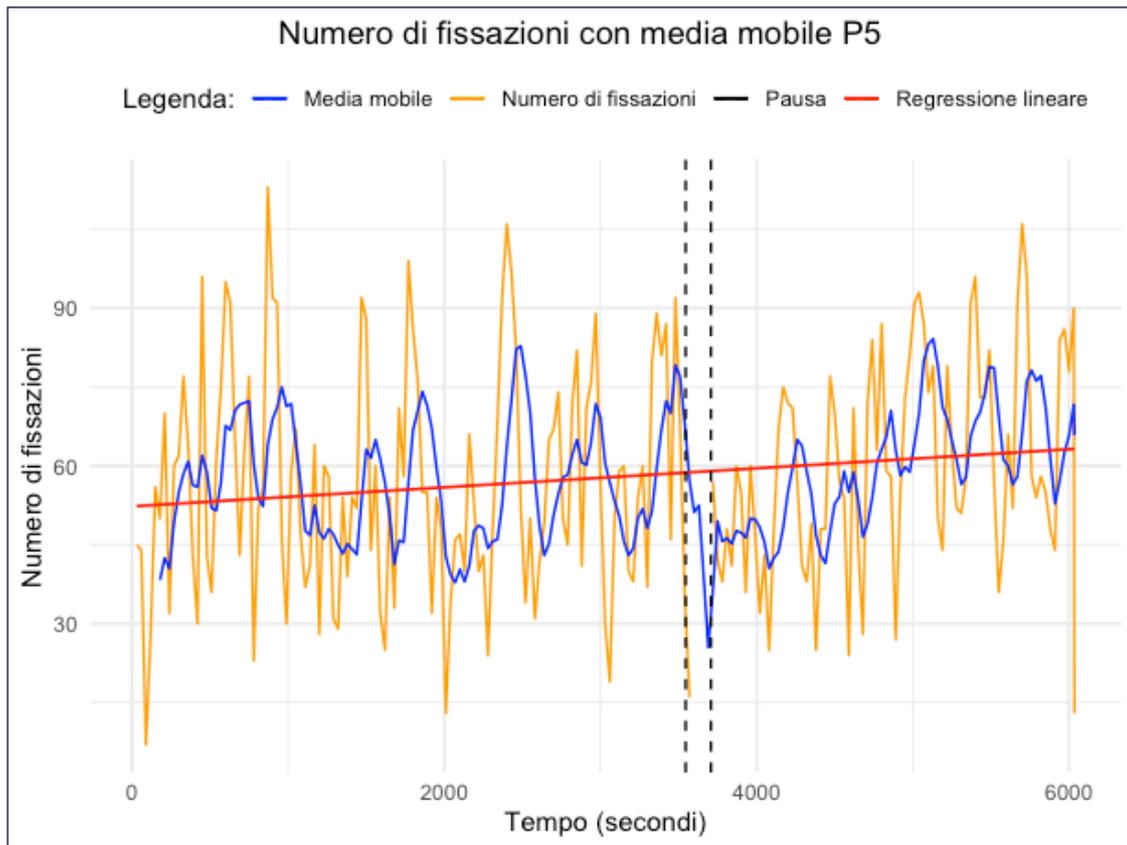


Figura 6.53 - Numero di fissazioni del partecipante 5

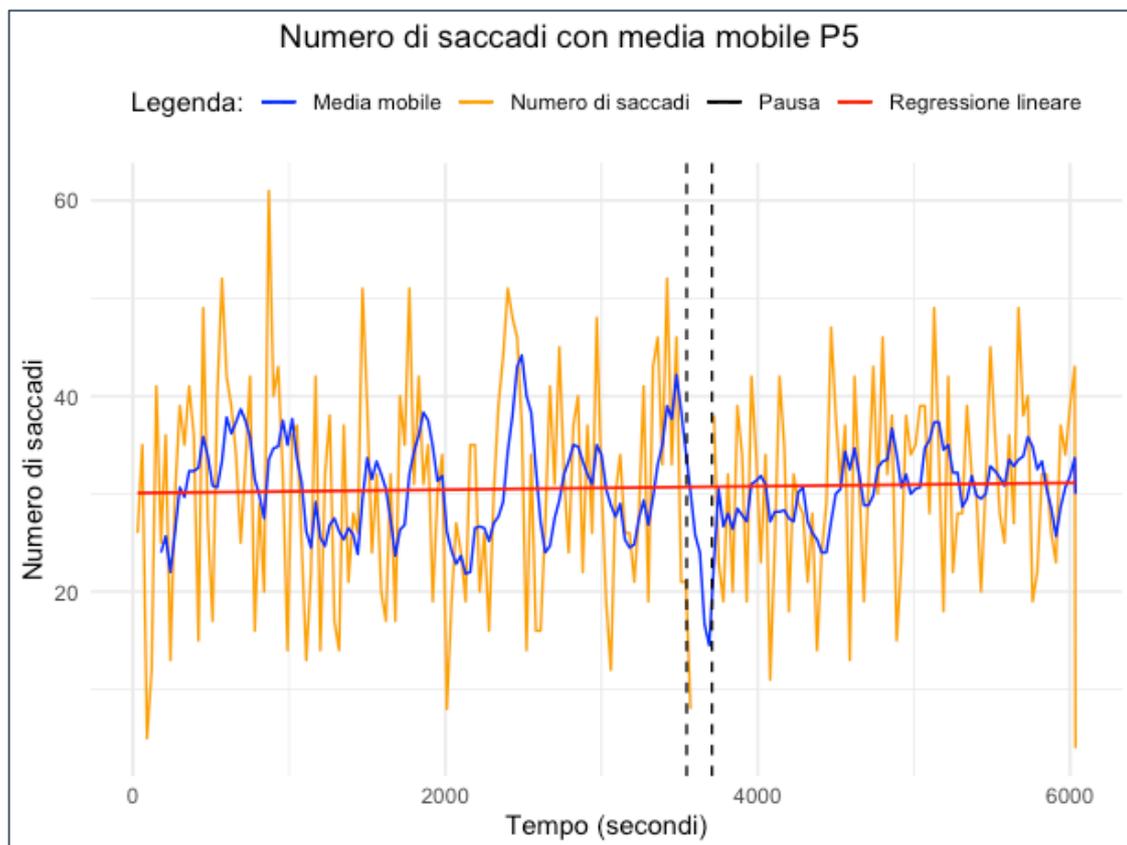


Figura 6.54 - Numero di saccadi del partecipante 5

Tabella 6.18 - Rappresentazione del calcolo della media mobile del diametro pupillare medio su alcuni valori della prova: i primi cinque valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 6 valori per volta

Tempo prova (secondi)	Diametro pupillare medio (mm)	Media mobile
30	4,175	NA
60	4,162	NA
90	3,905	NA
120	3,974	NA
150	4,003	NA
180	3,930	4,025
210	4,160	4,022
240	4,261	4,039

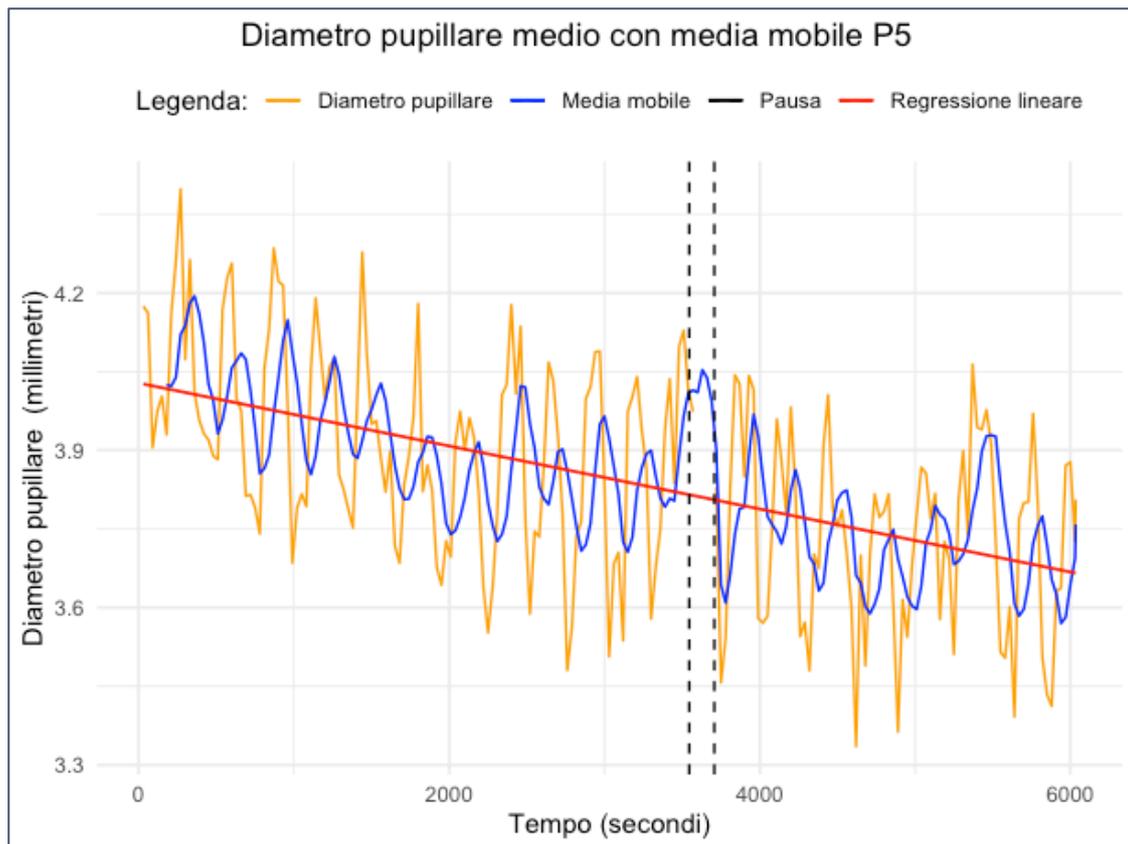


Figura 6.55 - Diametro pupillare medio del partecipante 5

6.6 Partecipante 6

La Tabella riporta alcune informazioni identificative del sesto partecipante.

Partecipante 6	Sesso	Età	Professione
	M	25	Lavoratore

Le Figure 6.56 e 6.57 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti (Tabella 6.1). Si rappresentano anche i valori medi e quello relativo al test iniziale, che risulta essere maggiore di quello finale, probabilmente per la maggiore familiarità con la task uditiva, nonostante i tempi di reazione alla fine abbiamo una variabilità superiore rispetto al test uditivo iniziale.

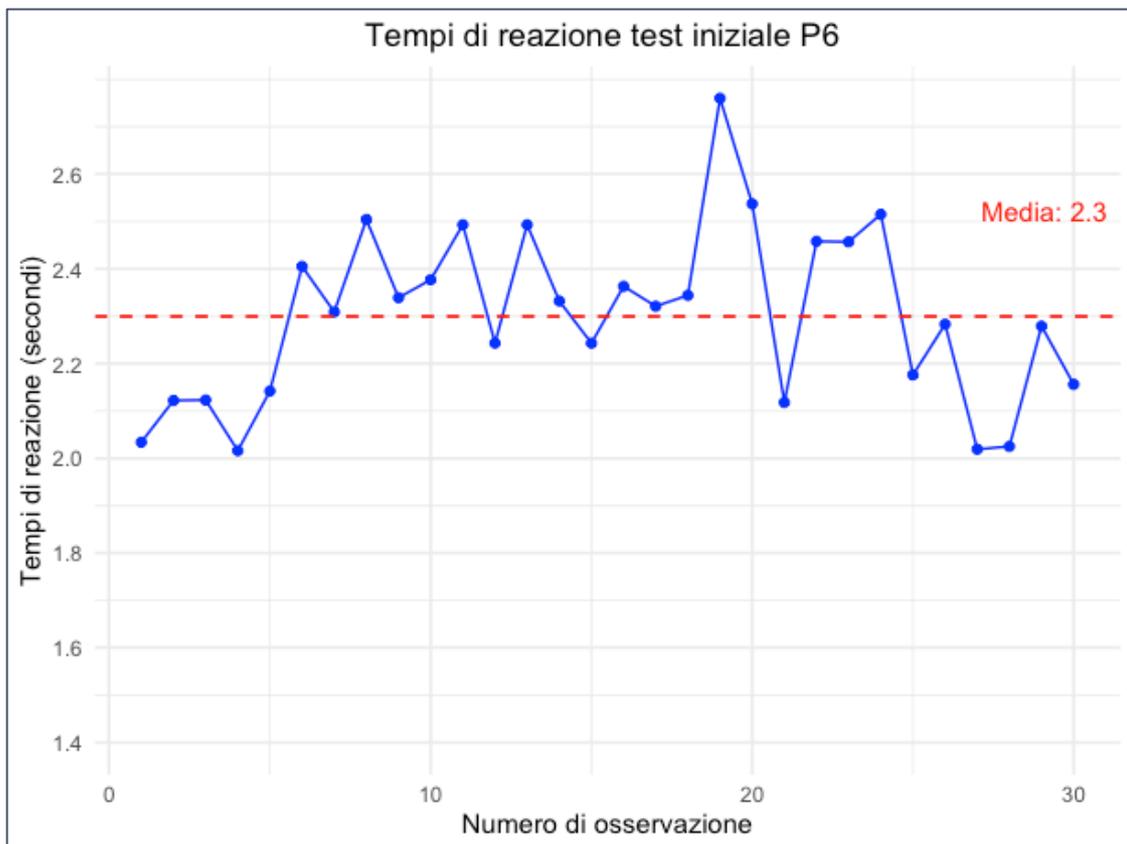


Figura 6.56 - Test uditivo iniziale del partecipante 6

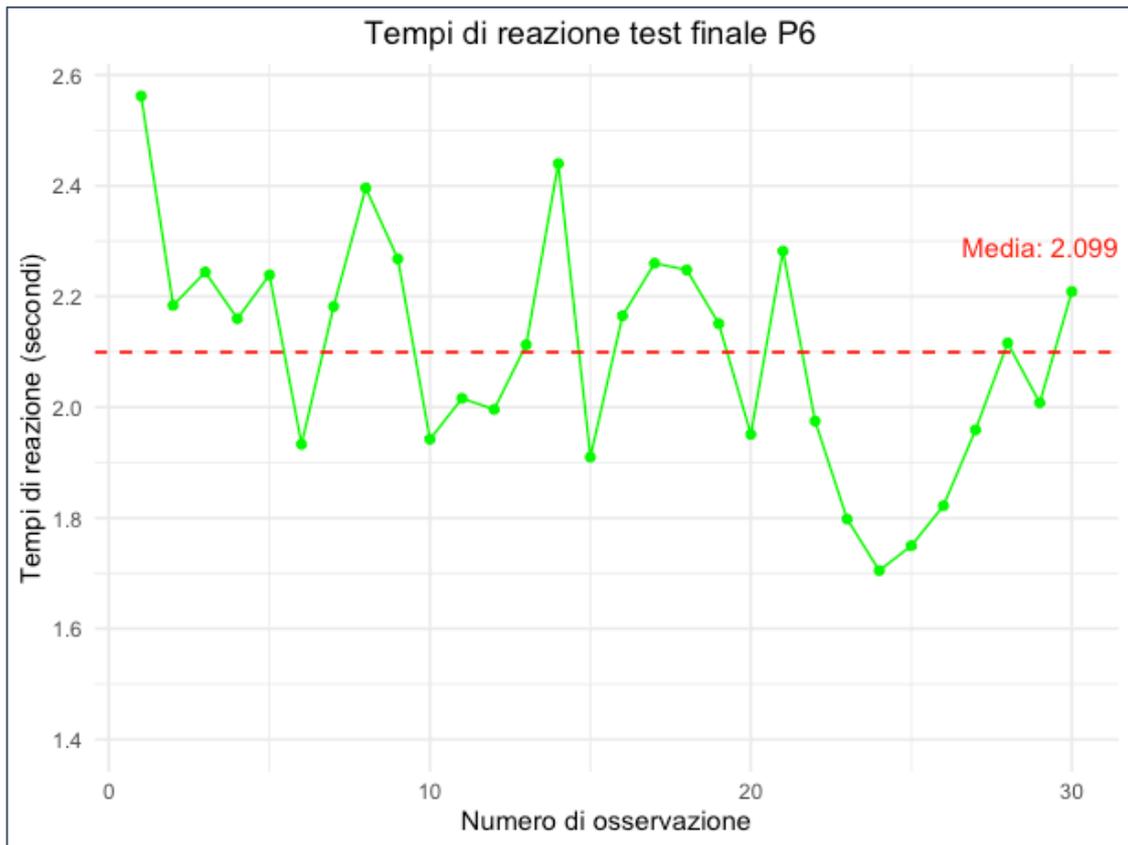


Figura 6.57 - Test uditivo finale del partecipante 6

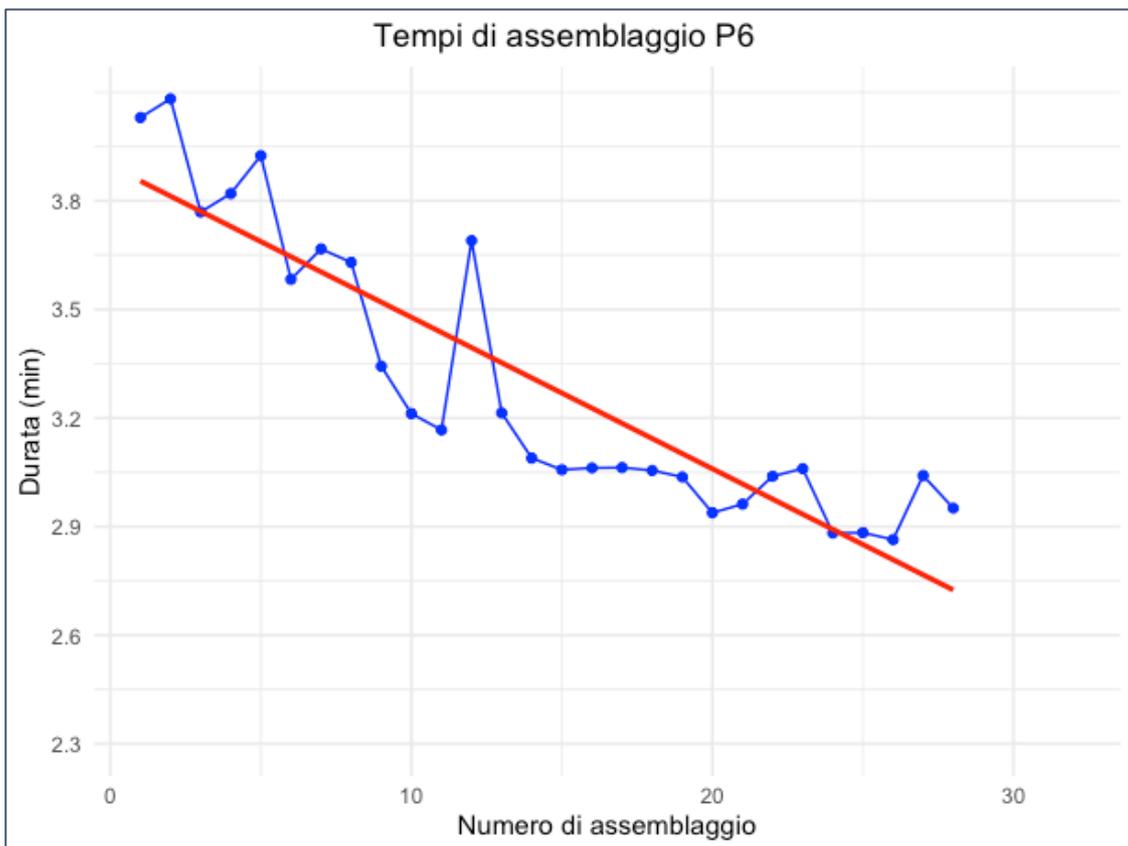


Figura 6.58 - Tempo di completamento di ogni singolo assemblaggio del partecipante 6

Il partecipante 6 ha compiuto 28 assemblaggi, tutti svolti correttamente durante la prova. La Figura 6.58 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio ed evidenzia un andamento fortemente decrescente dei tempi, dimostrando la presenza di economie di apprendimento che portano il partecipante 6 a migliorare i tempi di assemblaggio.

La Figura 6.59 riporta l'andamento dei tempi di reazione ai suoni della *secondary task*. La linea blu rappresenta il grafico relativo alla media mobile ottenuto considerando una finestra di 3 minuti. La linea in rosso riporta, invece, la retta di regressione lineare stimata sui tempi di reazione che presenta un andamento piatto durante la prova.

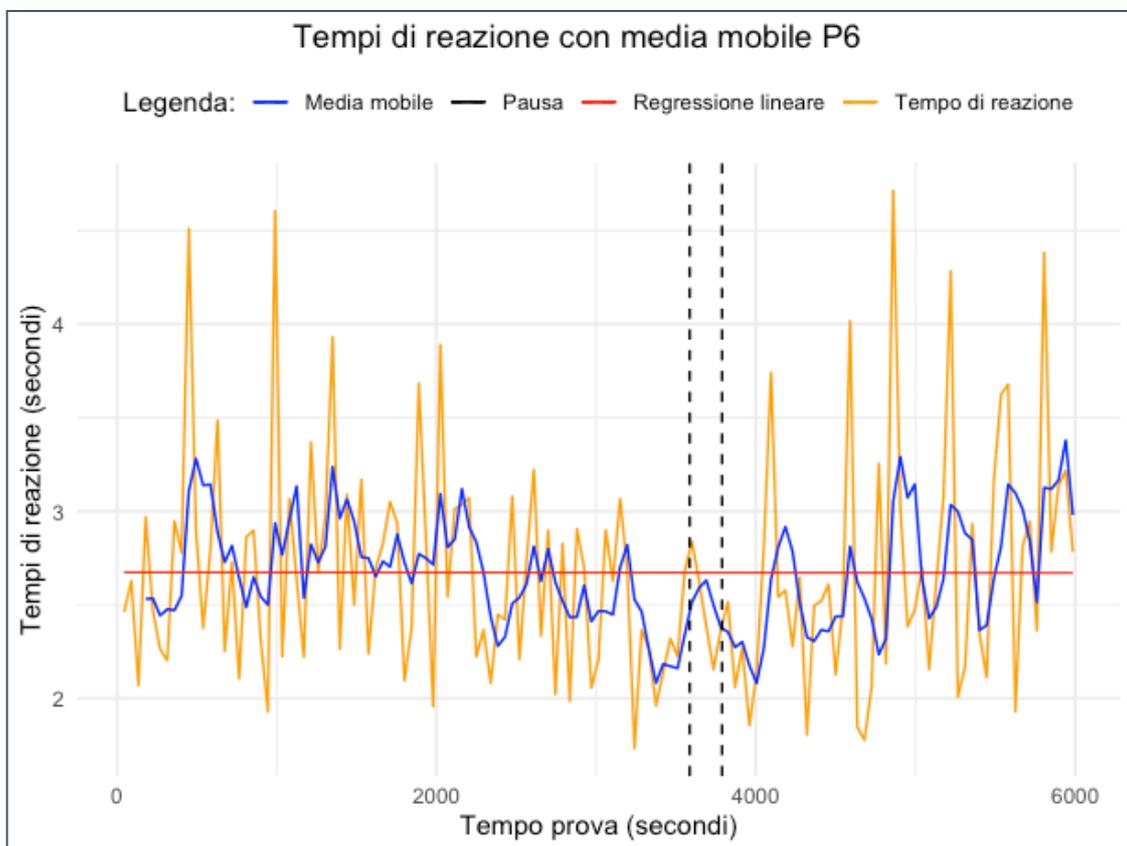


Figura 6.59 - Tempi di reazione alla *secondary task* del partecipante 6

Le prestazioni del partecipante 6, riportate in Tabella 6.19, dimostrano che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore sia rispetto al test uditivo iniziale e finale (Tabella 6.1) ed è giustificabile vista la difficoltà di compiere due compiti contemporaneamente, oltre ad avere le mani spesso impegnate al momento della riproduzione del suono. Il partecipante 6 non commette alcun errore in relazione alla *secondary task*.

Tabella 6.19 - Prestazioni della secondary task del partecipante 6

Partecipante 6	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,672 secondi
Suoni riprodotti	133
Suoni corretti	133
Suoni mancati	0
Suoni non riconosciuti correttamente	0

La Tabella 6.20 raccoglie le considerazioni del partecipante riguardo alla prova affrontata. Dalle risposte emerge la consapevolezza di sentirsi più stanco e meno reattivo alla fine della prova rispetto all'inizio, nonostante ciò, non appare confermato dai valori del compito secondario. In relazione a quest'ultima, si riporta la non invasività della task secondaria.

Tabella 6.20 - Valutazione soggettiva del partecipante 6

Feedback del partecipante P6	
20° minuto	“Si sente tranquillo”
40° minuto	“Va tutto bene, solo fastidioso che deve premere il tasto quando sente il suono e sta avvitando”
60° minuto	“Non si sente ancora stanco”
80° minuto	“Inizia a stancarsi, ma si sente più veloce nel completare l'assemblaggio”
100° minuto	“Si sente un po' annoiato per fare sempre la stessa cosa e avverte sia più facile distrarsi. Ma non si sente stanco né mentalmente né fisicamente”
Fine prova	“Esperienza definita motivante per l'uso del Cobot, lunga, ripetitiva, ma con il tempo si impara e si è più veloci. Si sente meno reattivo alla fine dell'esperimento e facilmente distraibile. Riguardo alla secondary task, ritiene sia distraente, i suoni non siano fastidiosi, il tempo tra i suoni non è poco, si creava un blocco nel momento in cui si avevano le mani impegnate. Stanco mentalmente 5”

Prendendo in esame i dati raccolti con l'Empatica E4, si analizzano i valori relativi a *skin conductance level* (SCL), *skin conductance response* (SCR) e battito cardiaco, considerati più rilevanti e significativi.

La Figura 6.60 mostra l'andamento della *skin conductance level* (SCL) durante la prova. Le linee tratteggiate in nero segnano il momento in cui sono state sostituite le batterie dell'*eye tracker*. All'inizio della prova si verifica una crescita dei valori di SCL, che tende poi a

ridursi nella parte centrale, segnalando un maggiore stato di attivazione e stress iniziale. Verso la fine della prova, i valori risultano molto variabili. In Tabella 6.21 si riporta un frammento del calcolo eseguito per calcolare la media mobile relativa alla SCR, la cui curva si comporta come quella della SCL (Figura 6.61).

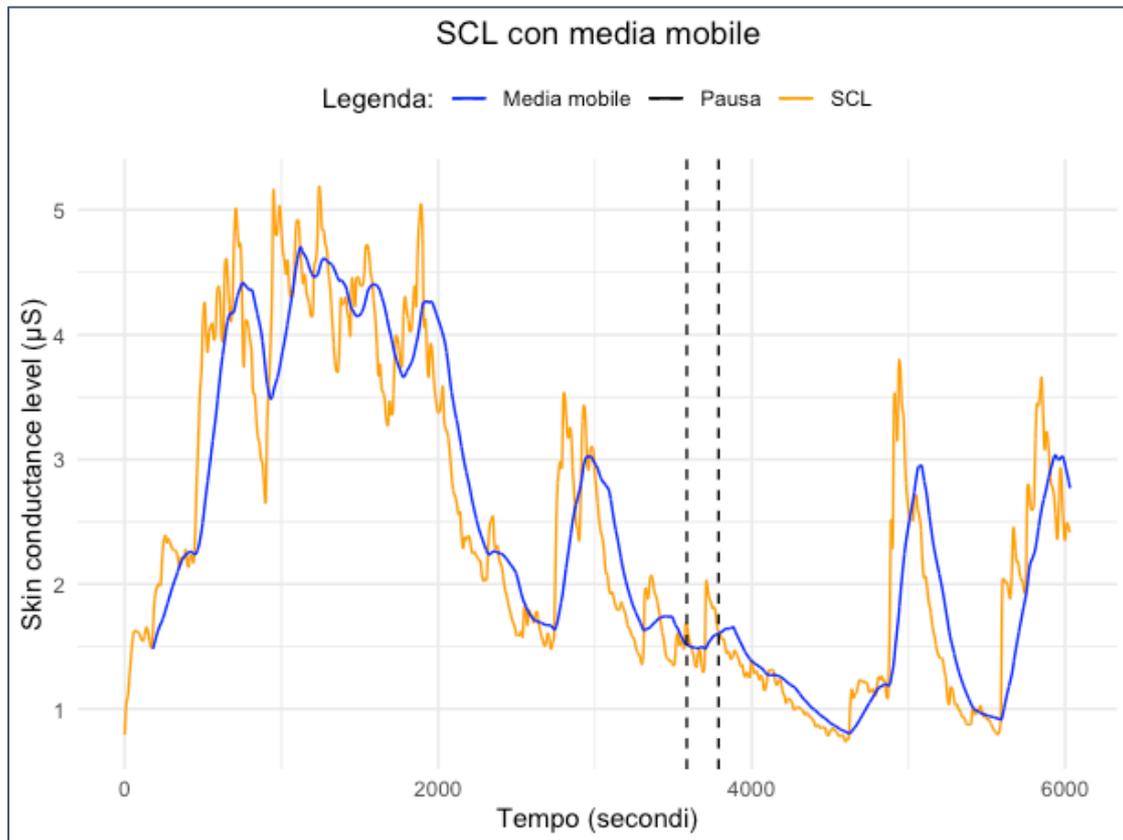


Figura 6.60 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 6

Tabella 6.21 - Rappresentazione del calcolo della media mobile su alcuni valori della prova: i primi due valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 720 valori per volta e il primo disponibile corrisponde ai 179,75 sec (ossia il 720-esimo valore contando lo 0)

Tempo prova (secondi)	SCR (μS)	Media mobile (μS)
179.25	0.583	NA
179.50	0.584	NA
179.75	0.585	0.081
180.00	0.584	0.082
180.25	0.578	0.083
180.50	0.563	0.083
180.75	0.541	0.084
181.00	0.512	0.085

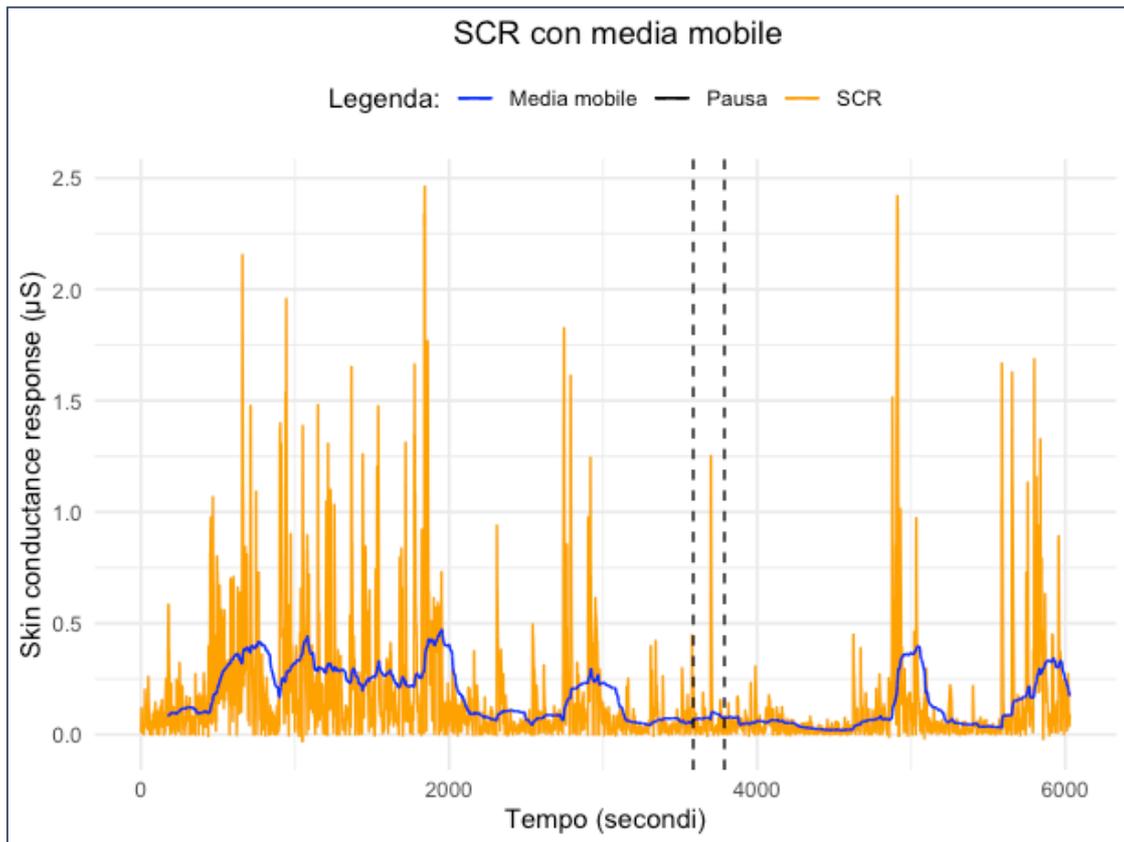


Figura 6.61 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 6

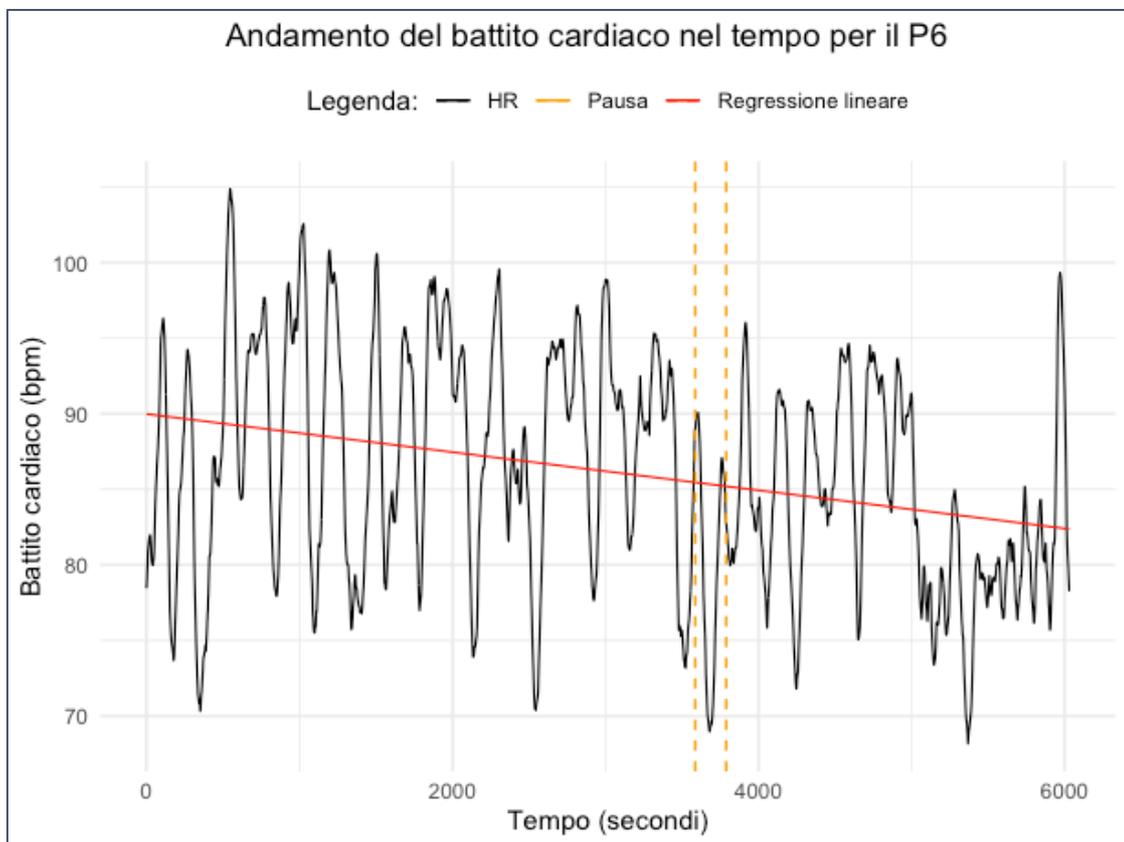


Figura 6.62 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 6

La Figura 6.62 mostra l'andamento della frequenza cardiaca del partecipante 6. La retta di regressione in rosso assume un andamento decrescente del battito cardiaco, che può essere la conseguenza di un rilassamento, nonostante aumenti l'affaticamento.

Le metriche relative all'*Eye Tracking* sono riportate nelle Figure di seguito. Il numero di fissazioni (Figura 6.63), il numero di saccadi (Figura 6.64) e il diametro pupillare (6.65) presentano una tendenza decrescente con l'avanzamento della prova. Premesso che il diametro pupillare possa essere sensibile a diversi fattori, le tre metriche potrebbero essere associate ad un affaticamento sul lungo periodo che provoca una riduzione della pupilla. Nel periodo di pausa, i dati relativi a tali misure non sono ovviamente disponibili.

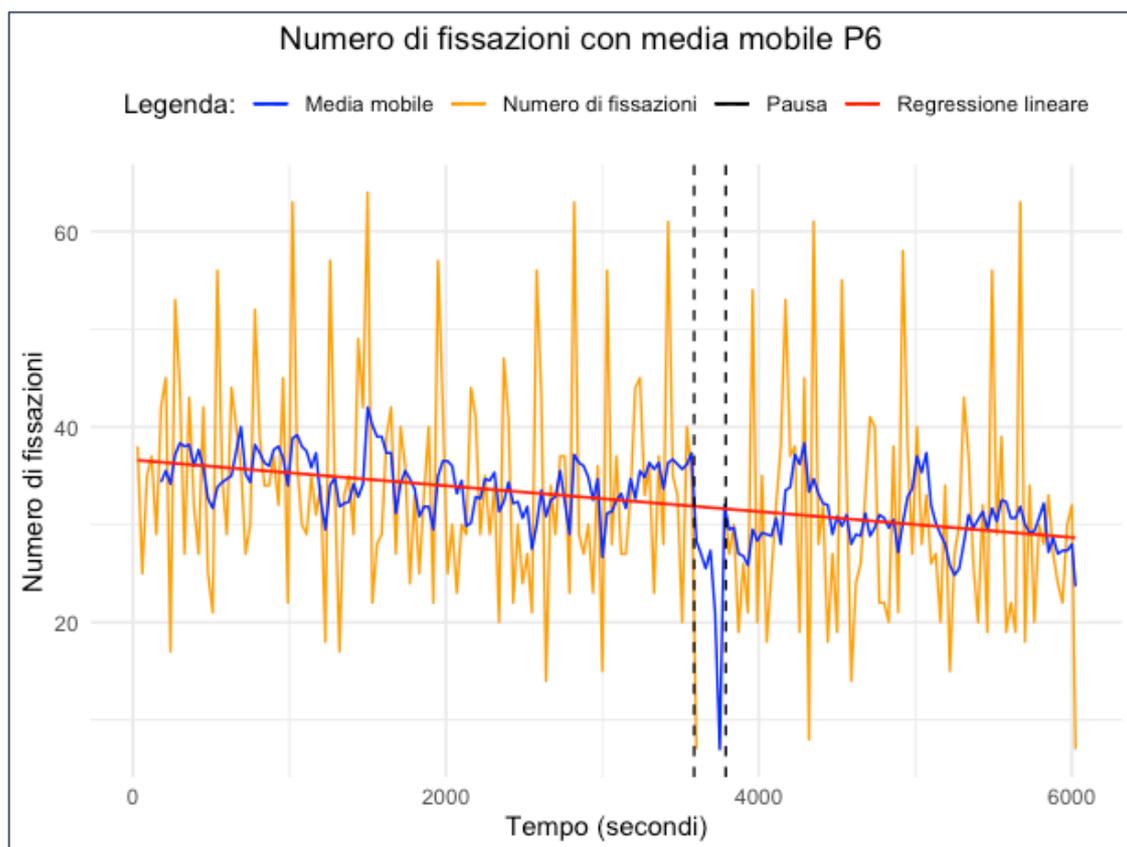


Figura 6.63 - Numero di fissazioni del partecipante 6

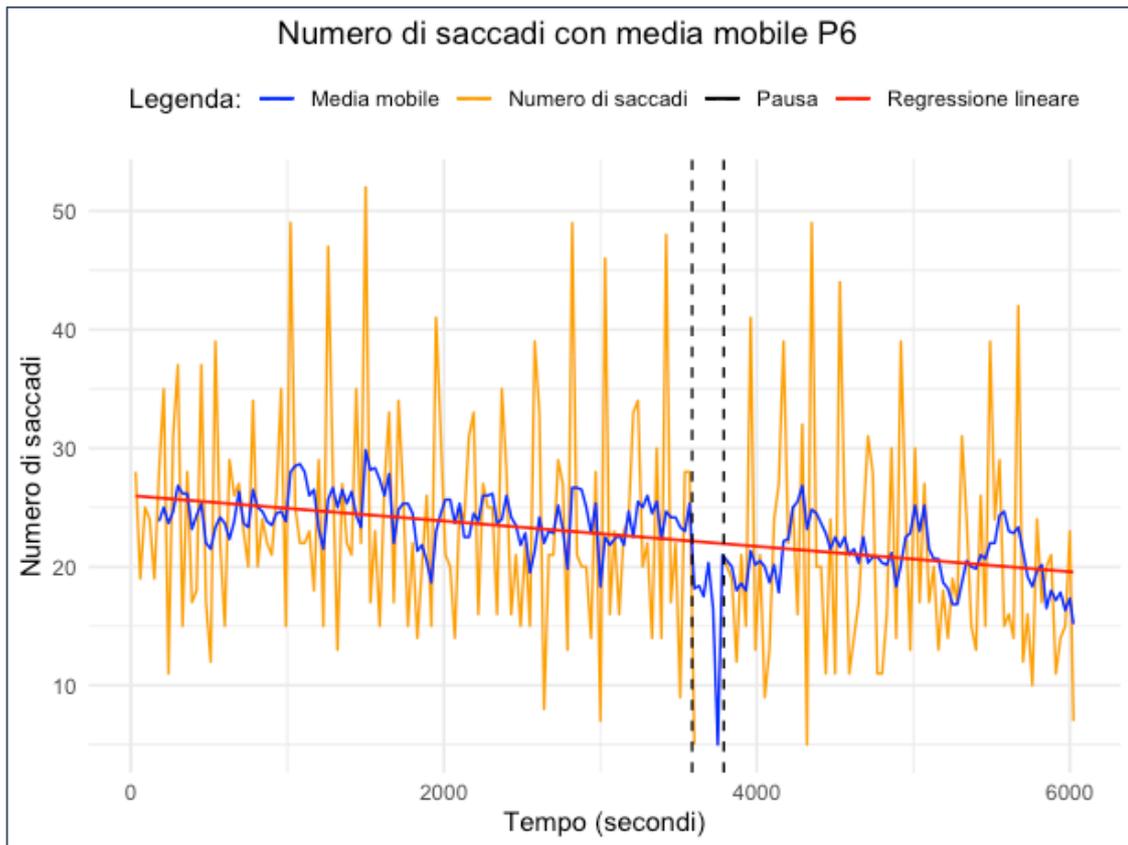


Figura 6.64 - Numero di saccadi del partecipante 6

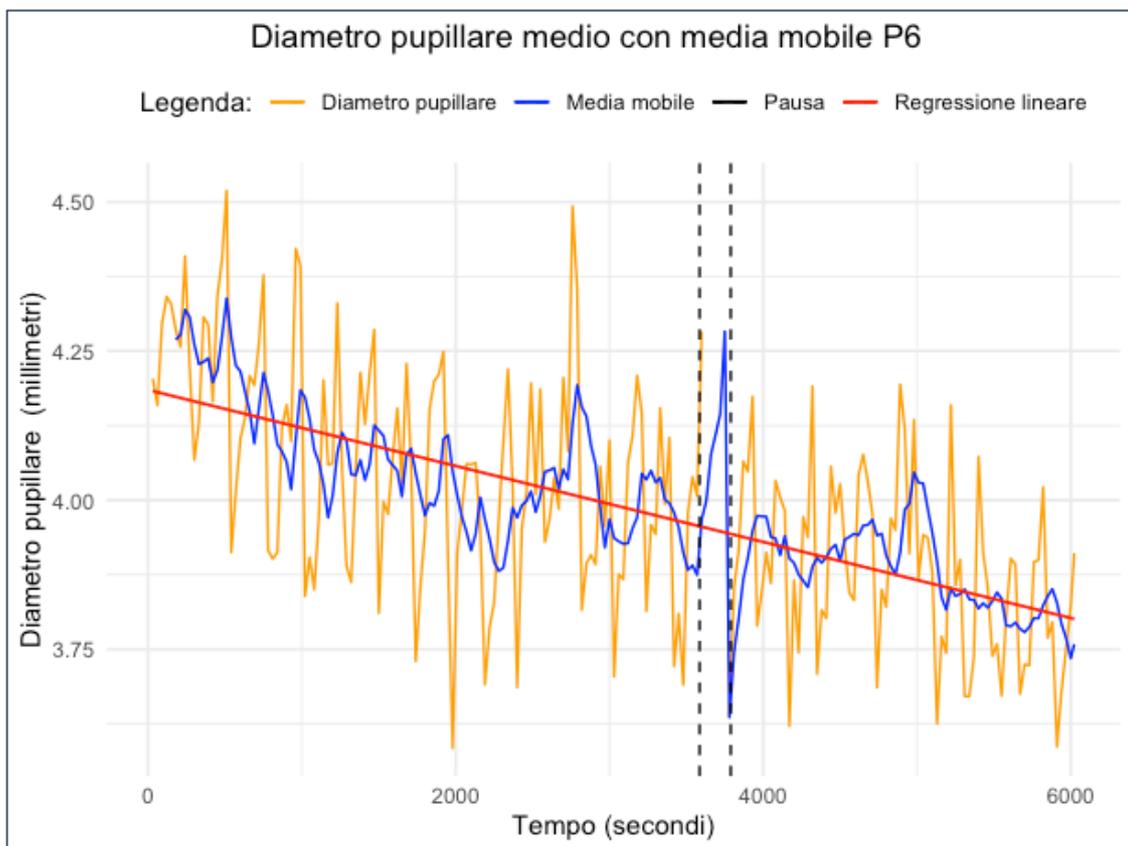


Figura 6.65 - Diametro pupillare medio del partecipante 6

6.7 Partecipante 7

Per svolgere l'analisi del partecipante 7 si riportano alcune caratteristiche identificative.

Partecipante 7	Sesso	Età	Professione
	M	25 anni	Studente-Lavoratore

Le Figure 6.66 e 6.67 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti. Vengono raffigurati insieme al valore medio di ciascuna prova e si può notare una diminuzione del valore medio nella prova finale (Tabella 6.1). Si evidenzia che, durante il test iniziale, non vengono percepiti 3 suoni, in conseguenza di un atteggiamento di disattenzione e fretta all'inizio della prova. Nel test finale, invece, il partecipante non commette errori.

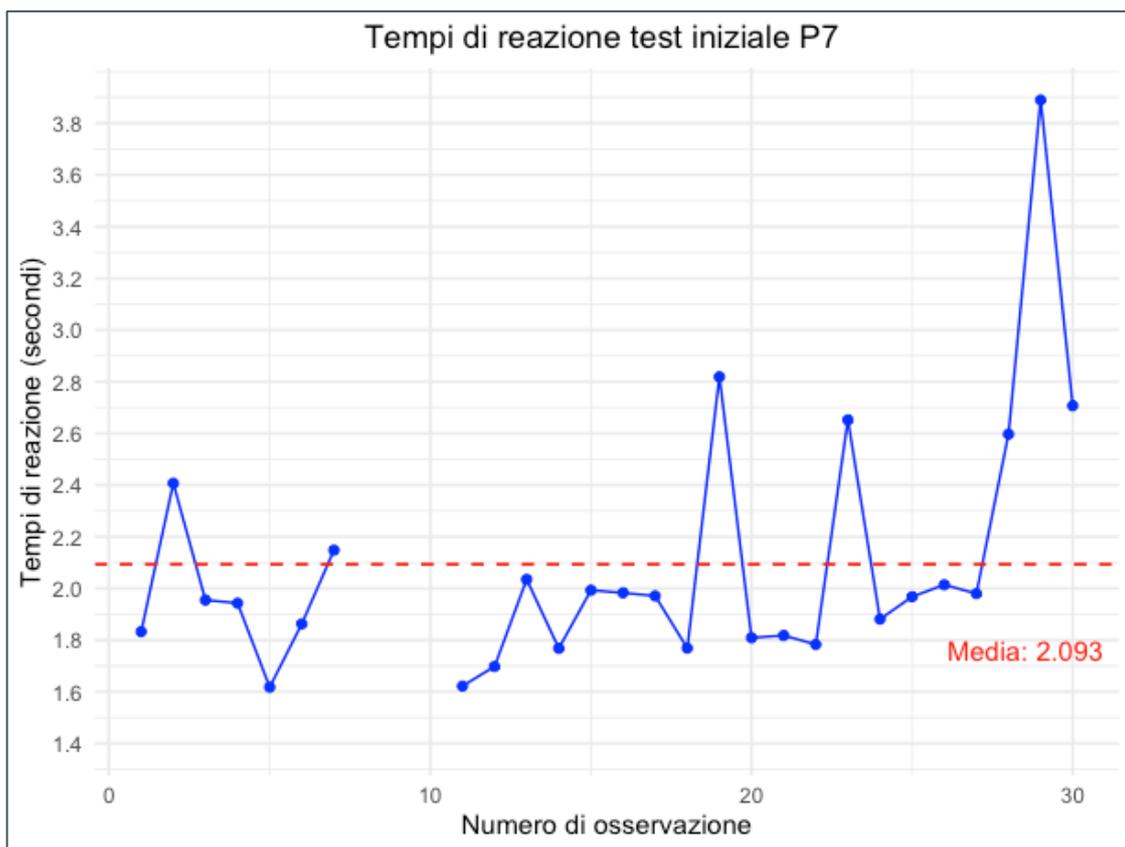


Figura 6.66 - Test uditivo iniziale del partecipante 7

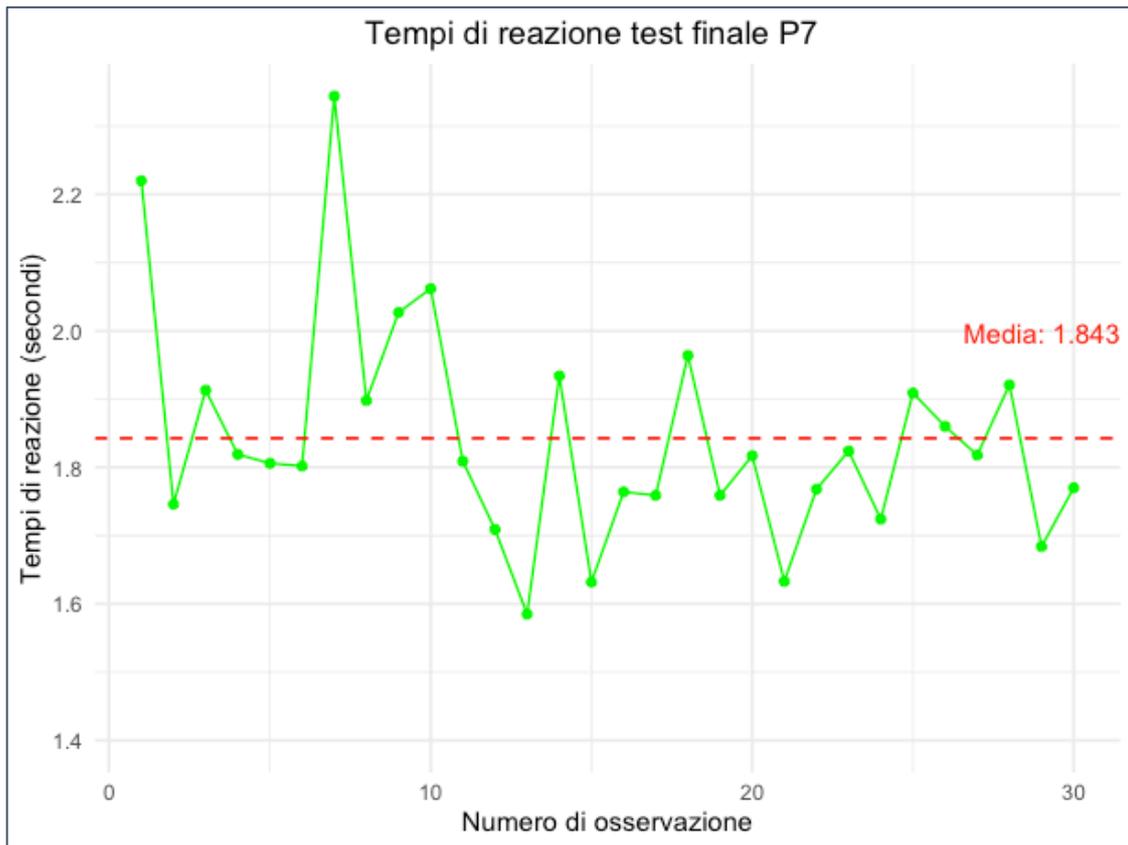


Figura 6.67 - Test uditivo finale del partecipante 7

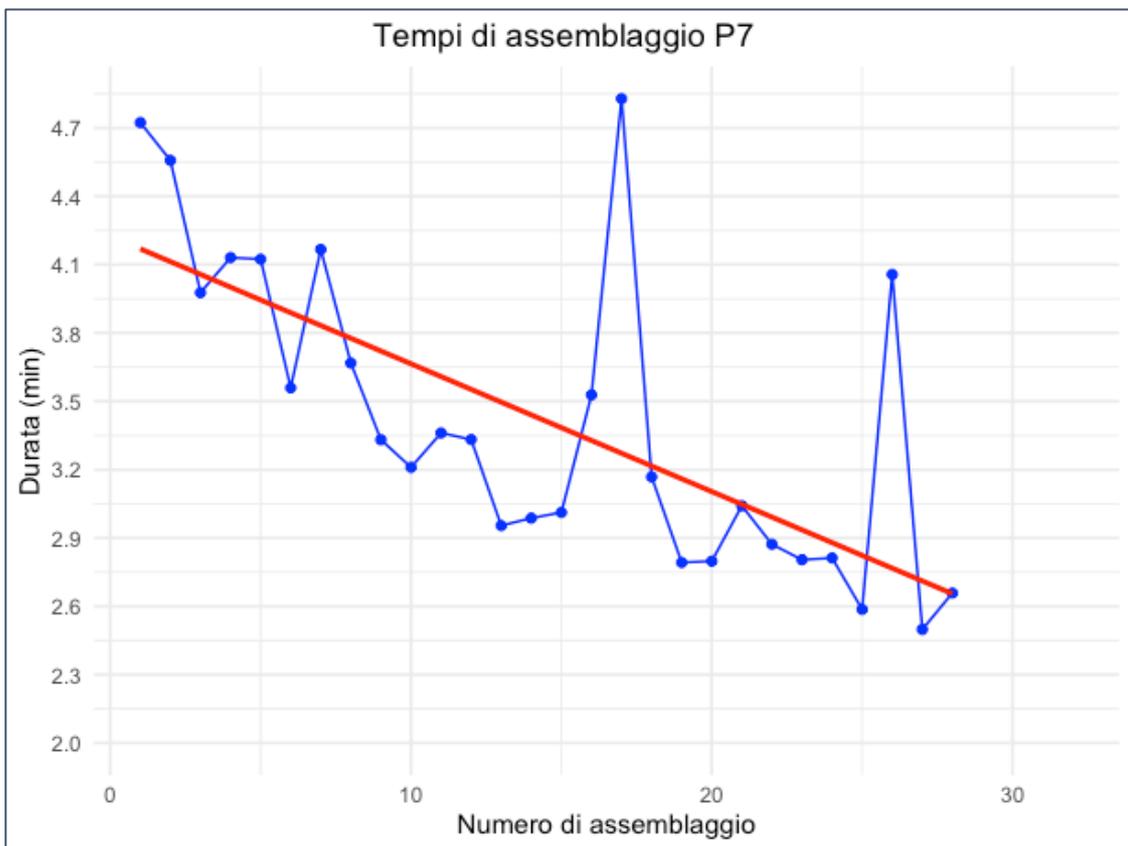


Figura 6.68 - Tempo di completamento di ogni singolo assemblaggio del partecipante 7

Il partecipante 7 ha completato correttamente 28 assemblaggi. La Figura 6.68 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio, dove si può osservare un andamento complessivo decrescente dei tempi, dovuto alla presenza di economie di apprendimento. Si registrano due forti aumenti nei tempi dovuti all'ultima fase di assemblaggio, ossia quella dell'inserimento del tappo nel blocco motore che non si incastrava facilmente.

Per quanto riguarda i dati relativi alla *secondary task* durante la prova, la Figura 6.69 riporta tempi di reazione ai suoni rilevati. Si registra una lieve crescita nei tempi di risposta nel corso della prova, ad indicare un maggior carico cognitivo.

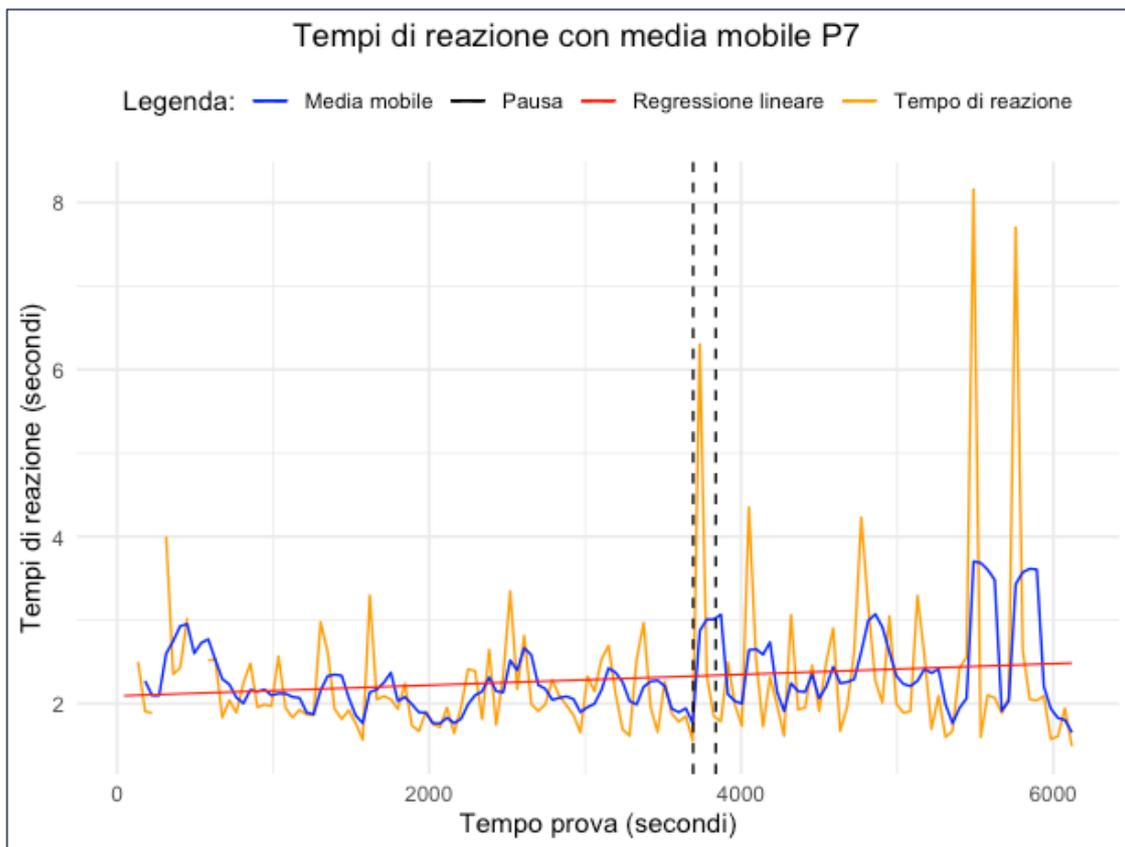


Figura 6.69 - Tempi di risposta alla *secondary task* del partecipante 7

La Tabella 6.22 mostra che il tempo medio di risposta ai suoni è superiore sia rispetto al test uditivo iniziale che finale, comprensibile visto il carico cognitivo maggiore nello svolgere due compiti contemporaneamente e delle operazioni di assemblaggio. Si può notare, inoltre, che durante la prova, specialmente nella parte iniziale vengono commessi diversi errori: 4

suoni non rilevati e 6 riconosciuti erroneamente. Con l'avanzamento della prova, il partecipante sembra abituarsi al compito, migliorando i risultati.

Tabella 6.22 - Prestazioni della secondary task del partecipante 7

Partecipante 7	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,297 secondi
Suoni riprodotti	136
Suoni corretti	126
Suoni mancati	4
Suoni non riconosciuti correttamente	6

Dalla Tabella 6.23 si percepisce una sensazione di stanchezza e noia che aumentano nel corso della prova, nonostante il partecipante si senta più sicuro nel montaggio e più veloce. La task secondaria viene classificata come fastidiosa, soprattutto nei momenti in cui le mani sono impegnate nell'assemblaggio.

Tabella 6.23 - Valutazione soggettiva del partecipante 7

Feedback del partecipante P7	
20° minuto	“Si sente tranquillo, ma un po' annoiato”
40° minuto	“Va tutto bene, solo annoiato”
60° minuto	“Non si sente ancora stanco, ma molto annoiato”
80° minuto	“Si annoia sempre di più e trova che i Tobii Pro Glasses 3 siano pesanti e fastidiosi”
100° minuto	“Avverte fastidio agli occhi ed è stanco fisicamente, non riesce ad inserire bene le viti subito”
Fine prova	“Esperienza definita lunga e noiosa, stanco anche fisicamente. Si sente veloce rispetto all'inizio nel completamento dell'assemblaggio. Ritene la posizione del blocco motore e quella del vassoio scomode. La <i>secondary task</i> è fastidiosa, soprattutto se capita nei momenti in cui si è impegnati (viene da rimandare il premere il tasto corrispondente per dare priorità all'assemblaggio). Stanco mentalmente: 6”

I dati dell'Empatica E4 portano alle seguenti rappresentazioni: sia SCL (Figura 6.70) che SCR (Figura 6.71) riportano un andamento crescente dei valori registrati durante la prova, dimostrando uno stato di maggiore attivazione e stress.

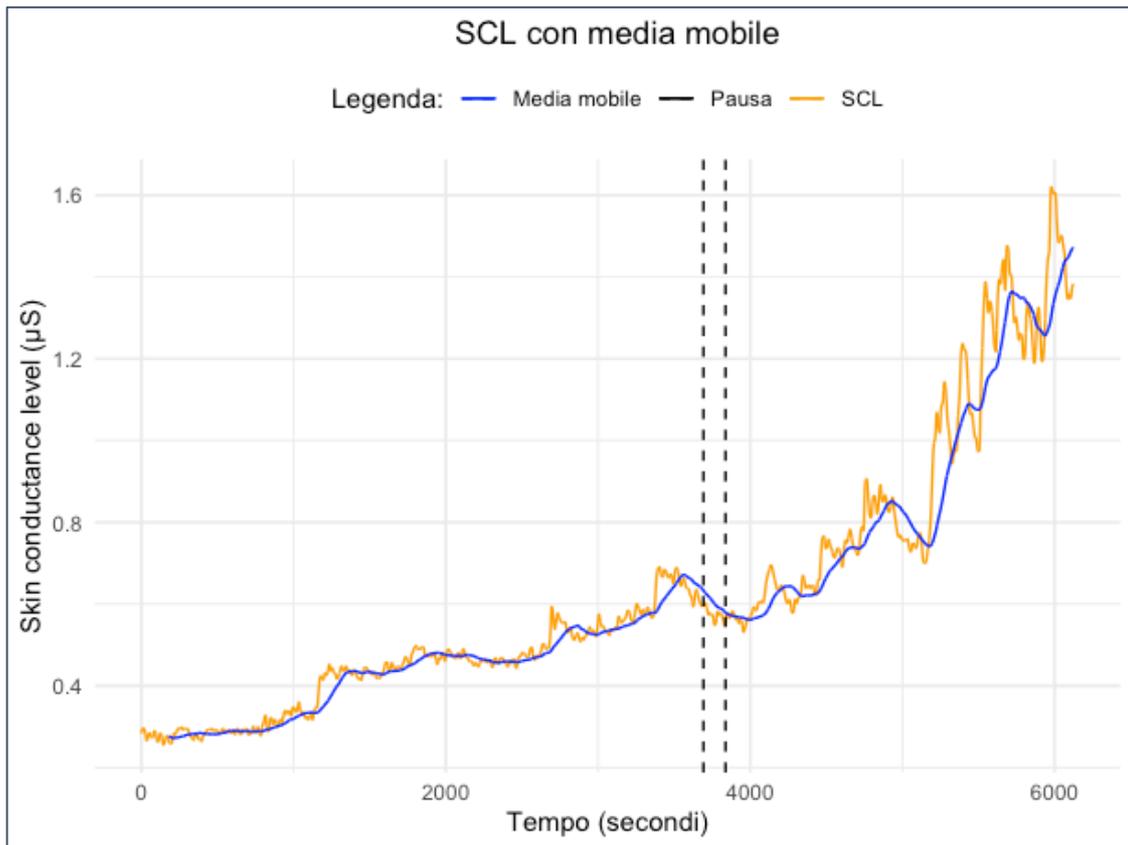


Figura 6.70 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 7

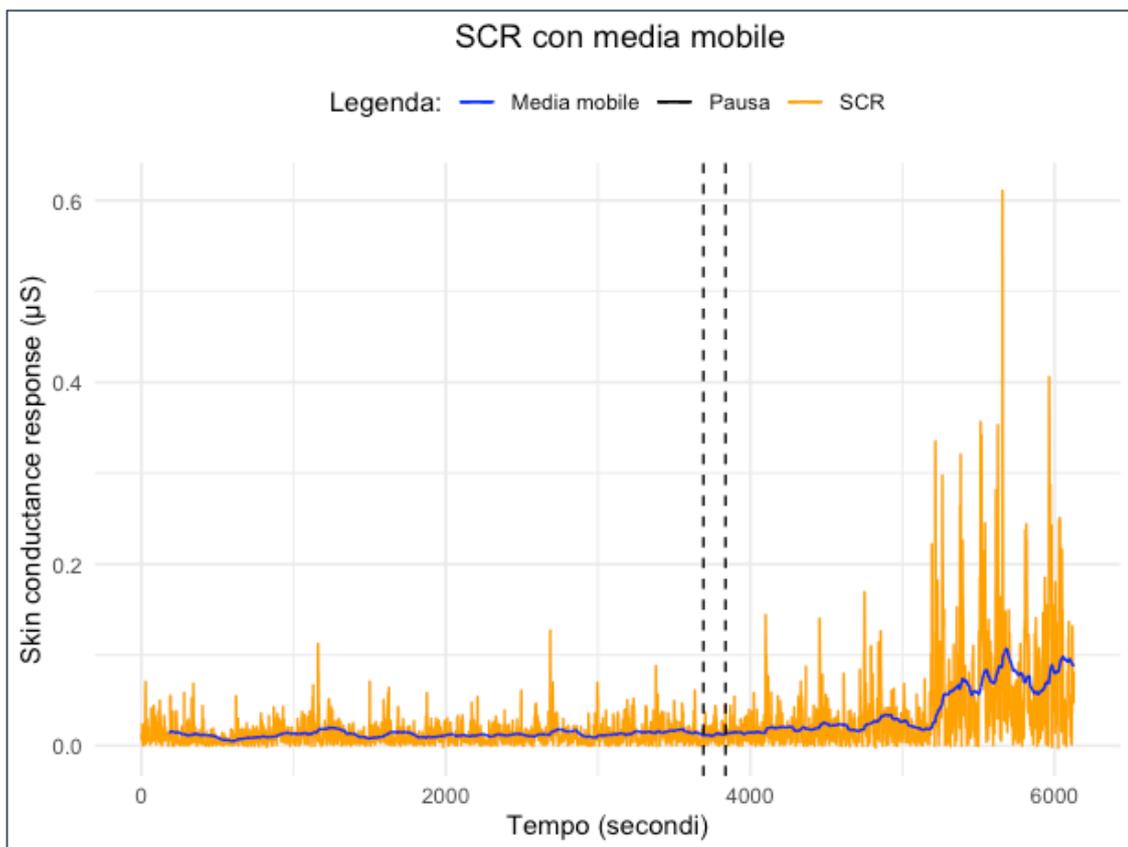


Figura 6.71 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 7

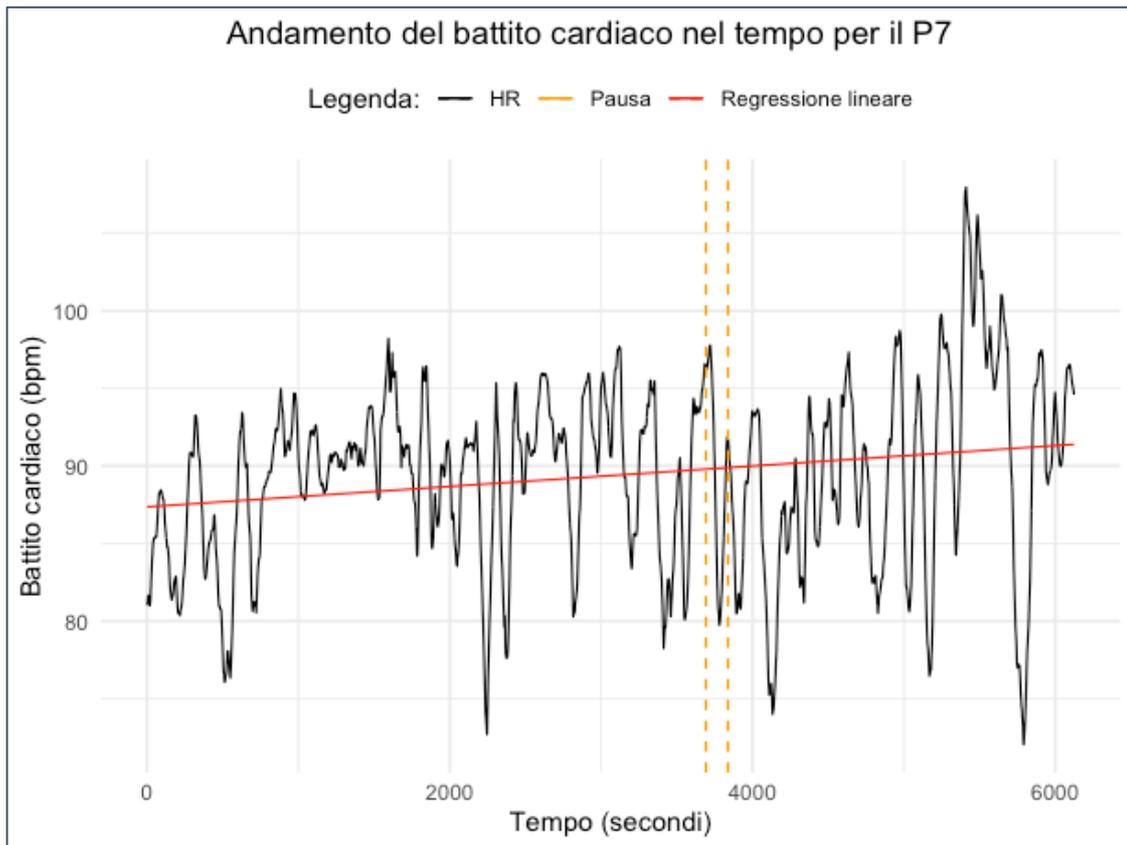


Figura 6.72 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 7

L'andamento del battito cardiaco (Figura 6.72) del partecipante 7 aumenta nel corso della prova di assemblaggio e ciò permette di affermare che nella parte finale il carico cognitivo sia maggiore e pure lo stato di stress associato.

Continuando l'analisi con i dati ottenuti tramite l'*eye tracker*, è possibile rappresentare le metriche di *Number of whole fixation starts*, *Average whole fixation pupil diameter*, *Number of saccade starts*. Il numero di fissazioni ha un andamento crescente (Figura 6.73), mentre il numero di saccadi (Figura 6.74) mostra una dinamica di modesta riduzione. Anche il diametro pupillare registra un forte aumento (6.75) riferibile ad un aumento del carico cognitivo. Nel periodo di cambio batteria, appare il vuoto di dati dovuto allo spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3.

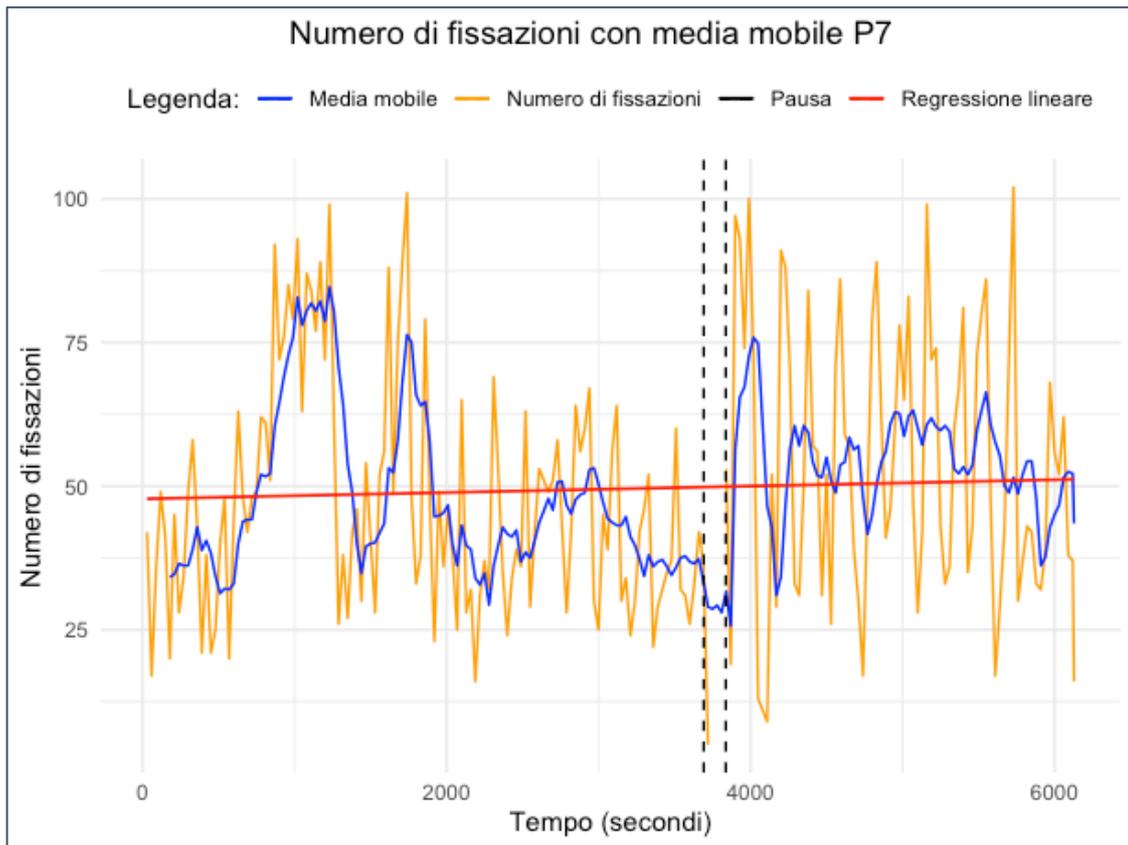


Figura 6.73 - Numero di fissazioni del partecipante 7

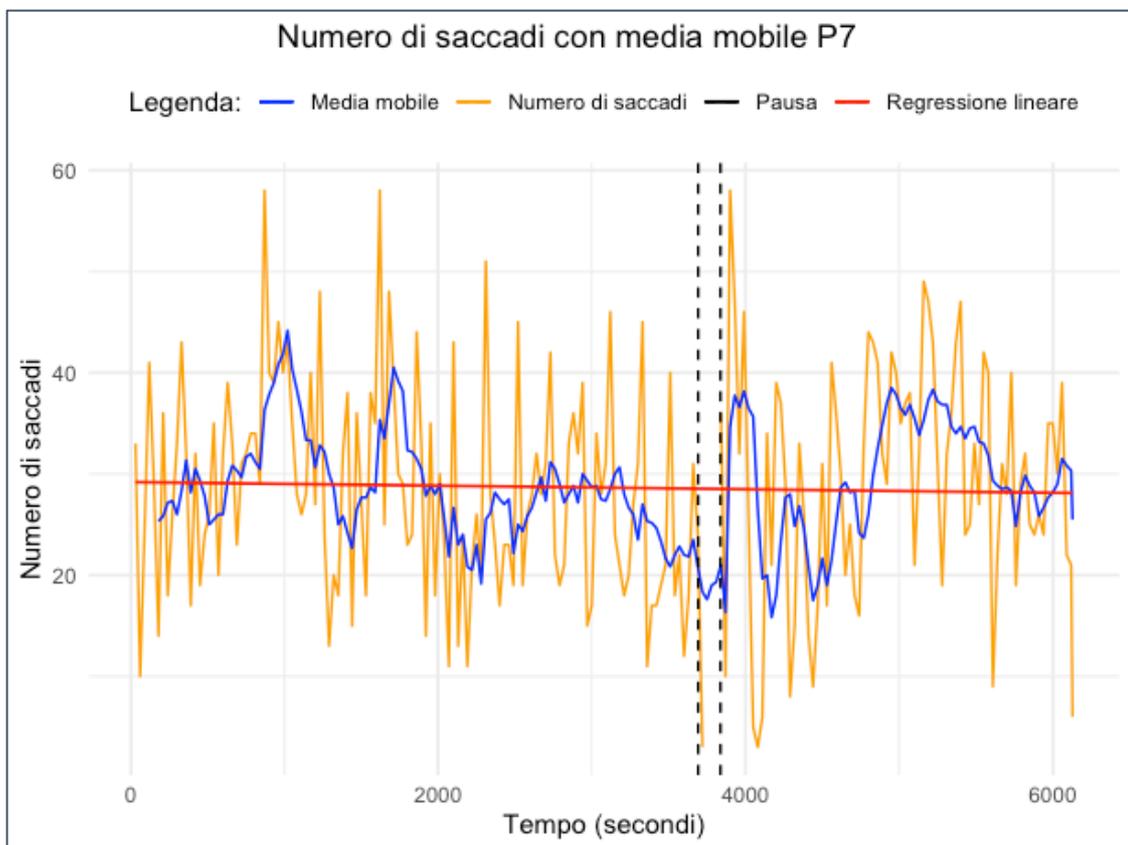


Figura 6.74 - Diametro pupillare medio del partecipante 7

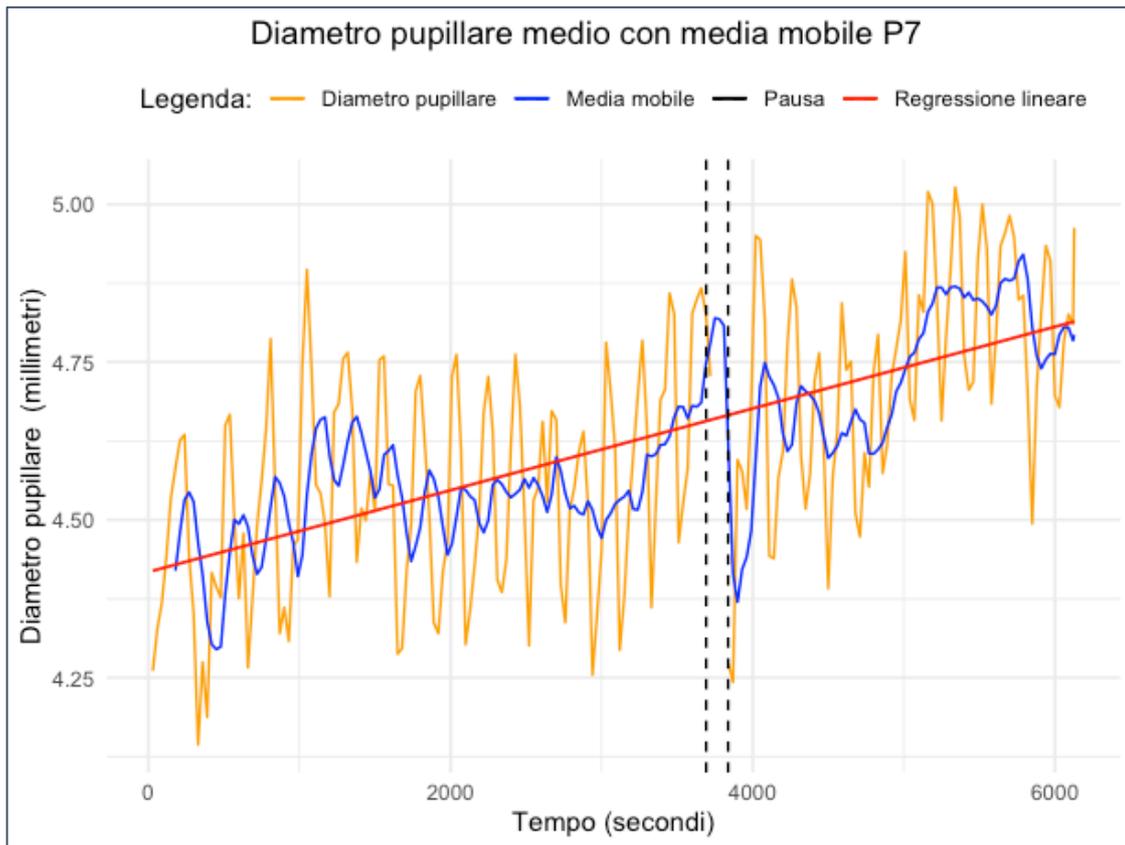


Figura 6.75 - Numero di saccadi del partecipante 7

6.8 Partecipante 8

Infine, per completare l'analisi si riportano alcune caratteristiche identificative dell'ultimo partecipante.

Partecipante 8	Sesso	Età	Professione
	M	24 anni	Studente-Lavoratore

Le Figure 6.76 e 6.77 rappresentano i tempi di reazione in risposta ai due test, iniziale e finale, dei 30 suoni riprodotti. Vengono raffigurati insieme al valore medio di ciascuna prova e si può notare un valore minore nel test uditivo finale (Tabella 6.1). Si verifica anche un rapido miglioramento delle prestazioni dopo i primi suoni del test uditivo iniziale. Non si registrano errori durante la prova.

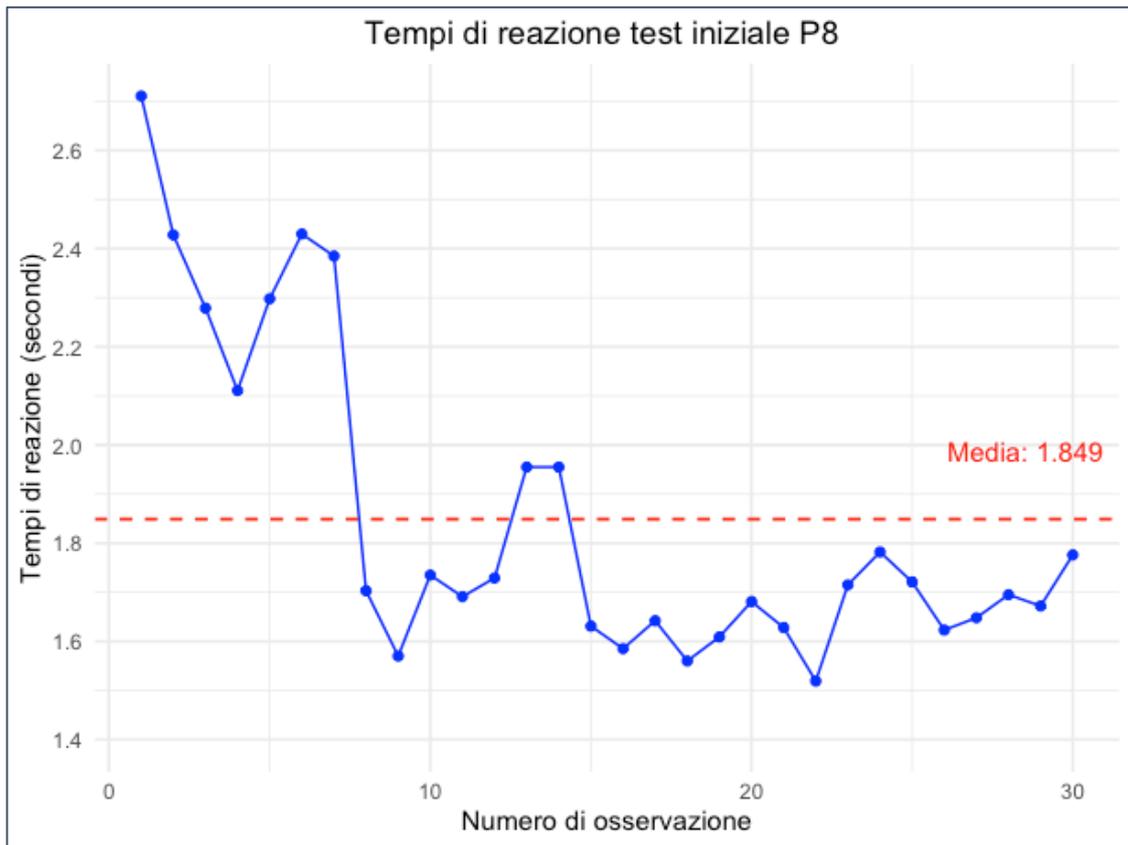


Figura 6.76 - Test uditivo iniziale del partecipante 8

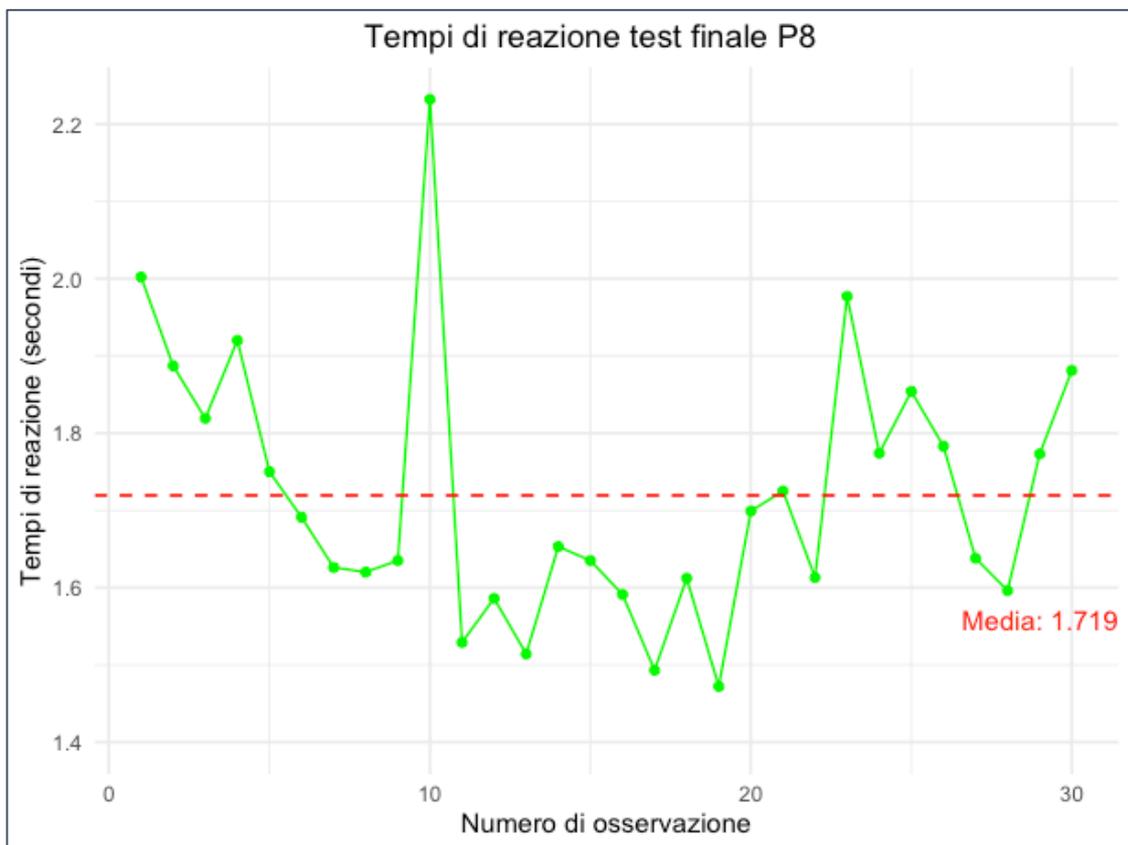


Figura 6.77 - Test uditivo finale del partecipante 8

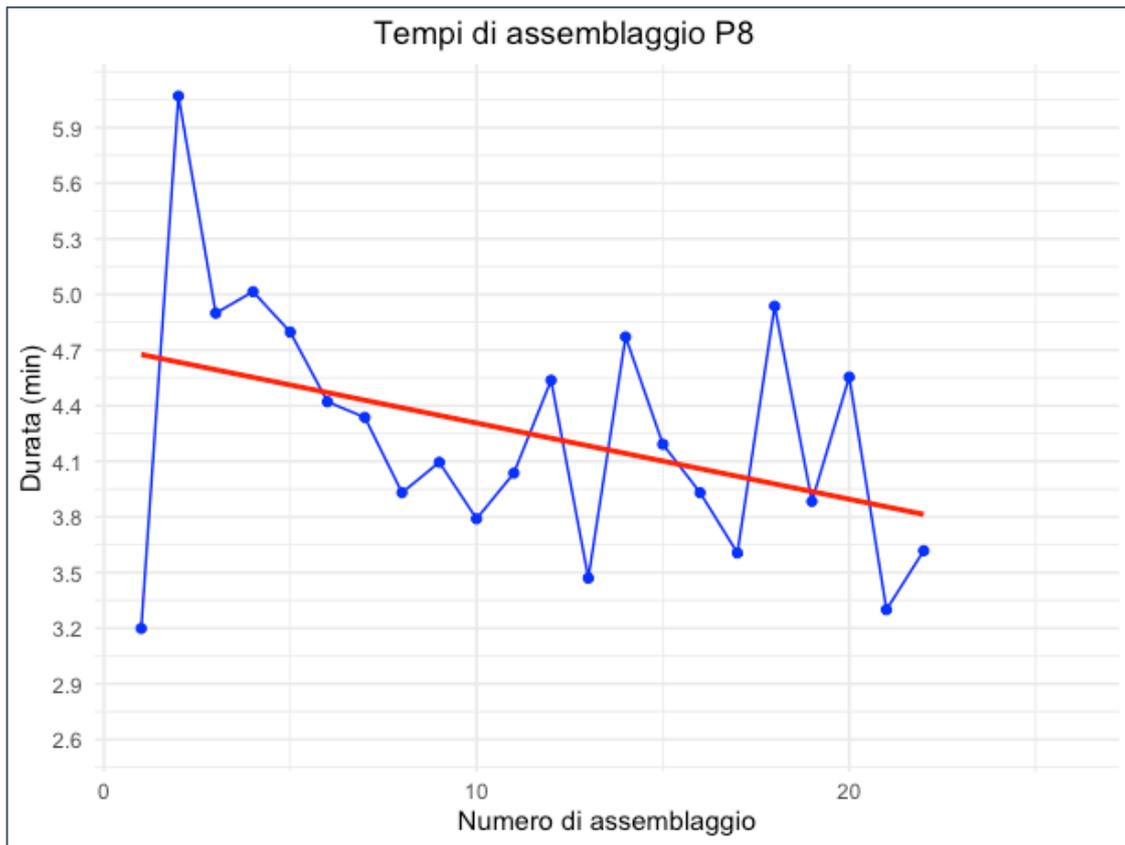


Figura 6.78 - Tempo di completamento di ogni singolo assemblaggio del partecipante 8

Il partecipante 8 ha compiuto 22 assemblaggi, tutti svolti correttamente, a parte un'incertezza durante un assemblaggio in cui si è dimenticato di far prendere il pezzo al Cobot e lo ha preso manualmente. La Figura 6.78 rappresenta la durata di ogni singolo assemblaggio e segnala un andamento complessivamente decrescente dei tempi, a conferma di una maggiore velocità. Tuttavia, dall'assemblaggio numero 12 in poi, si registrano forti aumenti della durata di assemblaggio, che possono essere associati ad un rallentamento dovuto all'affaticamento e carico cognitivo maggiore.

In Figura 6.79 si riporta l'andamento dei tempi di reazione ai suoni della *secondary task* durante la prova, che risulta essere crescente. Ciò può significare che l'aumento nei tempi di reazione può riflettere un innalzamento del carico cognitivo che coinvolge il partecipante.

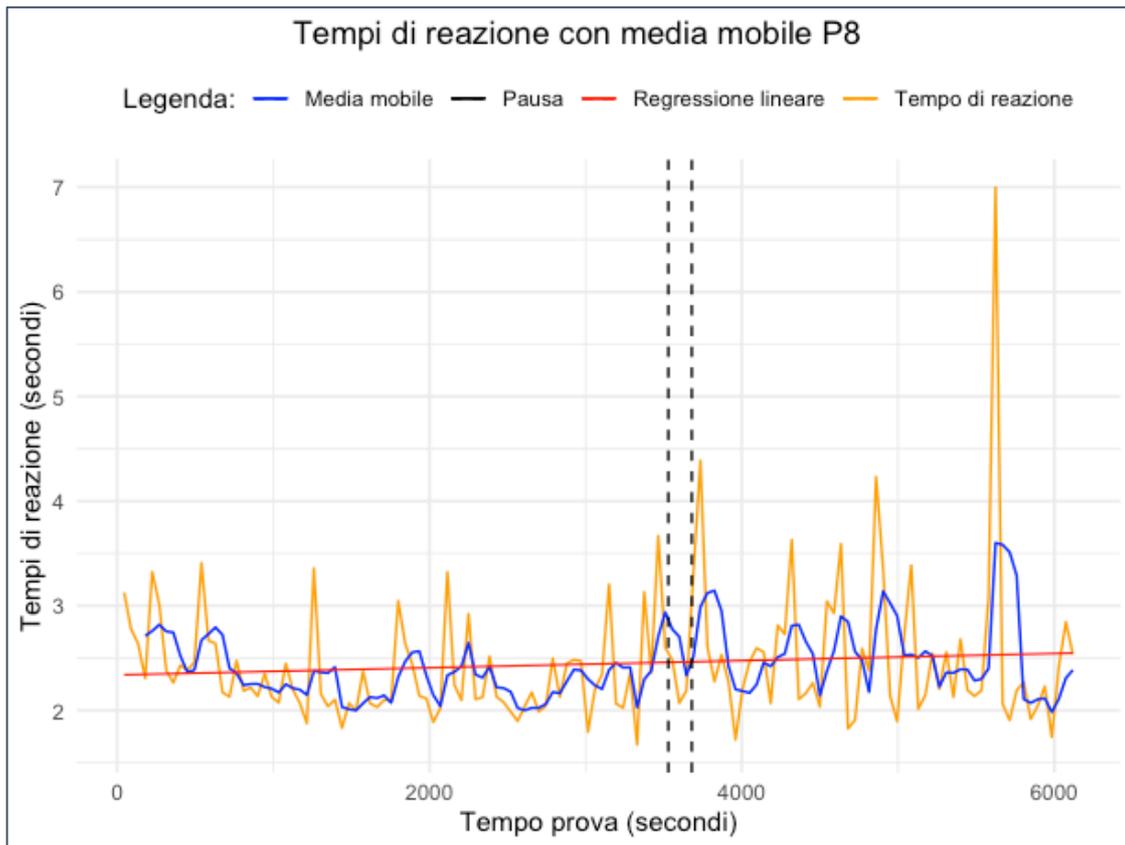


Figura 6.79 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 8

Il tempo medio di risposta ai suoni durante l'assemblaggio (Tabella 6.24) è superiore sia rispetto al test uditivo iniziale e finale (Tabella 6.1) e ciò è dovuto ad un probabile aumento del carico cognitivo. La prova viene svolta senza commettere errori.

Tabella 6.24 - Prestazioni della secondary task del partecipante 8

Partecipante 8	
Media dei tempi di reazione durante la prova	2,444 secondi
Suoni riprodotti	136
Suoni corretti	136
Suoni mancati	0
Suoni non riconosciuti correttamente	0

Le risposte del partecipante 8 (Tabella 6.25) rivelano una crescente stanchezza e voglia di terminare l'esperimento il prima possibile. Molto importante è il feedback sulla task secondaria, che conferma la non invasività del compito progettato, nonostante sia considerata delle volte fastidiosa.

Tabella 6.25 - Valutazione soggettiva del partecipante 8

Feedback del partecipante P8	
20° minuto	“Va tutto bene”
40° minuto	“Va tutto bene, solo annoiato”
60° minuto	“Si annoia sempre di più ed è infastidito dal suono che capita mentre sta assemblando”
80° minuto	“E' molto annoiato, pensa di essere partito male, poi aver migliorato e ora di nuovo peggiorato nei tempi di assemblaggio”
100° minuto	“E' stanco, non vede l'ora che la prova finisca”
Fine prova	“Esperienza definita stancante e frustrante. La <i>secondary task</i> crea poco fastidio, solo un po' snervante quando capita in momenti in cui si è costretti ad interrompere l'assemblaggio e ricominciare dallo step precedente. Stanco mentalmente: 7”

Proseguendo con l'analisi, in Figura 6.80 viene mostrato l'andamento della SCL. Il grafico in blu costruito con una media mobile su una finestra di 3 minuti assume un andamento altalenante, come anche il grafico della SCR (Figura 6.81). È visibile una modesta crescita dei valori di SCL nella parte finale della prova che può indicare una maggiore attivazione del sistema nervoso.

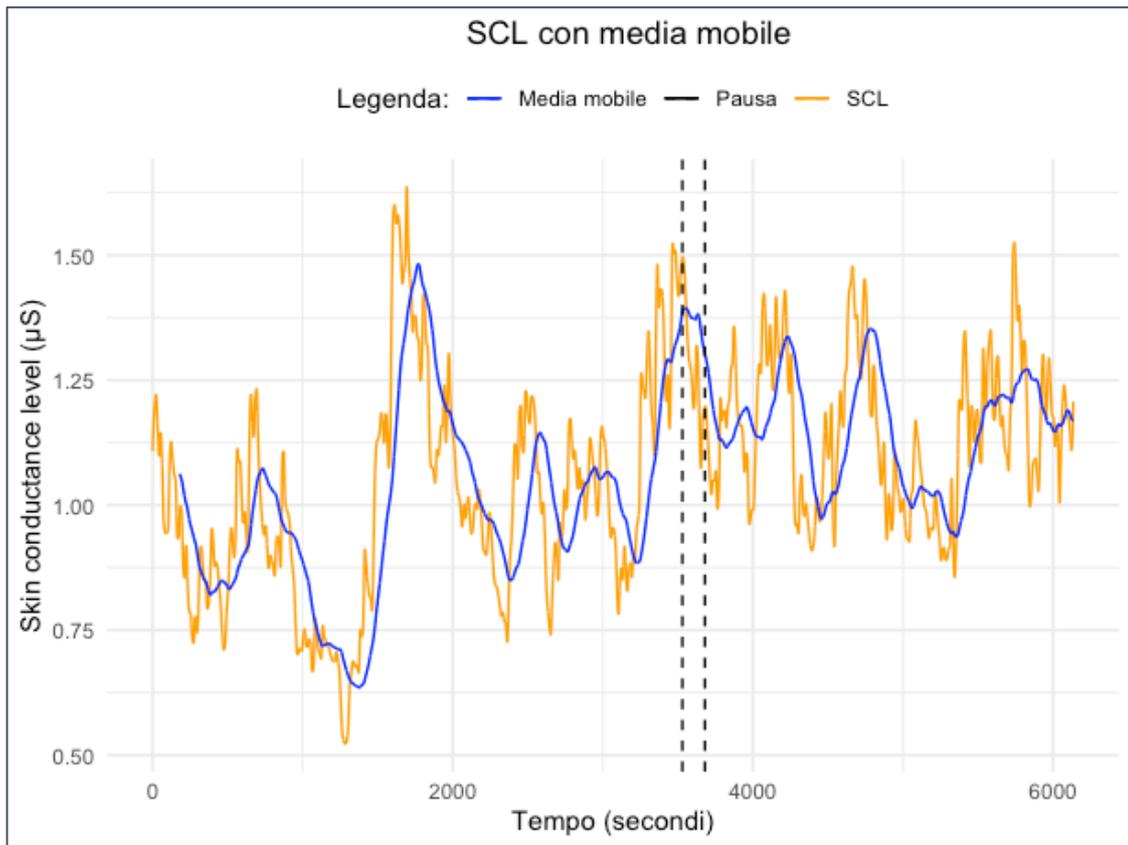


Figura 6.80 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 8

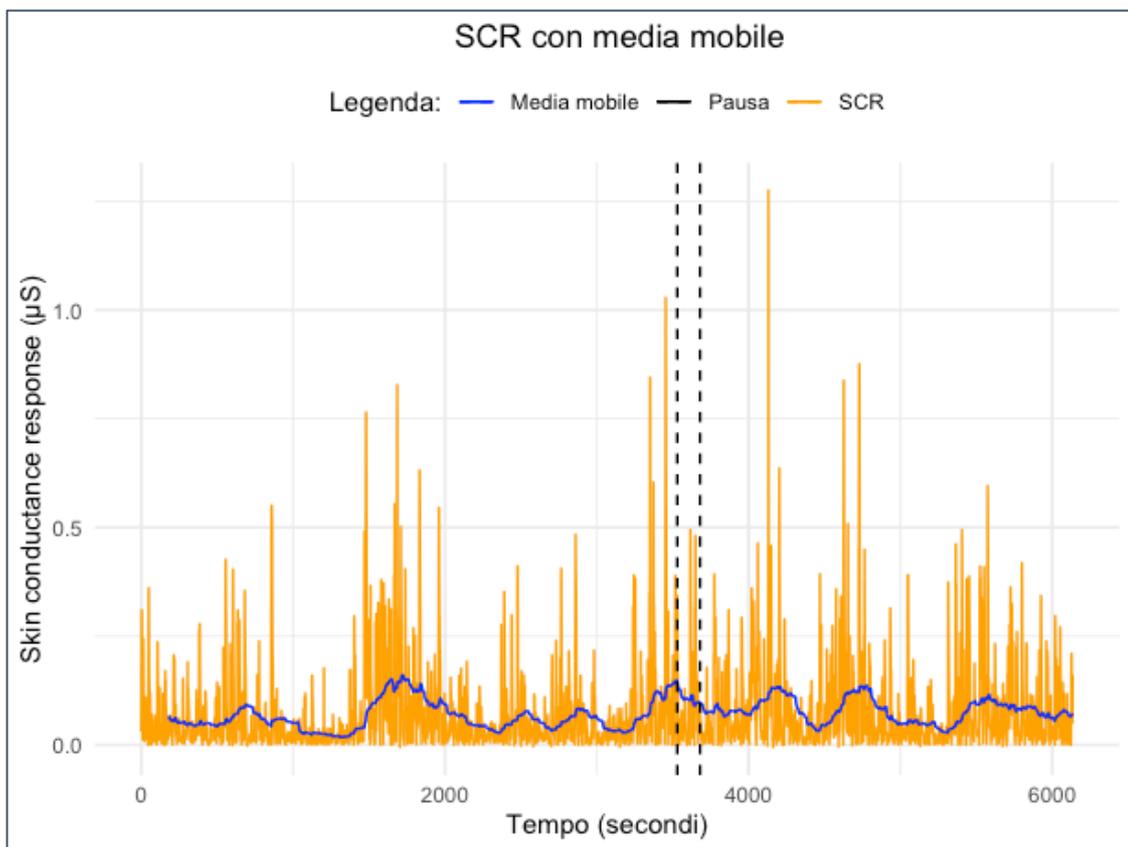


Figura 6.81 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 8

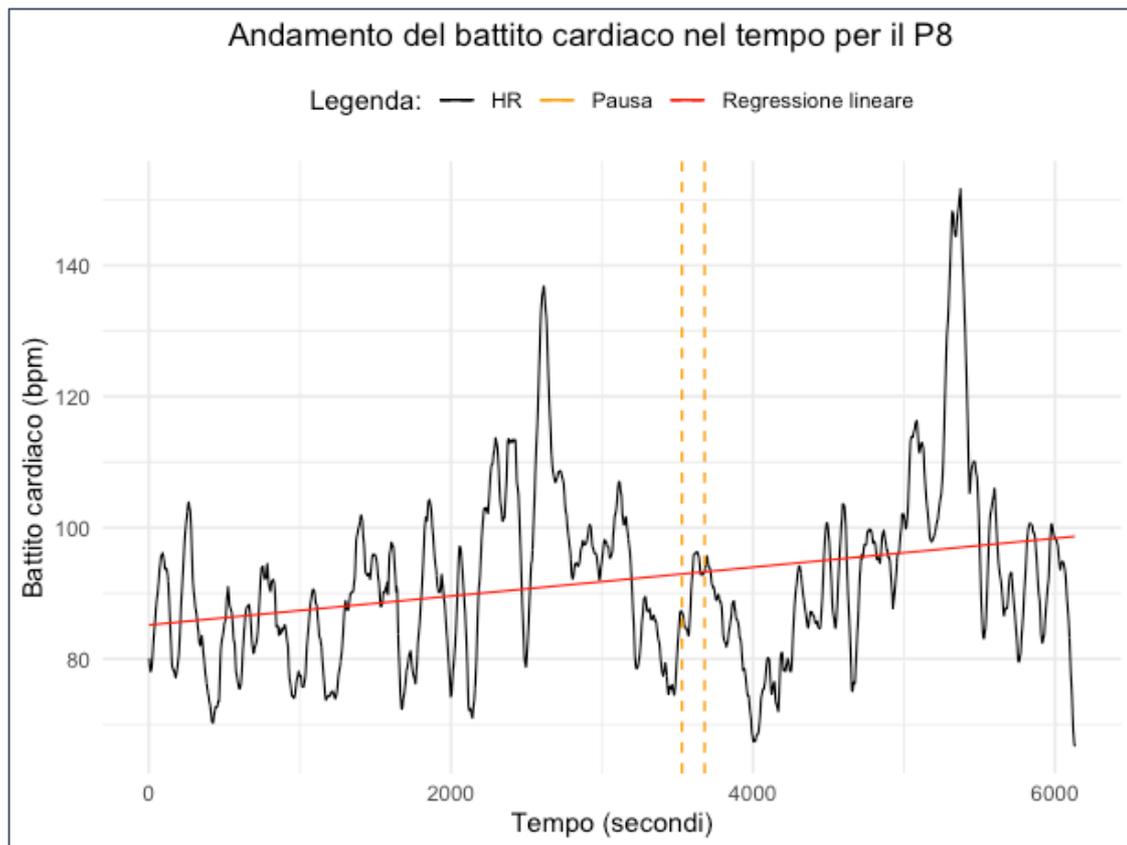


Figura 6.82 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 8

La Figura 6.82 mostra l'andamento del battito cardiaco del partecipante 8 durante la prova. La retta di regressione in rosso dimostra un andamento crescente del battito cardiaco, che può far ritenere che nella parte finale della prova il carico cognitivo sia maggiore e pure lo stato di stress associato.

Vengono, infine, analizzate le metriche relative al tracciamento oculare. Il numero di fissazioni (Figura 6.83), come il numero di saccadi (Figura 6.84) presentano un andamento crescente, che conducono a ritenere ci sia un aumento del carico cognitivo con l'avanzamento della prova. Il diametro pupillare medio (Figura 6.85) presenta, invece, un andamento lievemente decrescente con il tempo, nonostante si rilevi un lieve aumento nella parte finale della prova che può essere associato ad un maggiore carico cognitivo. Nel periodo di cambio batteria, è visibile il vuoto di dati dovuto allo spegnimento dei Tobii Pro Glasses 3. Comprendere le vere cause delle variazioni del diametro pupillare non è una sfida semplice, vista la sensibilità a fattori ambientali e fisiologici soggettivi.

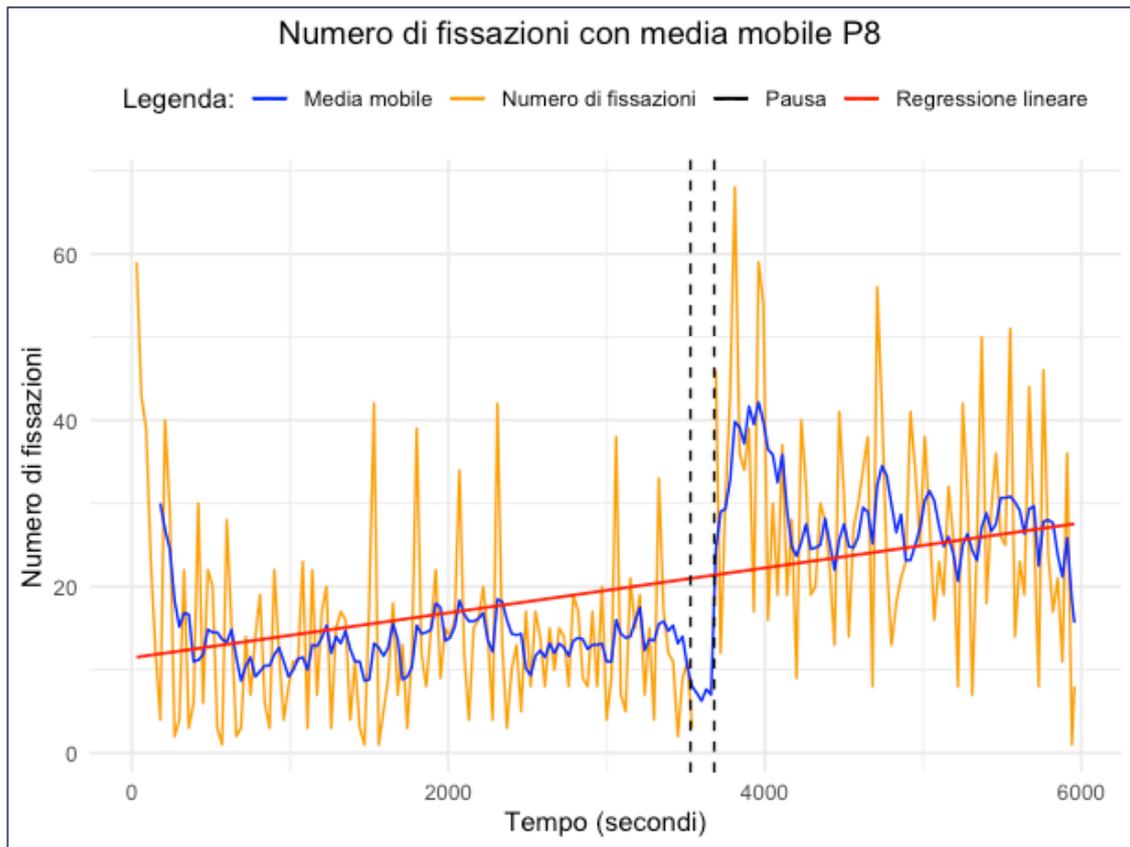


Figura 6.83 - Numero di fissazioni del partecipante 8

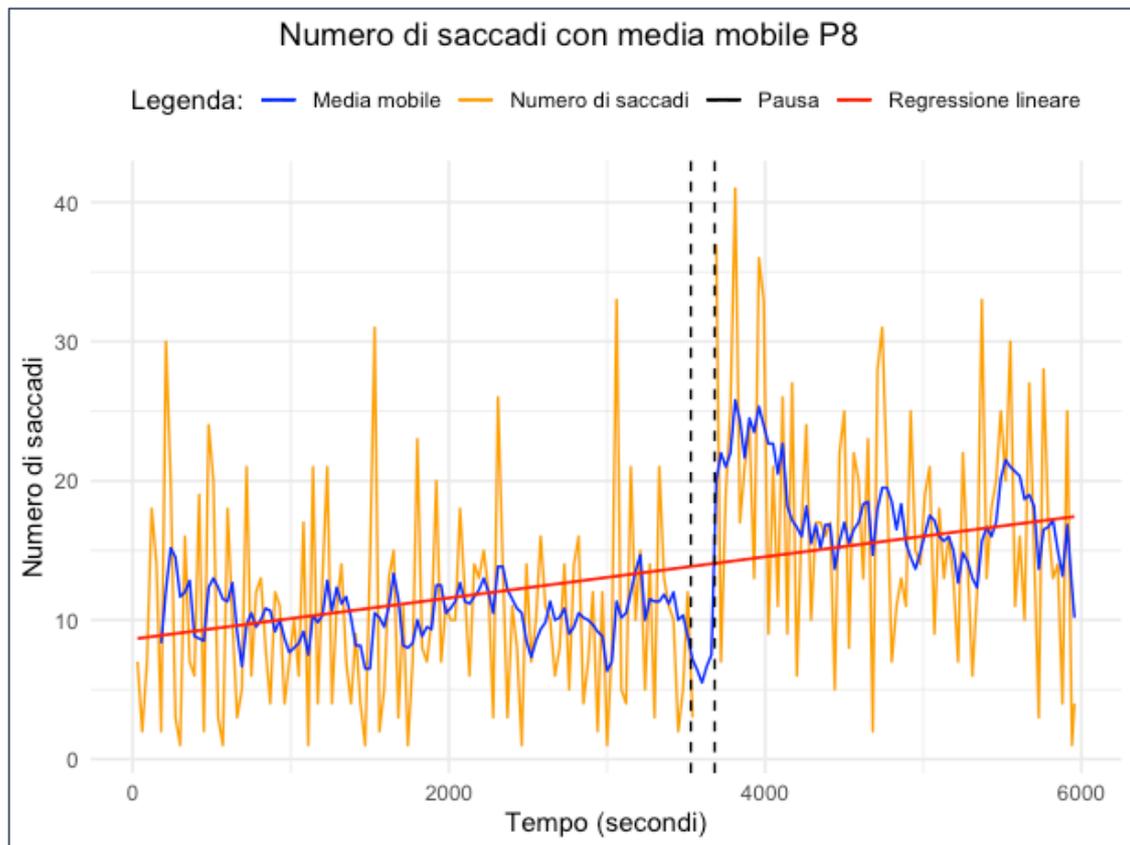


Figura 6.84 - Numero di saccadi del partecipante 8

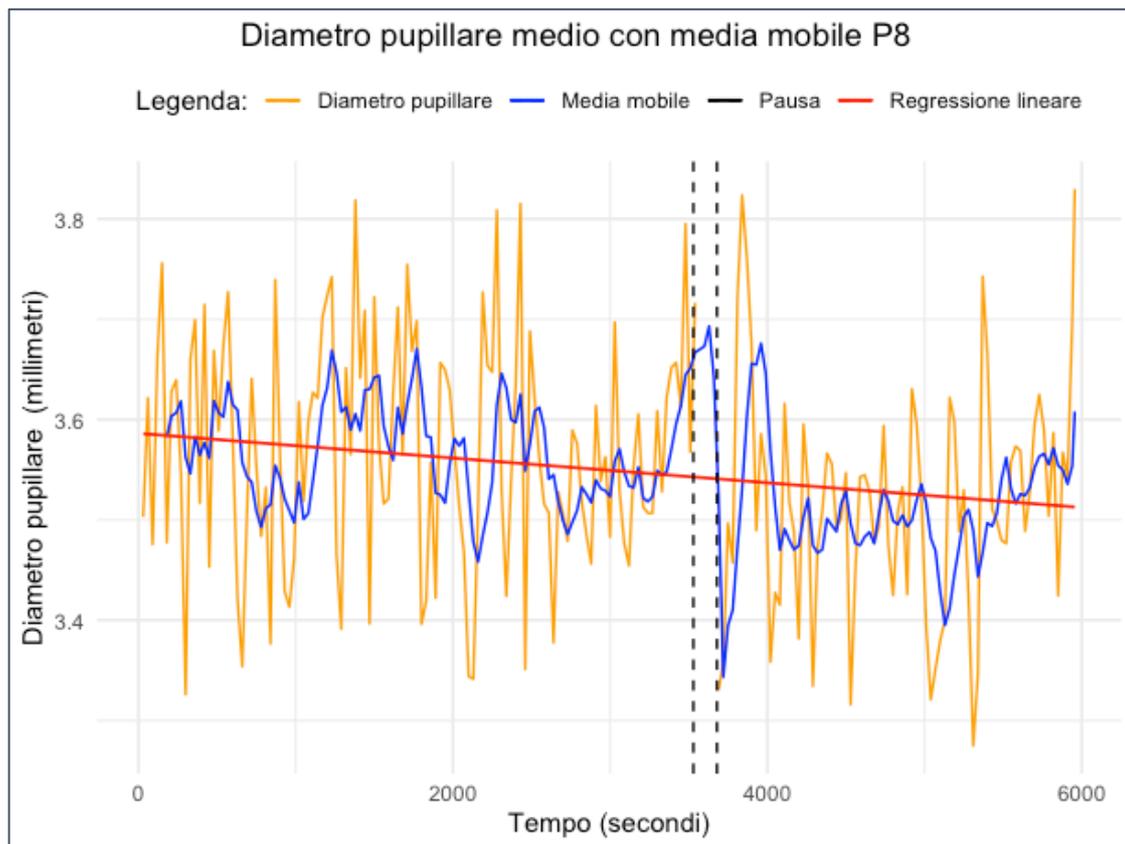


Figura 6.85 - Diametro pupillare medio del partecipante 8

Dopo aver riportato i dati relativi all'ultimo partecipante, si può affermare che l'analisi sperimentale nel suo complesso ha evidenziato una serie di risposte individuali ai test uditivi e alle attività di assemblaggio, con variazioni nei tempi di reazione ai suoni che riflettono le differenze individuali nella gestione dei compiti secondari. L'analisi statistica, inclusi il test di Shapiro-Wilk e il t-test paired, non ha rilevato significative deviazioni dalla normalità né differenze statisticamente significative tra le medie iniziali e finali. L'uso dei boxplot ha permesso di identificare tendenze nelle medie e nelle deviazioni standard dei tempi di reazione, con alcuni casi che indicano un aumento nella variabilità dei tempi di risposta, possibile indicatore di un aumento del carico cognitivo o di un maggiore affaticamento. Le analisi dettagliate per ogni partecipante hanno messo in luce come vari aspetti, quali i tempi medi di reazione, la capacità di gestire i compiti secondari, le percezioni soggettive dell'esperienza, l'attività elettrodermica e le metriche oculari differiscano notevolmente, sottolineando l'importanza del contesto individuale nell'interpretazione dei risultati.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di indagare l'efficacia di una task secondaria svolta contemporaneamente ad un compito primario di assemblaggio nella valutazione del carico cognitivo in un contesto di *Human Robot Collaboration*. I risultati emersi permettono di trarre alcune considerazioni nell'ambito dell'utilizzo di metriche, quali *secondary task*, *Eye Tracking*, attività elettrodermica e frequenza cardiaca, per valutare il carico cognitivo e lo stress, tenendo anche conto degli studi già presenti in letteratura.

Il primo risultato ottenuto nell'analisi dei dati dell'esperimento condotto, mostra una differenza non significativa tra le medie dei valori dei test uditivi effettuati all'inizio e alla fine della prova di assemblaggio della durata di 100 minuti. Ciò fa ritenere che non ci sia una correlazione del carico cognitivo con la *secondary task*. Peraltro, la scelta di seguire un approccio per singolo partecipante ed indagare dettagliatamente i risultati registrati da ciascuno ha favorito una comprensione più profonda.

La decisione di svolgere un'analisi con media mobile considerando una finestra di tre minuti ha permesso di facilitare la lettura dei grafici e di uniformare la valutazione delle metriche prese in esame. In particolare, per poter effettuare questo tipo di analisi è stata selezionata l'opzione di Bin durante l'esportazione dei dati relativi al tracciamento oculare in modo da frammentare la registrazione in intervalli di 30 secondi, portando ad una forte riduzione delle metriche considerate, trascurando durata delle fissazioni, velocità e ampiezza delle saccadi, ritenute dagli studi esistenti buone metriche per valutare il carico cognitivo.

Ciò che emerge chiaramente per tutti i partecipanti è la presenza di economie di apprendimento durante la prova di assemblaggio, seppure in proporzioni differenti. Alcuni partecipanti registrano, infatti, una continua riduzione dei tempi di completamento della pompa a membrana, mentre altri dopo un primo miglioramento, realizzano assemblaggi più lenti a causa del maggiore carico cognitivo e dell'affaticamento che percepiscono.

A parte alcune eccezioni, gli andamenti crescenti di SCL e SCR registrati durante la prova riflettono una maggiore attivazione del sistema nervoso, del livello di stress e quindi del MWL, così come suggerito dagli studi preesistenti. In alcuni partecipanti si rileva

un'attivazione maggiore nella parte iniziale della prova, seguita poi da un decremento dei valori che suggerisce un effetto di monotonia e una migliore familiarità del partecipante.

La misura della frequenza cardiaca, generalmente correlata positivamente al carico cognitivo, ha fornito indicazioni contrastanti. Per alcuni partecipanti si è registrata una crescita del battito cardiaco durante la prova, associabile ad un maggiore mental workload, mentre per altri partecipanti si è osservato un andamento costante o decrescente, che probabilmente è dovuto alla monotonia dell'attività svolta e ad un possibile rilassamento durante la prova.

Riguardo alle misure ottenute tramite l'*Eye Tracking*, si può notare che per la maggior parte dei partecipanti il numero di fissazioni assume una tendenza crescente nel corso dell'esperimento, suggerendo che si possa confermare la relazione già evidenziata dalla letteratura che associa un aumento del numero di fissazioni ad un aumento del carico cognitivo. Il diametro pupillare presenta, invece, un andamento decrescente quasi per tutti i partecipanti, dimostrando un risultato contrastante con la letteratura, forse a causa di un affaticamento sul lungo periodo. Un'altra ragione di tale evoluzione può essere la sensibilità di questa metrica sia a fattori ambientali, come la luminosità, che a fattori fisiologici del partecipante o il dipendere dalla vicinanza del punto di attenzione su cui ci si sta concentrando. È possibile, inoltre, che la fase di acquisizione dei dati sia stata influenzata da un rilevamento non sempre ottimale, specialmente nei casi in cui i partecipanti spostavano il loro punto di attenzione sul piano di lavoro senza piegare la testa, abbassando lo sguardo oltre il limite del campo visivo monitorato dai Tobii Pro Glasses 3. Analoga deduzione vale anche per il numero di saccadi che solo per la metà dei partecipanti presenta una tendenza crescente al sopraggiungere di un carico cognitivo maggiore, coerente con la letteratura.

La sfida di progettare una task secondaria non invasiva è stata affrontata con successo, mantenendo così coerenza con la letteratura esistente, che ritiene tale aspetto rilevante per valutare correttamente le variazioni del carico cognitivo. L'utilizzo del compito secondario evidenzia un maggior livello di MWL nel corso della prova in diversi modi: per alcuni partecipanti si registrano valori medi dei tempi di reazione ai suoni maggiori dopo l'esecuzione di 100 minuti di assemblaggio rispetto alla condizione iniziale, mentre per altri partecipanti si osserva un andamento crescente dei tempi di reazione man mano che la prova di assemblaggio avanza. Per di più, la metà dei partecipanti commette almeno un errore

durante l'assemblaggio della pompa, non percependo i suoni riprodotti, confermando la difficoltà di compiere più task contemporaneamente.

Il confronto svolto tra i partecipanti tramite i dati grezzi e i dati normalizzati è servito a comprendere maggiormente i dataset registrati per ciascun soggetto coinvolto. La verifica della presenza di una correlazione tra alcuni segnali ha messo in luce differenze individuali, delle volte anche in contrasto tra di loro e con la letteratura esistente.

Pur essendo i dati raccolti e i riscontri ottenuti limitati alle condizioni di svolgimento dell'esperimento realizzato e al numero ristretto di esperimenti effettuati, si può concludere che la presente tesi può considerarsi una base per studi e indagini future sul legame tra task secondaria, carico cognitivo e metriche oggettive e sull'esistenza di correlazioni tra i segnali, in quanto fornisce valutazioni che contribuiscono ad approfondire il tema dell'impiego sempre maggiore dei Cobot nel settore manifatturiero.

APPENDICE

- La Figura appendice 1 riporta il codice commentato riga per riga relativo al test uditivo iniziale. Tra il programma del test iniziale e quello finale l'unica differenza è il nome di salvataggio del file Excel per evitare sovra scritzioni errate.

```
import pygame # Importa la libreria Pygame per la grafica e l'audio.
import random # Importa la libreria Random per la selezione casuale dei suoni.
from datetime import datetime, timedelta # Importa gli oggetti datetime e timedelta per gestire le misurazioni del tempo.
import openpyxl # Importa la libreria Openpyxl per lavorare con il file Excel.

pygame.init() # Inizializza tutti i moduli importati di Pygame.
width, height = 1200, 800 # Imposta le dimensioni della finestra.
win = pygame.display.set_mode((width, height)) # Crea la finestra
pygame.display.set_caption("Reazione ai Suoni") # Imposta il titolo della finestra.

# Carica i file audio per i suoni corretto e errato.
sound_correct = pygame.mixer.Sound("Mario Coin Sound - Sound Effect (HD).mp3")
sound_wrong = pygame.mixer.Sound("Censor Beep Sound.mp3")

file_name = "baseline_8sec.xlsx" # Nome del file Excel per registrare i dati.

def main(): # Definisce la funzione principale del test.
    running = True # Variabile per mantenere il programma in esecuzione.
    last_sound_time = datetime.now() # Registra l'ultimo momento in cui è stato riprodotto un suono.

    while running: # Ciclo principale del programma.
        for event in pygame.event.get(): # Itera su tutti gli eventi di Pygame.
            if event.type == pygame.QUIT: # Se l'evento è la chiusura della finestra, termina il ciclo.
                running = False
            elif event.type == pygame.KEYDOWN: # Se l'evento è la pressione di un tasto.
                if event.key in [pygame.K_c, pygame.K_e]: # Controlla se il tasto è 'C' o 'E'.
                    check_player_reaction(event.key) # Chiama la funzione per registrare la reazione del giocatore.

        current_time = datetime.now() # Ottiene il momento corrente.
        time_elapsed = current_time - last_sound_time # Calcola il tempo trascorso dall'ultimo suono riprodotto.

        if time_elapsed >= timedelta(seconds=8): # Se sono trascorsi almeno 8 secondi.
            play_random_sound(current_time) # Riproduce un suono casuale.
            last_sound_time = current_time # Aggiorna il momento dell'ultimo suono riprodotto.

    pygame.quit() # Termina tutti i moduli di Pygame dopo l'uscita dal ciclo.

def play_random_sound(current_time): # Funzione per riprodurre un suono casuale e registrarlo.
    formatted_datetime = current_time.strftime("%H:%M:%S.%f") # Formatta il momento corrente.

    if random.choice([True, False]): # Sceglie casualmente tra vero e falso.
        sound_correct.play() # Riproduce il suono corretto.
        log_data("Suono 1", current_time) # Registra il suono riprodotto.
    else:
        sound_wrong.play() # Riproduce il suono errato.
        log_data("Suono 2", current_time) # Registra il suono riprodotto.

def check_player_reaction(key): # Funzione per registrare la reazione del partecipante.
    current_datetime = datetime.now() # Ottiene il momento corrente della reazione.
    log_data(f"Pulsante premuto: {pygame.key.name(key)}", current_datetime) # Registra quale tasto è stato premuto.

def log_data(event_type, timestamp): # Funzione per registrare i dati in un file Excel.
    try:
        workbook = openpyxl.load_workbook(file_name) # Prova ad aprire il file Excel esistente.
    except FileNotFoundError: # Se il file non esiste.
        workbook = openpyxl.Workbook() # Crea un nuovo workbook.
        workbook.active.append([f"Event Type del {datetime.now().strftime('%d %m %Y')}", "Timestamp"]) # Aggiunge l'intestazione.

    sheet = workbook.active # Ottiene il foglio attivo.
    sheet.append([event_type, timestamp]) # Aggiunge i dati al foglio.

    for row in sheet.iter_rows(min_row=2, max_col=2, max_row=sheet.max_row): # Itera attraverso le righe per formattare le celle.
        for cell in row:
            if cell.column == 2: # Se la colonna è quella del Timestamp.
                cell.number_format = 'hh:mm:ss.000' # Applica il formato datetime ISO.

    workbook.save(file_name) # Salva il file Excel.

if __name__ == "__main__": # Se lo script è eseguito come programma principale.
    main() # Chiama la funzione main.
```

Figura appendice 1 - Codice del test uditivo iniziale e relativa spiegazione realizzati su PyCharm

- La Figura appendice 2 riporta il commento riga per riga del codice scritto relativo alla *secondary task* realizzata per la prova.

```

import pygame # Importa la libreria Pygame per la creazione di giochi e l'interfaccia grafica.
import random # Importa la libreria Random per generare scelte casuali.
from datetime import datetime, timedelta # Importa datetime e timedelta per gestire e confrontare i tempi.
import openpyxl # Importa la libreria Openpyxl per lavorare con fogli di calcolo Excel.

pygame.init() # Inizializza i moduli di Pygame.

# Imposta le dimensioni della finestra di gioco e crea la finestra con il titolo specificato.
width, height = 1200, 800
win = pygame.display.set_mode((width, height))
pygame.display.set_caption("Reazione ai Suoni")

# Carica i file audio per i suoni di "corretto" e "errato".
sound_correct = pygame.mixer.Sound("Mario Coin Sound - Sound Effect (HD).mp3")
sound_wrong = pygame.mixer.Sound("Censor Beep Sound.mp3")

file_name = "Dual-task_reaction45.xlsx" # Nome del file Excel per registrare i dati.

def main(): # Definisce la funzione principale.
    running = True # Mantiene il gioco in esecuzione.
    last_sound_time = datetime.now() # Registra il tempo dell'ultimo suono riprodotto.

    while running: # Ciclo principale di gioco.
        for event in pygame.event.get(): # Controlla gli eventi (input dell'utente).
            if event.type == pygame.QUIT: # Se l'evento è uscire dalla finestra, termina il gioco.
                running = False
            elif event.type == pygame.KEYDOWN: # Se viene premuto un tasto.
                # Controlla se il tasto premuto è C, E o SPAZIO e registra la reazione.
                if event.key in [pygame.K_c, pygame.K_e, pygame.K_SPACE]:
                    check_player_reaction(event.key)

                current_time = datetime.now() # Ottiene il tempo corrente.
                time_elapsed = current_time - last_sound_time # Calcola il tempo trascorso dall'ultimo suono.
                # Se sono trascorsi 45 secondi dall'ultimo suono, riproduce un suono casuale e aggiorna l'ultimo tempo di suono.
                if time_elapsed >= timedelta(seconds=45):
                    play_random_sound(current_time)
                    last_sound_time = current_time

        pygame.quit() # Termina Pygame quando il ciclo di gioco finisce.

# Funzione per riprodurre un suono casuale e registrare l'evento.
def play_random_sound(current_time):
    formatted_datetime = current_time.strftime("%H:%M:%S.%f") # Formatta il tempo corrente.

    # Sceglie casualmente tra suono corretto ed errato, lo riproduce e registra l'evento.
    if random.choice([True, False]):
        sound_correct.play()
        log_data("Suono 1", current_time)
    else:
        sound_wrong.play()
        log_data("Suono 2", current_time)

# Funzione per registrare la reazione del giocatore.
def check_player_reaction(key):
    current_datetime = datetime.now() # Ottiene il tempo corrente della reazione.
    # Registra quale tasto è stato premuto e il tempo della reazione.
    log_data(f"Pulsante premuto: {pygame.key.name(key)}", current_datetime)

# Funzione per registrare i dati nel file Excel.
def log_data(event_type, timestamp):
    try:
        workbook = openpyxl.load_workbook(file_name) # Tenta di aprire il file Excel esistente.
    except FileNotFoundError: # Se il file non esiste, ne crea uno nuovo.
        workbook = openpyxl.Workbook()
        workbook.active.append([f"Event Type del {datetime.now().strftime('%d %m %Y')}", "Timestamp"])

    sheet = workbook.active # Accede al foglio attivo.
    sheet.append([event_type, timestamp]) # Aggiunge l'evento e il timestamp al foglio.

    # Formatta le celle della colonna Timestamp per mostrare la data e l'ora.
    for row in sheet.iter_rows(min_row=2, max_col=2, max_row=sheet.max_row):
        for cell in row:
            if cell.column == 2:
                cell.number_format = 'hh:mm:ss.000'

    workbook.save(file_name) # Salva il file Excel con i nuovi dati.

# Esegue la funzione main() se lo script è il programma principale.
if __name__ == "__main__":
    main()

```

Figura appendice 2 - Codice della *secondary task* e relativo commento realizzati su PyCharm

Il codice fornito utilizza le librerie Pygame, Random, Datetime e Openpyxl per creare il test di reazione basato sui due suoni. Una volta lanciato il programma si apre una finestra nera (1200x800 pixel) dal titolo “Reazione ai suoni” per evitare che il partecipante si distraiga guardando lo schermo del computer e inizia la riproduzione casuale dei due suoni ogni 45 secondi e la registrazione delle reazioni del partecipante (pressioni dei tasti 'C' o 'E') in un file Excel. Il test termina quando viene chiusa la finestra. Nel dettaglio, le librerie inserite permettono di:

- **Pygame** viene utilizzato per creare l'interfaccia utente, gestire gli eventi di input (come la pressione dei tasti e la chiusura della finestra) e riprodurre i suoni.
- **Random** è usato per selezionare casualmente quale suono riprodurre.
- **Datetime** tiene traccia del tempo trascorso tra la riproduzione dei suoni.
- **Openpyxl** permette di registrare le reazioni del partecipante e i tempi di riproduzione dei suoni in un foglio di calcolo Excel per analisi successive.

- **Confronto tra partecipanti**

Al termine dell'analisi per ciascun partecipante, si procede con un confronto tra i dati raccolti al fine di comprendere maggiormente i dati raccolti e le loro distribuzioni, con particolare attenzione alle misure di EDA e *Eye Tracking*.

Il primo confronto svolto riguarda le distribuzioni dei dati grezzi della *skin conductance level* (Figura appendice 3). La scelta di rappresentare una panoramica sui dati senza rielaborarli permette di visualizzare l'intervallo di valori che ogni singolo partecipante ha registrato e di confrontare direttamente gli andamenti assunti. Dalla Figura emerge, infatti, una forte differenza individuale nei valori assunti e nell'andamento riscontrato. Per alcuni partecipanti (come il P1 e il P7) si vede chiaramente una crescente SCL nel corso della prova, associata ad una maggiore attivazione del sistema nervoso e quindi ad un MWL maggiore. Altri partecipanti (come P3, P5, P6) presentano, invece, come già evidenziato, una iniziale crescita dei valori di SCL ed un calo nella seconda parte della prova, sinonimo di una maggiore familiarità con l'assemblaggio e di un rilassamento. Si riporta anche la rappresentazione della Skin Conductance Response (SCR) per ciascun partecipante (Figura appendice 4).

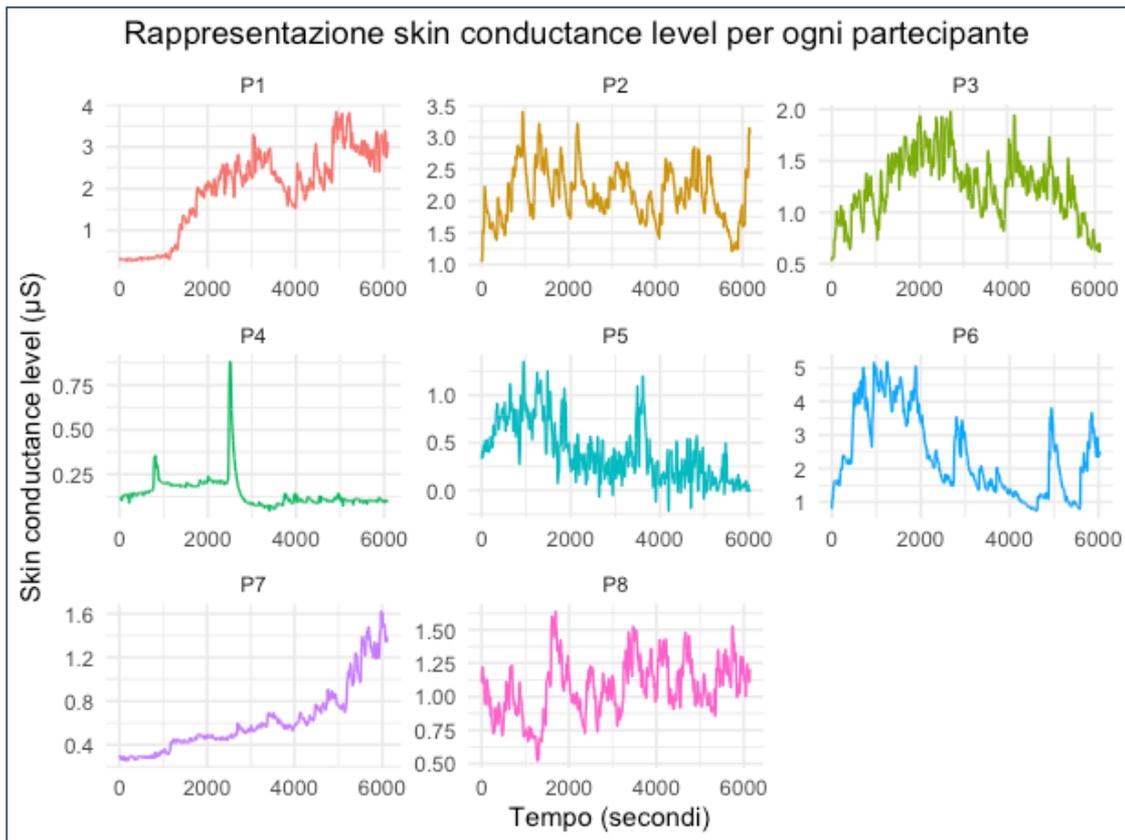


Figura appendice 3 - Rappresentazione dei dataset grezzi di skin conductance level (SCL) di ciascun partecipante

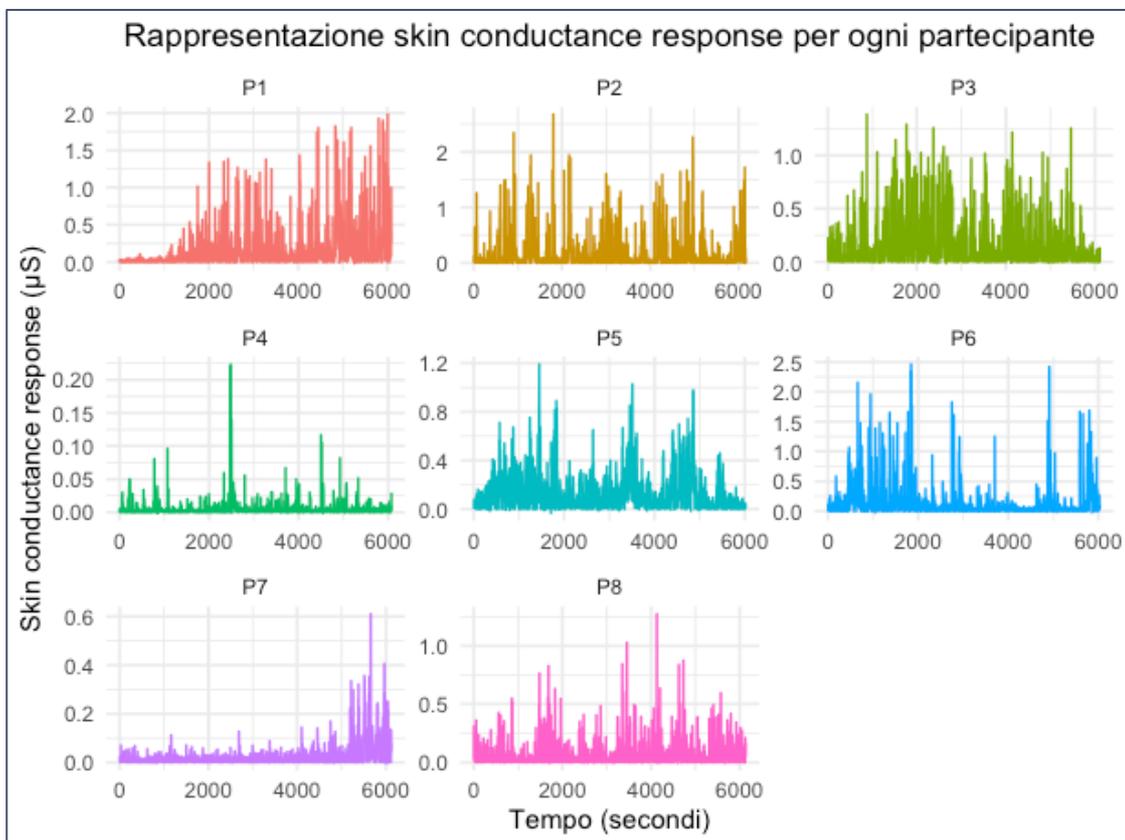


Figura appendice 4 - Rappresentazione dei dataset grezzi di SCR per ciascun partecipante

Le figure successive riportano le distribuzioni dei dati grezzi dei parametri registrati con i Tobii Pro Glasses 3, rispettivamente di numero di fissazioni (Figura appendice 5), numero di saccadi (Figura appendice 6) e diametro pupillare medio (Figura appendice 7). Anche in questo caso, è possibile sottolineare la varietà individuale dei valori assunti per ciascuna metrica dal singolo soggetto, seppure più contenuta rispetto a quelli di SCL. In ciascun partecipante è presente un vuoto di dati riferito alla pausa del cambio pila dell'eye tracker.

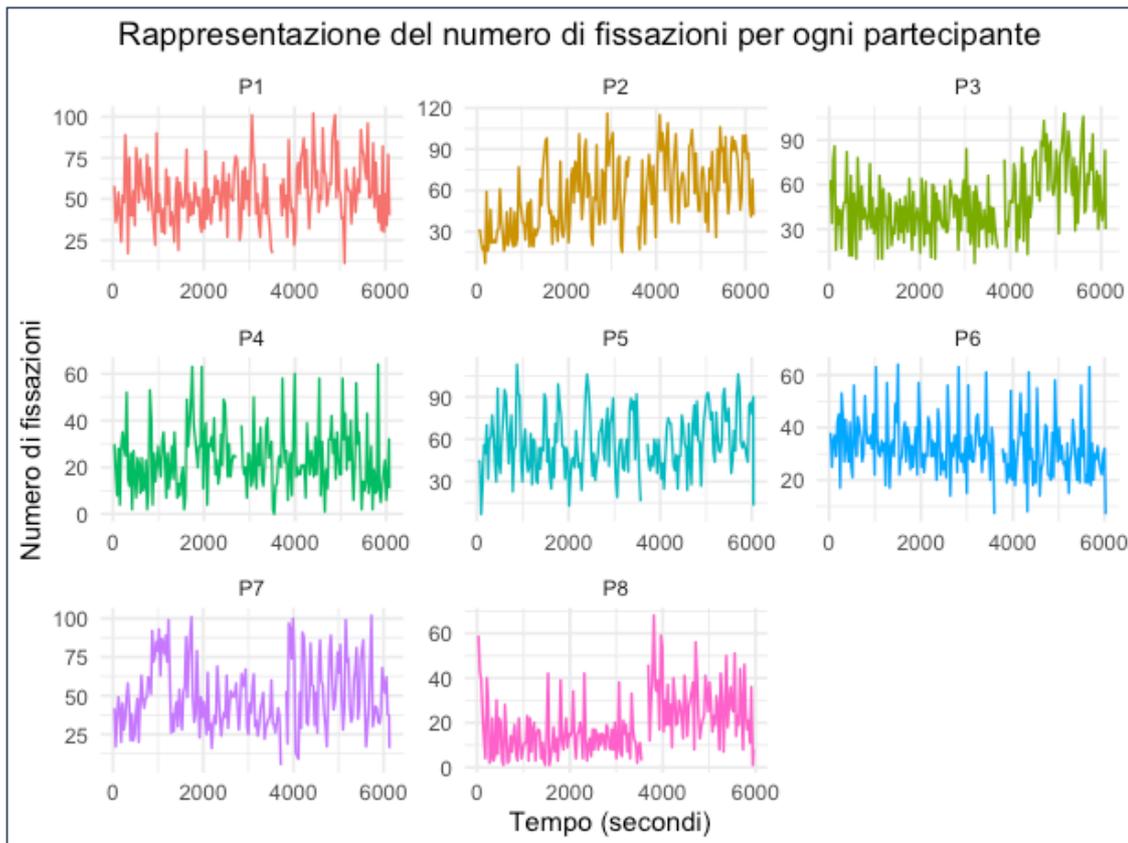


Figura appendice 5 - Rappresentazione dei dataset grezzi del numero di fissazioni di ciascun partecipante

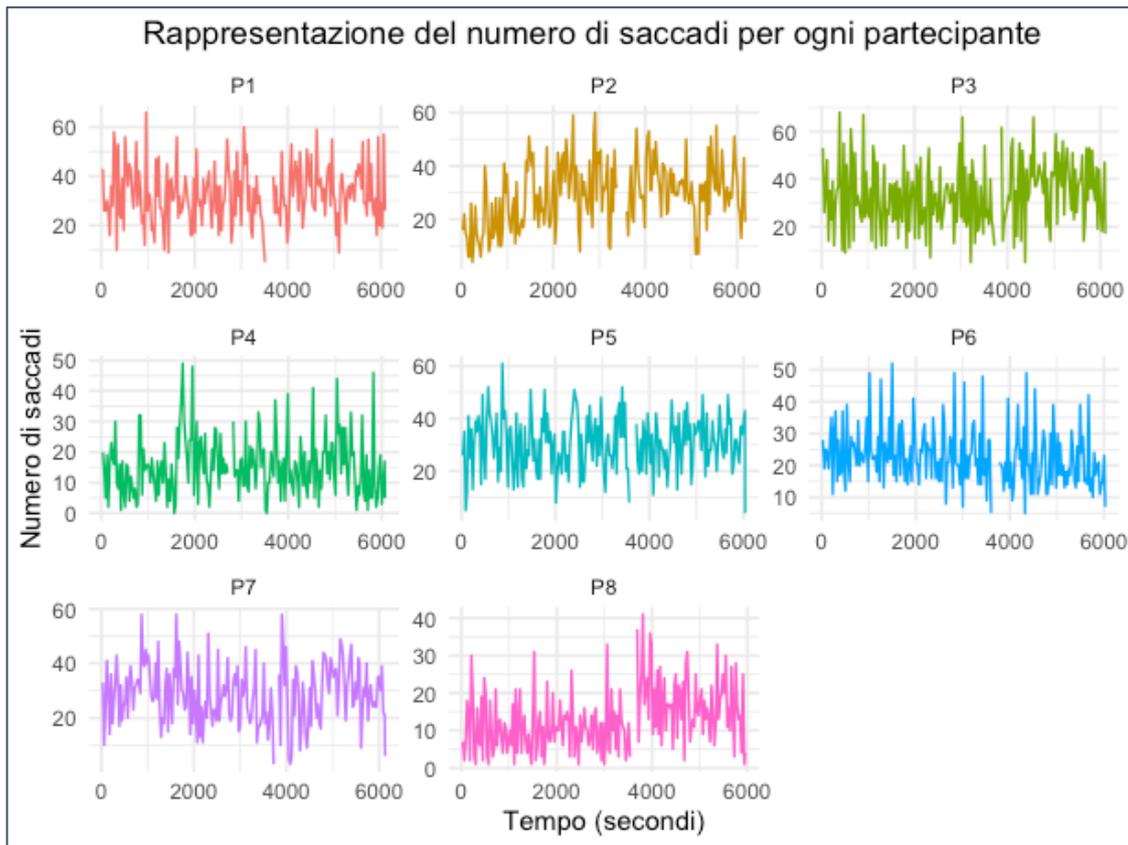


Figura appendice 6 - Rappresentazione dei dataset grezzi del numero di saccadi di ciascun partecipante

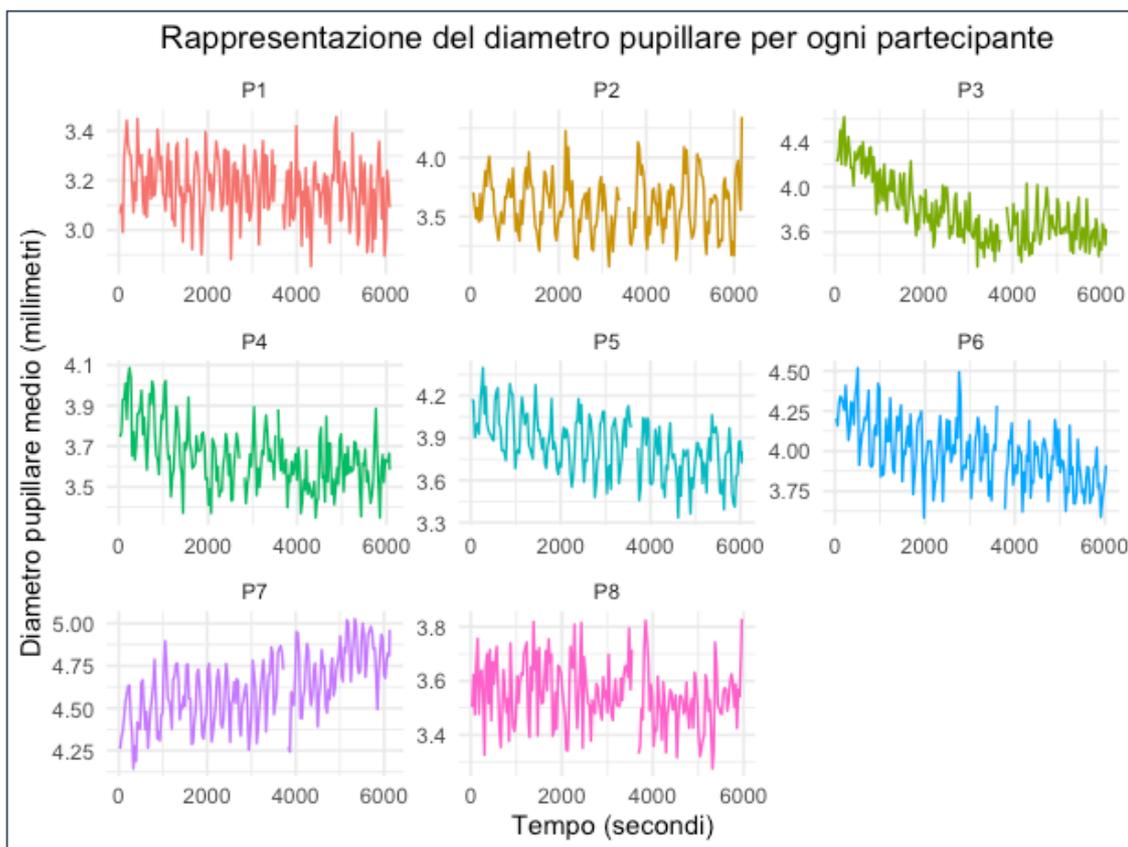


Figura appendice 7 - Rappresentazione dei dataset grezzi del diametro pupillare medio di ciascun partecipante

Tuttavia, le differenze nelle scale di misura e i range di valori diversi possono rendere difficile confrontare direttamente i dataset dei partecipanti e per tale ragione è stata svolta una normalizzazione di tipo Z, che può, inoltre, aiutare a mitigare la presenza di outlier. Quest'ultima è una tecnica statistica utilizzata per trasformare i dati in modo che abbiano una media (μ) di 0 e una deviazione standard (σ) di 1. Matematicamente, la trasformazione è espressa come:

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

dove x è il valore originale, μ è la media del dataset e σ è la deviazione standard.

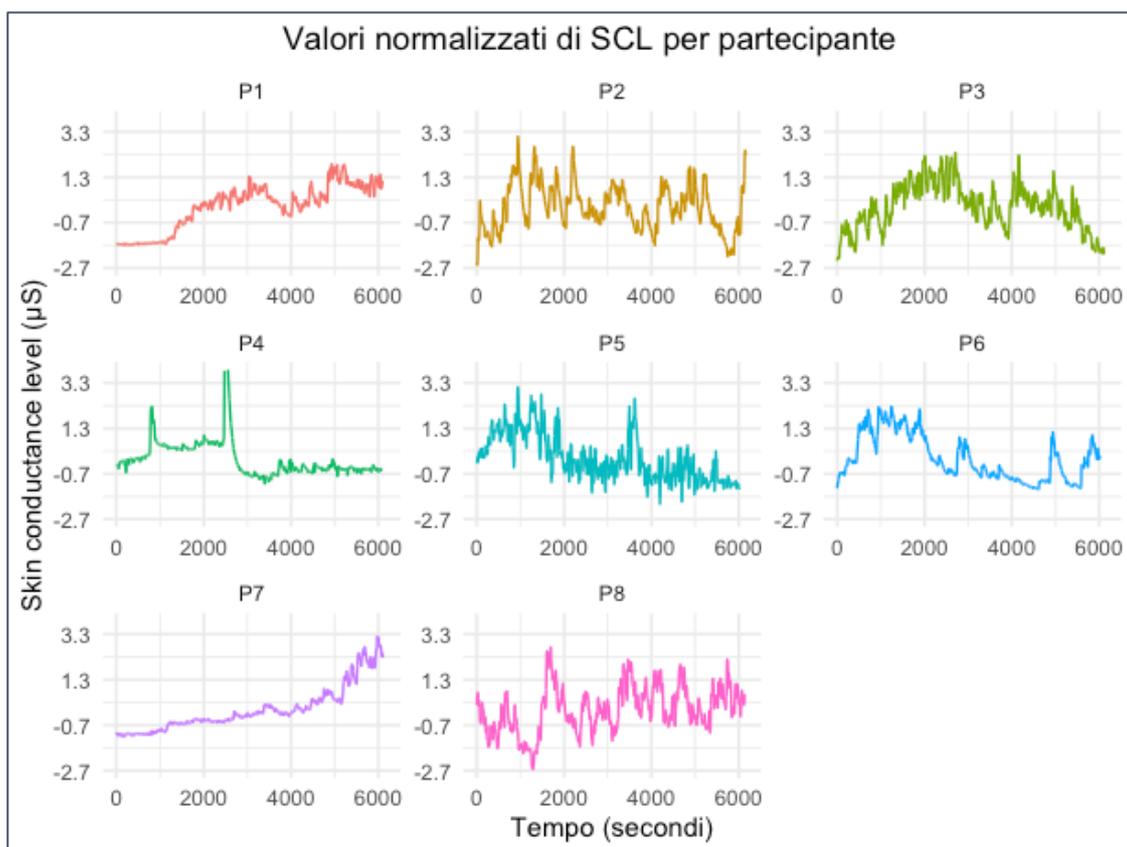


Figura appendice 8 - Rappresentazione dei dataset normalizzati di skin conductance level (SCL) di ciascun partecipante

La Figura appendice 8 rappresenta i valori normalizzati della SCL per ogni partecipante ed è possibile notare una maggiore leggibilità dei grafici risultanti. In più, in questo modo tutti i dataset presentano la stessa scala di misura. Nel caso del partecipante 4 per maggiore chiarezza e visualizzazione, è stato deciso di mantenere comunque la stessa scala degli altri dataset, non rappresentando il picco nella prima parte della prova che assume valori molto

maggiori di $3,3 \mu\text{S}$. La Figura appendice 9 riporta i valori normalizzati anche della Skin Conductance Response (SCR).

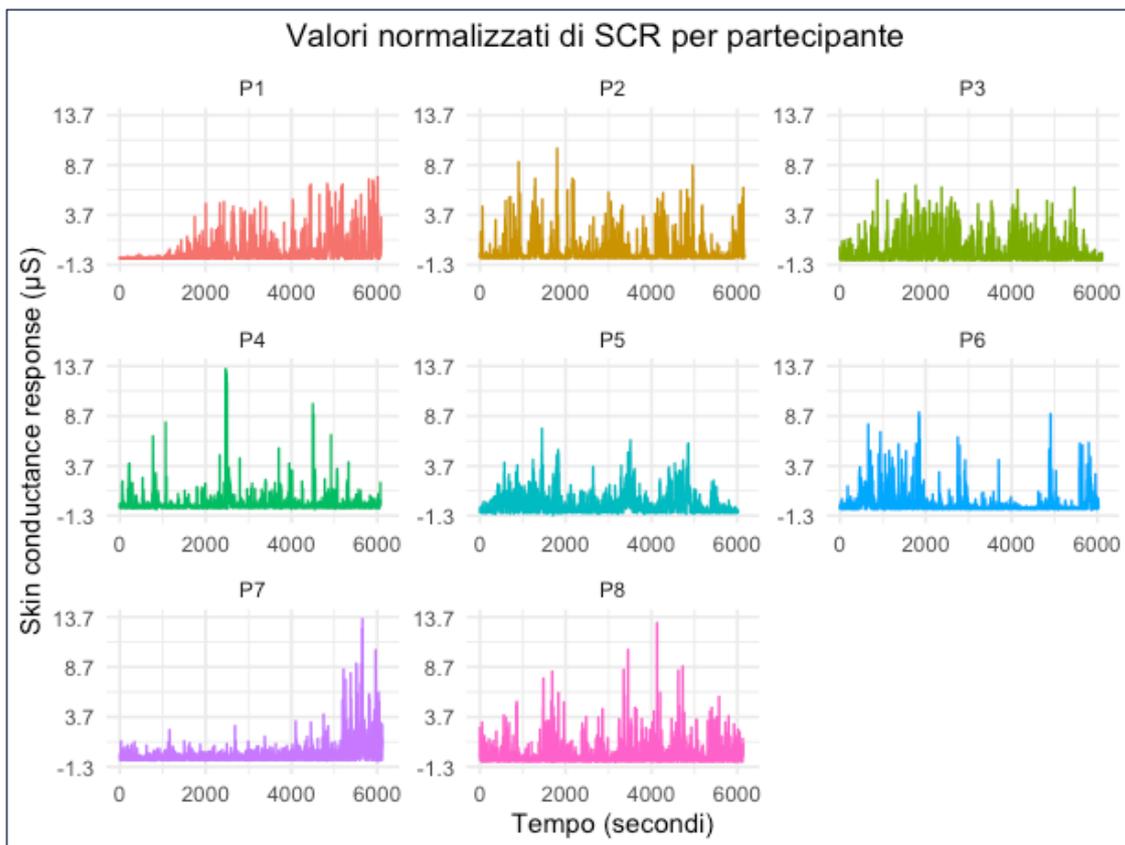


Figura appendice 9 - Rappresentazione dei dataset normalizzati di SCR per ciascun partecipante

Le figure sottostanti riportano i valori normalizzati dei parametri oculari, in ordine del numero di fissazioni (Figura appendice 10), del numero di saccadi (Figura appendice 11) e del diametro pupillare (Figura appendice 12). In questo caso, grazie alla normalizzazione, nel caso di fissazioni e saccadi non è presente il vuoto dovuto alla pausa per il cambio batteria. Per quanto riguarda, invece, il diametro pupillare si riporta in Figura appendice 13 la panoramica completa dei valori normalizzati, mentre in Figura appendice 12 si riporta una finestra più ristretta dei valori assunti in modo da rendere il grafico più leggibile eliminando i valori relativi alle pause.

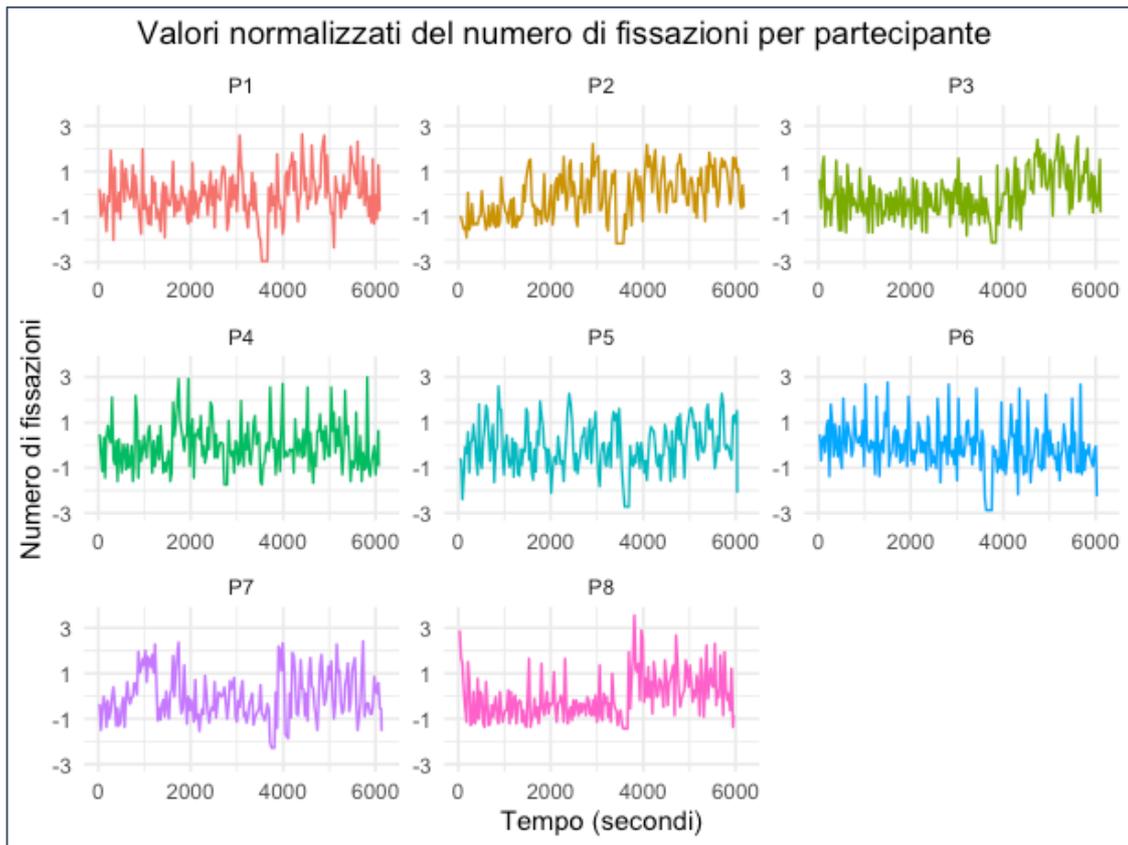


Figura appendice 10 - Rappresentazione dei dataset normalizzati del numero di fissazioni di ciascun partecipante

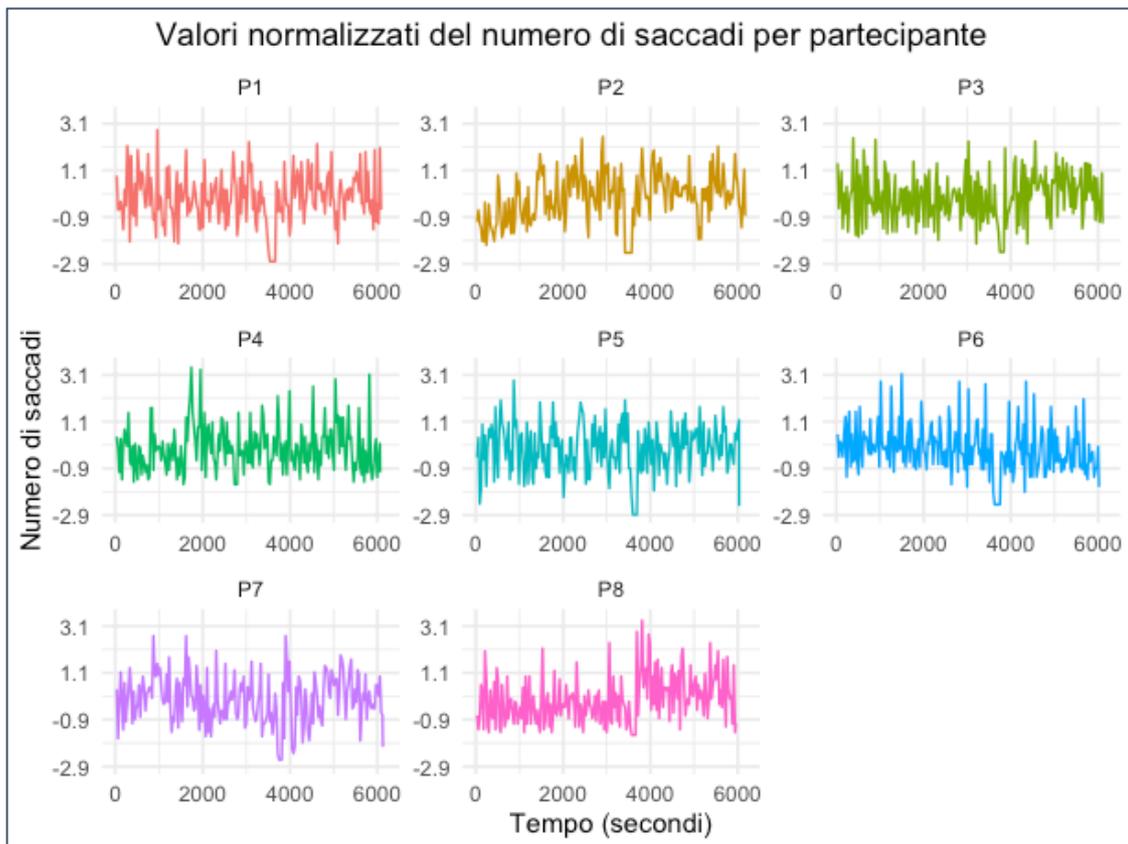


Figura appendice 11 - Rappresentazione dei dataset normalizzati del numero di saccadi di ciascun partecipante

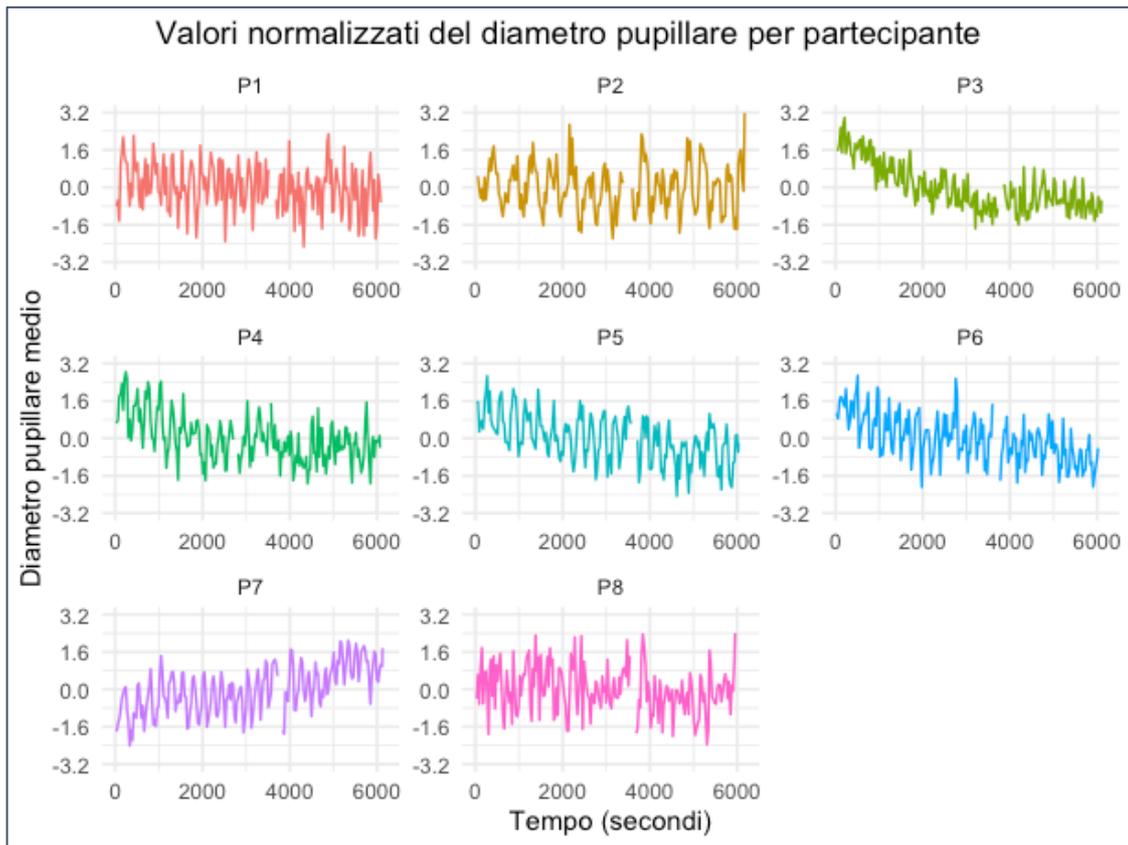


Figura appendice 12 - Rappresentazione dei dataset normalizzati del diametro pupillare di ciascun partecipante

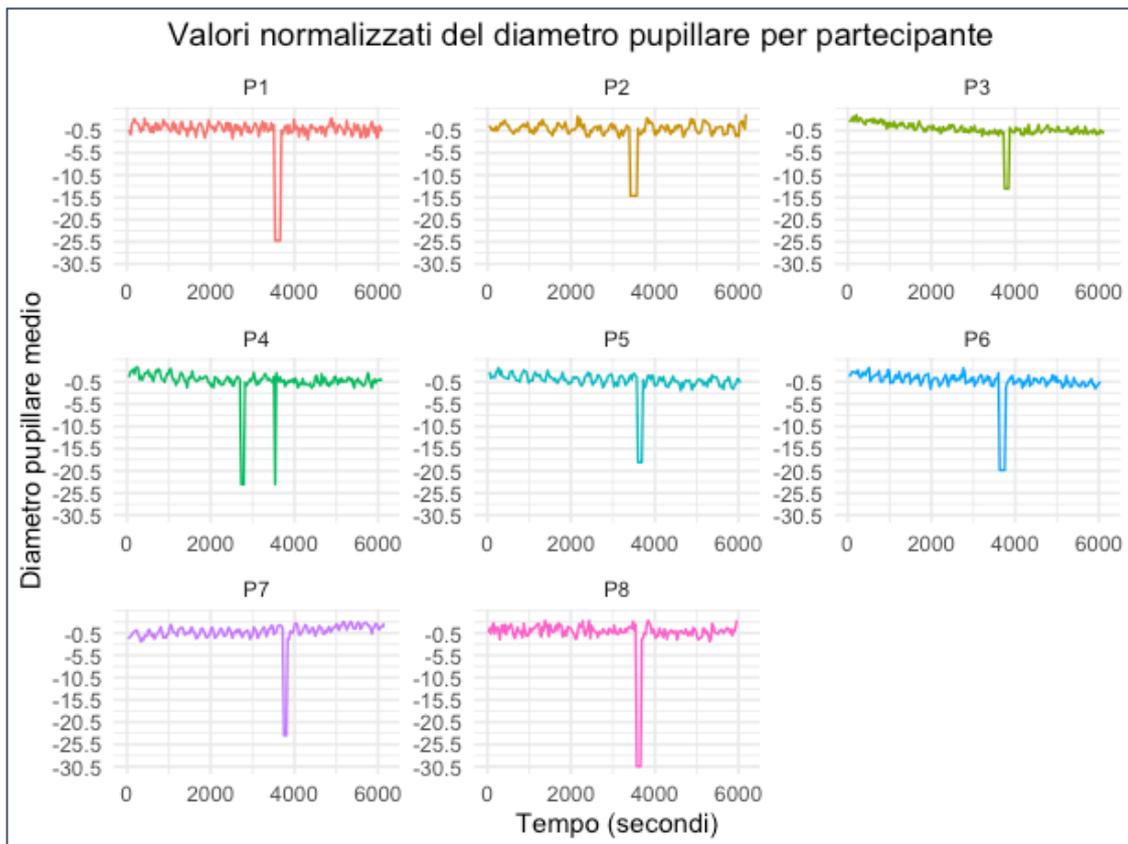


Figura appendice 13 - Rappresentazione completa dei dataset normalizzati del diametro pupillare di ogni partecipante

Infine, per concludere l'analisi si è svolta un'indagine per verificare l'esistenza o meno di una correlazione tra alcuni dei segnali studiati. In particolare, è stata esaminata la correlazione tra SCL e ogni singolo parametro oculare (SCL-Fix: SCL e numero di fissazioni, SCL-Sac: SCL e numero di saccadi, SCL-DP: SCL e diametro pupillare) e tra SCR e ogni singolo parametro oculare (SCR-Fix: SCR e numero di fissazioni, SCR-Sac: SCR e numero di saccadi, SCR-DP: SCR e diametro pupillare). L'analisi è stata svolta per ogni partecipante sfruttando il test di Pearson, uno strumento statistico che misura il grado di relazione lineare tra due variabili quantitative (r). Il coefficiente di correlazione varia tra -1 e 1, dove valori vicini a 1 o -1 indicano una forte correlazione, mentre valori vicini a 0 indicano una debole o nessuna correlazione.

La formula del test di Pearson è la seguente: $r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$

- x_i e y_i sono i valori delle due variabili;
- \bar{x} e \bar{y} sono le medie dei valori di x e y .

Di ciascun coefficiente di correlazione si verifica la significatività della correlazione calcolando il p-value associato. L'analisi di correlazione è svolta utilizzando sia i dati grezzi (Tabella appendice 1) che quelli normalizzati (Tabella appendice 2). Di seguito, si riportano i risultati evidenziando i coefficienti di correlazione significativi al 95%.

Tabella appendice 1 - Correlazione calcolata sui dati grezzi e significatività

Partecipante	SCL-Fix	SCL-Sac	SCL-DP	SCR-Fix	SCR-Sac	SCR-DM
P1	0,165	0,0429	-0,152	0,270	0,145	0,0681
P2	-0,00569	0,0992	0,200	-0,0244	0,0411	0,316
P3	-0,118	-0,0545	-0,183	-0,114	-0,0253	0,0109
P4	0,0643	0,0521	-0,00469	0,118	0,0920	0,0185
P5	-0,0602	0,00235	0,392	0,150	0,136	0,234
P6	0,154	0,140	0,256	0,156	0,130	0,316
P7	0,0463	0,0270	0,558	0,123	0,124	0,413
P8	0,185	0,137	0,0880	0,0615	0,0355	0,162

Tabella appendice 2 - Correlazione calcolata sui dati normalizzati e significatività

Partecipante	Norm: SCL-Fix	Norm: SCL-Sac	Norm: SCL-DP	Norm: SCR-Fix	Norm: SCR-Sac	Norm: SCR-DM
P1	0,128	0,0187	-0,0857	0,264	0,152	0,0624
P2	-0,00125	0,0958	0,0802	0,0121	0,0761	0,202
P3	-0,0827	-0,0185	0,00600	-0,0653	0,0241	0,137
P4	0,0653	0,0534	0,0404	0,126	0,100	0,0593
P5	-0,140	-0,0882	-0,0847	0,117	0,103	0,0312
P6	0,186	0,170	0,182	0,172	0,148	0,165
P7	0,0489	0,0306	0,198	0,129	0,130	0,173
P8	0,151	0,102	-0,119	0,0490	0,0228	-0,0150

Alcune correlazioni risultano significative sia calcolate con i dati grezzi che calcolate con i dati normalizzati. Quello che emerge dai risultati è che le correlazioni assumono valori anche contrastanti tra i partecipanti, come ad esempio nel caso di SCL e del diametro pupillare in cui per alcuni la correlazione è positiva e per altri è negativa. Si può affermare, tuttavia, una generale correlazione positiva tra le metriche di EDA e quelle di *Eye Tracking*.

Indice delle figure

Figura 1.1 - Human Robot Collaboration (https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2022/08/10/the-best-examples-of-human-and-robot-collaboration/).....	6
Figura 1.2 - Cooperazione tra uomo e robot (Ajoudani et al., 2017)	7
Figura 1.3 - Processo di controllo nello stabilimento BMW Group di Landshut (https://www.kuka.com/it-it/settori/banca-dati-di-soluzioni/2017/09/solution-robotics-bmw-landshut)	8
Figura 2.1 - Teoria del carico cognitivo (https://www.barefootteacher.com/p/what-is-cognitive-load-theory)	10
Figura 2.2 - Framework sul MWL e implicazioni sul comportamento lavorativo (Acker, 2020).....	11
Figura 2.3 - Misura comportamentale: effetto dell'apprendimento (Bommer et al., 2018) 12	
Figura 2.4 - Rappresentazione personale delle misure fisiologiche del carico cognitivo ...	13
Figura 3.1 - Operatore che indossa un eye tracker sul posto di lavoro (https://manufacturingdigital.com/ai-and-automation/eye-tracking-provides-valuable-insight-factory-safety)	15
Figura 3.2 - Evoluzione storica e tecnologica del tracciamento degli occhi: la prima era (1879-1920) si concentra sullo studio della struttura oculare e teorie del movimento dell'occhio; la seconda era (1930-1950) introduce l'oculografia e il tracking oculare con strumenti intrusivi; il terzo periodo (1970-1998) vede il passaggio a metodi di tracciamento dello sguardo non intrusivi grazie ai progressi nell'hardware e nelle tecniche di elaborazione delle immagini; il quarto periodo (dal 2000 in poi) si distingue per l'impiego di sistemi di tracciamento dello sguardo remoto, utilizzando dispositivi come desktop, laptop, tablet, TV e smartphone (Shehu et al., 2021)	16
Figura 3.3 - Funzionamento dei moderni eye tracker (https://www.ashokcharan.com/Marketing-Analytics/~bm-eye-tracking-how-it-works.php#gsc.tab=0).....	17
Figura 3.4 - Visuale e punto di attenzione di un operatore registrata dall'eye tracker durante un errore (https://www.tobii.com/blog/improve-standardized-work)	18
Figura 4.1 - Esempio di compito secondario tramite il Trail Making Test (TMT) eseguito oralmente e in movimento: in alto, soggetti svolgono singolarmente l'Oral TMT-A (sequenza crescente di soli numeri) e TMT-B (sequenza crescente e alternata di numeri e lettere) e la camminata; in basso, soggetti combinano l'Oral TMT con la camminata per valutare la capacità di multitasking e il carico cognitivo. (https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2021.712463/full)	21
Figura 5.1 - Viste della pompa a membrana.....	24
Figura 5.2 - Componenti della pompa a membrana	25
Figura 5.3 - Partecipante in posizione iniziale pronto ad iniziare la prova e posizione del tasto blu da premere per interagire con il Cobot cerchiata in rosso	26
Figura 5.4 - Passo 5 della sequenza di assemblaggio	27
Figura 5.5 - Dispositivo indossabile multifunzione per il monitoraggio biometrico: dotato di sensore PPG per misurare il battito cardiaco e la variabilità della frequenza cardiaca (HRV), accelerometro 3-assi per la cattura dell'attività fisica, sensore EDA per il rilevamento della conduttanza cutanea legata allo stress, termometro a infrarossi per la	

temperatura periferica della pelle, e un pulsante per marcare eventi e sincronizzare segnali fisiologici con specifici eventi (https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/).....	28
Figura 5.6 - Specifiche tecniche dell'Empatica E4 (https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/).....	29
Figura 5.7 - Tobii Pro Glasses 3 (https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3).....	29
Figura 5.8 - Schema riassuntivo della stazione di lavoro	30
Figura 5.9 - Partecipante che reagisce al suono appena ascoltato e preme il tasto associato	31
Figura 5.10 - Registrazione della visuale del partecipante tramite Tobii Pro Glasses 3 mentre risponde alla task secondaria	32
Figura 5.11 - Immagini di partecipanti durante la prova.....	35
Figura 6.1 - Schermata che riporta l'interfaccia di Tobii Pro Lab	37
Figura 6.2 - Istogramma dei tempi di reazione al test uditivo iniziale di ogni partecipante.....	38
Figura 6.3 - Istogramma dei tempi di reazione al test uditivo finale di ogni partecipante ..	38
Figura 6.4 - Boxplot delle medie dei due test uditivi	41
Figura 6.5 - Boxplot delle deviazioni standard dei due test uditivi.....	42
Figura 6.6 - Test uditivo iniziale del partecipante 1	43
Figura 6.7 - Test uditivo finale del partecipante 1.....	43
Figura 6.8 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 1	44
Figura 6.9 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 1.....	46
Figura 6.10 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 1	48
Figura 6.11 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 1	48
Figura 6.12 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 1	49
Figura 6.13 - Numero di fissazioni del partecipante 1	50
Figura 6.14 - Numero di saccadi del partecipante 1	51
Figura 6.15 - Diametro pupillare medio del partecipante 1.....	51
Figura 6.16 - Test uditivo iniziale del partecipante 2.....	52
Figura 6.17 - Test uditivo finale del partecipante 2.....	53
Figura 6.18 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 2.....	53
Figura 6.19 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 2.....	54
Figura 6.20 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 2.....	56
Figura 6.21 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 2	57
Figura 6.22 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 2	58
Figura 6.23 - Numero di fissazioni del partecipante 2	59
Figura 6.24 - Numero di saccadi del partecipante 2	59
Figura 6.25 - Diametro pupillare medio del partecipante 2.....	60
Figura 6.26 - Test uditivo iniziale del partecipante 3	61
Figura 6.27 - Test uditivo finale del partecipante 3.....	61
Figura 6.28 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 3	62
Figura 6.29 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 3.....	63
Figura 6.30 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 3.....	65
Figura 6.31 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 3	65
Figura 6.32 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 3	66
Figura 6.33 - Numero di fissazioni del partecipante 3	67
Figura 6.34 - Numero di saccadi del partecipante 3	68
Figura 6.35 - Diametro pupillare medio del partecipante 3.....	68
Figura 6.36 - Test uditivo iniziale del partecipante 4.....	69
Figura 6.37 - Test uditivo finale del partecipante 4.....	70

Figura 6.38 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 4.....	70
Figura 6.39 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 4.....	71
Figura 6.40 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 4.....	73
Figura 6.41 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 4.....	73
Figura 6.42 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 4.....	74
Figura 6.43 - Numero di fissazioni del partecipante 4.....	75
Figura 6.44 - Numero di saccadi del partecipante 4.....	75
Figura 6.45 - Diametro pupillare medio del partecipante 4.....	76
Figura 6.46 - Test uditivo iniziale del partecipante 5.....	77
Figura 6.47 - Test uditivo finale del partecipante 5.....	78
Figura 6.48 - Tempo di completamento di ogni assemblaggio del partecipante 5.....	78
Figura 6.49 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 5.....	79
Figura 6.50 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 5.....	81
Figura 6.51 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 5.....	81
Figura 6.52 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 5.....	82
Figura 6.53 - Numero di fissazioni del partecipante 5.....	83
Figura 6.54 - Numero di saccadi del partecipante 5.....	83
Figura 6.55 - Diametro pupillare medio del partecipante 5.....	84
Figura 6.56 - Test uditivo iniziale del partecipante 6.....	85
Figura 6.57 - Test uditivo finale del partecipante 6.....	86
Figura 6.58 - Tempo di completamento di ogni singolo assemblaggio del partecipante 6.....	86
Figura 6.59 - Tempi di reazione alla secondary task del partecipante 6.....	87
Figura 6.60 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 6.....	89
Figura 6.61 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 6.....	90
Figura 6.62 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 6.....	90
Figura 6.63 - Numero di fissazioni del partecipante 6.....	91
Figura 6.64 - Numero di saccadi del partecipante 6.....	92
Figura 6.65 - Diametro pupillare medio del partecipante 6.....	92
Figura 6.66 - Test uditivo iniziale del partecipante 7.....	93
Figura 6.67 - Test uditivo finale del partecipante 7.....	94
Figura 6.68 - Tempo di completamento di ogni singolo assemblaggio del partecipante 7.....	94
Figura 6.69 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 7.....	95
Figura 6.70 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 7.....	97
Figura 6.71 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 7.....	97
Figura 6.72 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 7.....	98
Figura 6.73 - Numero di fissazioni del partecipante 7.....	99
Figura 6.74 - Diametro pupillare medio del partecipante 7.....	99
Figura 6.75 - Numero di saccadi del partecipante 7.....	100
Figura 6.76 - Test uditivo iniziale del partecipante 8.....	101
Figura 6.77 - Test uditivo finale del partecipante 8.....	101
Figura 6.78 - Tempo di completamento di ogni singolo assemblaggio del partecipante 8.....	102
Figura 6.79 - Tempi di risposta alla secondary task del partecipante 8.....	103
Figura 6.80 - Skin conductance level (SCL) del partecipante 8.....	105
Figura 6.81 - Skin conductance response (SCR) del partecipante 8.....	105
Figura 6.82 - Andamento della frequenza cardiaca del partecipante 8.....	106
Figura 6.83 - Numero di fissazioni del partecipante 8.....	107
Figura 6.84 - Numero di saccadi del partecipante 8.....	107
Figura 6.85 - Diametro pupillare medio del partecipante 8.....	108

Figura appendice 1 - Codice del test uditivo iniziale e relativa spiegazione realizzati su PyCharm	112
Figura appendice 2 - Codice della secondary task e relativo commento realizzati su PyCharm	113
Figura appendice 3 - Rappresentazione dei dataset grezzi di skin conductance level (SCL) di ciascun partecipante.....	115
Figura appendice 4 - Rappresentazione dei dataset grezzi di SCR per ciascun partecipante	115
Figura appendice 5 - Rappresentazione dei dataset grezzi del numero di fissazioni di ciascun partecipante.....	116
Figura appendice 6 - Rappresentazione dei dataset grezzi del numero di saccadi di ciascun partecipante.....	117
Figura appendice 7 - Rappresentazione dei dataset grezzi del diametro pupillare medio di ciascun partecipante.....	117
Figura appendice 8 - Rappresentazione dei dataset normalizzati di skin conductance level (SCL) di ciascun partecipante.....	118
Figura appendice 9 - Rappresentazione dei dataset normalizzati di SCR per ciascun partecipante.....	119
Figura appendice 10 - Rappresentazione dei dataset normalizzati del numero di fissazioni di ciascun partecipante.....	120
Figura appendice 11 - Rappresentazione dei dataset normalizzati del numero di saccadi di ciascun partecipante.....	120
Figura appendice 12 - Rappresentazione dei dataset normalizzati del diametro pupillare di ciascun partecipante.....	121
Figura appendice 13 - Rappresentazione completa dei dataset normalizzati del diametro pupillare di ogni partecipante	121

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 - Schema delle principali metriche di tracciamento oculare.....	19
Tabella 5.1 - Schema riassuntivo dei ruoli associati alle operazioni della sequenza di assemblaggio	27
Tabella 6.1 - Medie e Deviazioni standard dei test uditivi per partecipante	39
Tabella 6.2 - Valori ottenuti con Shapiro-Wilk Test.....	40
Tabella 6.3 - Valori ottenuti con paired t-test.....	40
Tabella 6.4 - Rappresentazione del calcolo della media mobile sui primi valori della prova: i primi tre valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 4 valori per volta	45
Tabella 6.5 - Prestazioni della secondary task del partecipante 1	46
Tabella 6.6 - Valutazione soggettiva del partecipante 1.....	47
Tabella 6.7 - Prestazioni della secondary task del partecipante 2	55
Tabella 6.8 - Valutazione soggettiva del partecipante 2.....	55
Tabella 6.9 - Rappresentazione del calcolo della media mobile su alcuni valori della prova: i primi due valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 720 valori per volta e il primo disponibile corrisponde ai 179,75 sec (ossia il 720-esimo valore contando lo 0).....	57
Tabella 6.10 - Prestazioni della secondary task del partecipante 3	63
Tabella 6.11 - Valutazione soggettiva del partecipante 3.....	64
Tabella 6.12 - Rappresentazione del calcolo della media mobile del numero di fissazioni su alcuni valori della prova: i primi cinque valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 6 valori per volta.....	67
Tabella 6.13 - Prestazioni della secondary task del partecipante 4	72
Tabella 6.14 - Valutazione soggettiva del partecipante 4.....	72
Tabella 6.15 - Rappresentazione del calcolo della media mobile del numero di saccadi su alcuni valori della prova: i primi cinque valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 6 valori per volta.....	76
Tabella 6.16 - Prestazioni della secondary task del partecipante 5	80
Tabella 6.17 - Valutazione soggettiva del partecipante 5.....	80
Tabella 6.18 - Rappresentazione del calcolo della media mobile del diametro pupillare medio su alcuni valori della prova: i primi cinque valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 6 valori per volta.....	84
Tabella 6.19 - Prestazioni della secondary task del partecipante 6	88
Tabella 6.20 - Valutazione soggettiva del partecipante 6.....	88
Tabella 6.21 - Rappresentazione del calcolo della media mobile su alcuni valori della prova: i primi due valori sono non disponibili (NA) in quanto si fa una media su 720 valori per volta e il primo disponibile corrisponde ai 179,75 sec (ossia il 720-esimo valore contando lo 0).....	89
Tabella 6.22 - Prestazioni della secondary task del partecipante 7	96
Tabella 6.23 - Valutazione soggettiva del partecipante 7.....	96
Tabella 6.24 - Prestazioni della secondary task del partecipante 8	103
Tabella 6.25 - Valutazione soggettiva del partecipante 8.....	104
Tabella appendice 1 - Correlazione calcolata sui dati grezzi e significatività.....	122
Tabella appendice 2 - Correlazione calcolata sui dati normalizzati e significatività	123

Bibliografia e sitografia

- Acker, Bram Van. «Mental Workload Monitoring in the Manufacturing Industry: Conceptualisation, Operationalisation and Implementation», s.d, 2020. https://www.researchgate.net/publication/346441907_Mental_Workload_Monitoring_in_the_Manufacturing_Industry_Conceptualisation_Operationalisation_and_Implementation
- Antonenko, P., Paas, F., Grabner, R. *et al.* Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load. *Educ Psychol Rev* **22**, 425–438 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y>
- 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>
- Arana-De Las Casas, Nancy Ivette, Jorge De La Riva-Rodríguez, Aide Aracely Maldonado-Macías, e David Sáenz-Zamarrón. «Cognitive Analyses for Interface Design Using Dual N-Back Tasks for Mental Workload (MWL) Evaluation». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20, fasc. 2 (9 gennaio 2023): 1184. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021184>.
- Bauer, A., Wollherr, D., & Buss, M. (2008). Human-Robot Collaboration: A Survey. *International Journal of Humanoid Robotics*. Technische Universität München, Institute of Automatic Control Engineering (LSR), Munich, Germany. Ricevuto il 1 maggio 2007, rivisto il 29 settembre 2007, <https://doi.org/10.1142/S0219843608001303>
- 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, Jennifer Romano, e Andrew Jonathan Schall, a c. di. *Eye Tracking in User Experience Design*. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2014.
- Biondi, Francesco N., Angela Cacanindin, Caitlyn Douglas, e Joel Cort. «Overloaded and at Work: Investigating the Effect of Cognitive Workload on Assembly Task Performance». *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 63, fasc. 5 (agosto 2021): 813–20. <https://doi.org/10.1177/0018720820929928>.
- Biondi, Francesco N., Babak Saberi, Frida Graf, Joel Cort, Prarthana Pillai, e Balakumar Balasingam. «Distracted Worker: Using Pupil Size and Blink Rate to Detect Cognitive Load during Manufacturing Tasks». *Applied Ergonomics* 106 (gennaio 2023): 103867. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103867>.
- Bommer, Sharon Claxton, e Mary Fendley. «A Theoretical Framework for Evaluating Mental Workload Resources in Human Systems Design for Manufacturing Operations». *International Journal of Industrial Ergonomics* 63 (gennaio 2018): 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.10.007>.
- Brookings, Jeffrey B.; Wilson, Glenn F.; Swain, Carolyne R., Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control, *Biological Psychology*, Volume 42, Issue 3, 1996, Pages 361-377, ISSN 0301-0511, [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05167-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05167-8)
- Buchholz, Victoria, e Stefan Kopp. «Towards an Adaptive Assistance System for Monitoring Tasks: Assessing Mental Workload Using Eye-Tracking and Performance Measures». In *2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS)*, 1–6. Rome, Italy: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICHMS49158.2020.9209435>.
- Buchwald, Mikolaj, Szymo Kupinski, Adam Bykowski, Joanna Marcinkowska, Dawid Ratajczyk, e Marcin Jukiewicz. «Electrodermal Activity as a Measure of Cognitive Load: A Methodological Approach». In *2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures*,

- Arrangements, and Applications (SPA)*, 175–79. Poznan, Poland: IEEE, 2019.
<https://doi.org/10.23919/SPA.2019.8936745>.
- Cain, Brad. "A review of the mental workload literature." *DTIC Document* (2007).
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7367184a149e20107188c3baaf034fcd3c3b241ea>
- Chandler, Paul & Sweller, John. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. Faculty of Education - Papers. 8. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2.
- Colgate J. Edward, Wannasuphprasit Witaya, Peshkin Michael A., Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators, Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Atlanta, GA, DSC-Vol. 58, pp- 433-39
https://peshkin.mech.northwestern.edu/publications/1996_Colgate_CobotsRobotsCollaboration.pdf
- Das, Laya, Mohd Umair Iqbal, Punitkumar Bhavsar, Babji Srinivasan, e Rajagopalan Srinivasan. «Toward Preventing Accidents in Process Industries by Inferring the Cognitive State of Control Room Operators through Eye Tracking». *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 6, fasc. 2 (5 febbraio 2018): 2517–28.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03971>.
- Drouot, Mathilde, Nathalie Le Bigot, Emmanuel Bricard, Jean-Louis De Bougrenet, e Vincent Nourrit. «Augmented Reality on Industrial Assembly Line: Impact on Effectiveness and Mental Workload». *Applied Ergonomics* 103 (settembre 2022): 103793.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103793>.
- Duchowski, Andrew T. *Eye Tracking Methodology*. Cham: Springer International Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57883-5>.
- 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>
- 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>
- Giovannetti E., Cappelli A., “L’interazione Uomo-Robot”, Laboratorio KDD Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione “A. Faedo”, CNR, Pisa, 2003
https://www.researchgate.net/profile/Emiliano-Giovannetti/publication/265031857_L'INTERAZIONE_UOMO-ROBOT_HUMAN-ROBOT_INTERACTION/links/0912f50c85bd5de3a3000000/LINTERAZIONE-UOMO-ROBOT-HUMAN-ROBOT-INTERACTION.pdf
- García-Saravia J., Salas-Morera L., García-Hernández L., Cabrera A. A., “Application of an Eye Tracker Over Facility Layout Problem to Minimize User Fatigue”, *Advances in Computational Intelligence*, 2017, Volume 10305, ISBN : 978-3-319-59152-0
https://doi.org/10.1007/978-3-319-59153-7_13
- Guo, Yao, Daniel Freer, Fani Deligianni, e Guang-Zhong Yang. «Eye-Tracking for Performance Evaluation and Workload Estimation in Space Telerobotic Training». *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 52, fasc. 1 (febbraio 2022): 1–11.
<https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3107519>.
- Grassmann, Mariel, Elke Vlemincx, Andreas Von Leupoldt, Justin M. Mittelstädt, e Omer Van Den Bergh. «Respiratory Changes in Response to Cognitive Load: A Systematic Review». *Neural Plasticity* 2016 (2016): 1–16. <https://doi.org/10.1155/2016/8146809>.

- Haji, Faizal A, David Rojas, Ruth Childs, Sandrine De Ribaupierre, e Adam Dubrowski. «Measuring Cognitive Load: Performance, Mental Effort and Simulation Task Complexity». *Medical Education* 49, fasc. 8 (agosto 2015): 815–27. <https://doi.org/10.1111/medu.12773>.
- He, X., Wang, L., Gao, X.H., & Chen, Y. (2012). The eye activity measurement of mental workload based on basic flight task. *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, 502-507. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2012.6301203>
- Holland, M. K., & Tarlow, G. (1975). Blinking and thinking. *Perceptual and Motor Skills*, 41(2), 403–406. <https://doi.org/10.2466/pms.1975.41.2.403>
- 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. https://www.researchgate.net/publication/254913339_Eye_Tracking_A_Comprehensive_Guide_To_Methods_And_Measures
- Kohlmorgen, Jens, Guido Dornhege, Mikio L. Braun, Benjamin Blankertz, Klaus-Robert Müller, Gabriel Curio, Konrad Hagemann, Andreas Bruns, Michael Schrauf, e Wilhelm E. Kincses. «Improving Human Performance in a Real Operating Environment through Real-Time Mental Workload Detection». In *Toward Brain-Computer Interfacing*, a cura di Guido Dornhege, José Del R. Millán, Thilo Hinterberger, Dennis J. McFarland, e Klaus-Robert Müller, 409–22. The MIT Press, 2007. <https://doi.org/10.7551/mitpress/7493.003.0031>.
- Kosch, Thomas, Jakob Karolus, Havy Ha, e Albrecht Schmidt. «Your Skin Resists: Exploring Electrodermal Activity as Workload Indicator during Manual Assembly». In *Proceedings of the ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, 1–5. Valencia Spain: ACM, 2019. <https://doi.org/10.1145/3319499.3328230>.
- Ledger, H. (2013) 'The effect cognitive load has on eye blinking', *The Plymouth Student Scientist*, 6(1), p. 206-223. <http://hdl.handle.net/10026.1/14015>
- Li, Penghui, Yibing Li, Yao Yao, Changxu Wu, Bingbing Nie, e Shengbo Eben Li. «Sensitivity of Electrodermal Activity Features for Driver Arousal Measurement in Cognitive Load: The Application in Automated Driving Systems». *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23, fasc. 9 (settembre 2022): 14954–67. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3135266>.
- Lobo, Jesus L., Javier Del Ser, Flavia De Simone, Roberta Presta, Simona Collina, e Zdenek Moravek. «Cognitive Workload Classification Using Eye-Tracking and EEG Data». In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, 1–8. Paris France: ACM, 2016. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964585>.
- Lu, Lu, Ziyang Xie, Hanwen Wang, Li Li, e Xu Xu. «Mental Stress and Safety Awareness during Human-Robot Collaboration - Review». *Applied Ergonomics*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103832>
- Lušić M., Fischer C., Braz K. S., Alam M., Hornfeck R., Franke J., “Static Versus Dynamic Provision of Worker Information in Manual Assembly: A Comparative Study Using Eye Tracking to Investigate the Impact on Productivity and Added Value Based on Industrial Case Examples”, *Procedia CIRP*, Volume 57, 2016, Pages 504-509, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.087>.
- Matheson, Eloise, Riccardo Minto, Emanuele G. G. Zampieri, Maurizio Faccio, e Giulio Rosati. «Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review». *Robotics* 8, fasc. 4 (6 dicembre 2019): 100. <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>.
- Mukherjee, Debasmita, Kashish Gupta, Li Hsin Chang, e Homayoun Najjaran. «A Survey of Robot Learning Strategies for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings».

- Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 73 (febbraio 2022): 102231.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102231>.
- Novak, Domen, Benjamin Beyeler, Ximena Omlin, e Robert Riener. «Workload Estimation in Physical Human–Robot Interaction Using Physiological Measurements». *Interacting with Computers* 27, fasc. 6 (novembre 2015): 616–29. <https://doi.org/10.1093/iwc/iwu021>.
- Palinko, Oskar. «Gaze Tracking for Human Robot Interaction», 2017, s.d.
<https://www.iit.it/documents/175012/591433/palinko.pdf/e3fd16a4-e9cd-e688-cb7c-044baf078537>
- Park, Babette, e Roland Brünken. «The Rhythm Method: A New Method for Measuring Cognitive Load—An Experimental Dual-Task Study». *Applied Cognitive Psychology* 29, fasc. 2 (marzo 2015): 232–43. <https://doi.org/10.1002/acp.3100>.
- Prabhakar, Gowdham, N Madhu, e Pradipta Biswas. «Comparing Pupil Dilation, Head Movement, and EEG for Distraction Detection of Drivers», 2018.
<https://doi.org/10.14236/ewic/HCI2018.69>.
- Punde P. A., Jadhav M. E. and Manza R. R., "A study of eye tracking technology and its applications," *2017 1st International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM)*, Aurangabad, India, 2017, pp. 86-90,
<https://doi.org/10.1109/ICISIM.2017.8122153>.
- Rani, P., Sims, J., Brackin, R., Sarkar, N., 2002. Online stress detection using psychophysiological signals for implicit human-robot cooperation. *Robotica* 20 (6), 673–685. <https://doi.org/10.1017/S0263574702004484>.
- Romine, William L., Noah L. Schroeder, Josephine Graft, Fan Yang, Reza Sadeghi, Mahdiah Zabihimayvan, Dipesh Kadariya, e Tanvi Banerjee. «Using Machine Learning to Train a Wearable Device for Measuring Students’ Cognitive Load during Problem-Solving Activities Based on Electrodermal Activity, Body Temperature, and Heart Rate: Development of a Cognitive Load Tracker for Both Personal and Classroom Use». *Sensors* 20, fasc. 17 (27 agosto 2020): 4833. <https://doi.org/10.3390/s20174833>.
- 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>
- Segura P., Lobato-Calleros O., Ramírez-Serrano A., Soria I., Human-robot collaborative systems: Structural components for current manufacturing applications, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Volume 3, 2021, 100060, ISSN 2666-9129,
<https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100060>.
- Shehu, Ibrahim Shehi, Yafei Wang, Athuman Mohamed Athuman, and Xianping Fu. 2021. "Remote Eye Gaze Tracking Research: A Comparative Evaluation on Past and Recent Progress" *Electronics* 10, no. 24: 3165. <https://doi.org/10.3390/electronics10243165>
- Shi, Chao, e Ling Rothrock. «Validating an Abnormal Situation Prediction Model for Smart Manufacturing in the Oil Refining Industry». *Applied Ergonomics* 101 (maggio 2022): 103697. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103697>.
- Tao, Da, Haibo Tan, Hailiang Wang, Xu Zhang, Xingda Qu, e Tingru Zhang. «A Systematic Review of Physiological Measures of Mental Workload». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, fasc. 15 (30 luglio 2019): 2716.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16152716>.
- Tokuda, S., G. Obinata, E. Palmer, e A. Chaparro. «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*, 4523–29. Boston, MA: IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091121>.
- Tsai, Y, E Viirre, C Strychacz, B Chase, e T-P Jung. «Task Performance and Eye Activity: Predicting Behavior Relating to Cognitive Workload», 2007, s.d.

- Upasani, Satyajit. «Characterizing Mental Workload in Physical Human-Robot Interaction Using Eye-Tracking Measures», 2023, s.d.
- 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)
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. (1998). Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics*, 41(5), 656–669. <https://doi.org/10.1080/001401398186829>
- Wedel M. and Pieters R. (2008), "Eye Tracking for Visual Marketing", *Foundations and Trends® in Marketing: Vol. 1: No. 4*, pp 231-320. <http://dx.doi.org/10.1561/1700000011>
- Wu, Lei, Zhijuan Zhu, Huai Cao, e Bin Li. «Influence of Information Overload on Operator’s User Experience of Human–Machine Interface in LED Manufacturing Systems». *Cognition, Technology & Work* 18, fasc. 1 (febbraio 2016): 161–73.
<https://doi.org/10.1007/s10111-015-0352-0>.
- Young, Mark S., Karel A. Brookhuis, Christopher D. Wickens, e Peter A. Hancock. «State of Science: Mental Workload in Ergonomics». *Ergonomics* 58, fasc. 1 (2 gennaio 2015): 1–17. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151>.
- Zheng, Robert Z. *Cognitive Load Measurement and Application: A Theoretical Framework for Meaningful Research and Practice*. A cura di Robert Z. Zheng. 1ª ed. Routledge, 2017.
<https://doi.org/10.4324/9781315296258>.
- Zheng, Ting, Christoph H. Glock, e Eric H. Grosse. «Opportunities for Using Eye Tracking Technology in Manufacturing and Logistics: Systematic Literature Review and Research Agenda». *Computers & Industrial Engineering* 171 (settembre 2022): 108444.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108444>.

- [1] <https://www.ashokcharan.com/Marketing-Analytics/~bm-eye-tracking-how-it-works.php#gsc.tab=0>
- [2] <https://www.barefootteflteacher.com/p/what-is-cognitive-load-theory>
- [3] <https://blog.item24.com/it/applicazioni-dei-robot-industriali/collaborazione-uomo-robot-i-vantaggi-dei-cobot-nellindustria/>
- [4] <https://www.certifico.com/normazione/261-documenti-riservati-normazione/organismi-normazione/documenti-normazione-enti/3206-robot-collaborativi-la-nuova-specifica-tecnica-iso-ts-15066-2016>
- [5] https://connect.tobii.com/s/article/understanding-tobii-pro-lab-eye-tracking-metrics?language=en_US
- [6] <https://www.empatica.com/en-eu/research/e4/>
- [7] <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2022/08/10/the-best-examples-of-human-and-robot-collaboration/>

- [8] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2021.712463/full>
- [9] <https://www.innovationpost.it/tecnologie/robotica/bmw-compra-3500-robot-fanuc-per-realizzare-le-sue-nuove-linee-di-produzione/>
- [10] <https://www.kuka.com/it-it/future-production/collaborazione-uomo-robot>
- [11] <https://www.kuka.com/it-it/settori/banca-dati-di-soluzioni/2017/09/solution-robotics-bmw-landshut>
- [12] <https://manufacturingdigital.com/ai-and-automation/eye-tracking-provides-valuable-insight-factory-safety>
- [13] <https://www.pensierocritico.eu/teoria-del-carico-cognitivo.html>
- [14] <https://www.tobii.com/blog/improve-standardized-work>
- [15] <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3>
- [16] <https://www.tsw.it/journal/ricerca/carico-cognitivo-user-experience-metodologie-rilevamento/>

Ringraziamenti

Sono tante le persone che sono state importanti in questo percorso al Politecnico di Torino.

Innanzitutto, desidero ringraziare il Professore Fiorenzo Franceschini, Relatore di questa tesi, per la fiducia concessami e per i suoi preziosi suggerimenti. Anche il contributo di Riccardo Gervasi è stato rilevante nella realizzazione di questo lavoro. Grazie per la disponibilità e gentilezza che mi avete mostrato. Ogni confronto con Voi mi ha sempre permesso di vedere le cose con consapevolezza diverse.

Voglio ora ringraziare la mia famiglia per essere al mio fianco in ogni mia scelta. Oltre ad avermi sostenuta economicamente in questo lungo viaggio, la vostra fiducia in me non è mai mancata. A mia mamma, che mi ha sempre chiamato la sera per ascoltare il racconto delle mie giornate. La distanza spesso si fa sentire, ma il tuo abbraccio mi scaldierà sempre il cuore. A mio papà, che mi ha insegnato a non fermarmi mai davanti alle paure e agli ostacoli. Nonostante i nostri battibecchi, so che faresti di tutto per me. A mio fratello, che nonostante la lontananza, riesce a infastidirmi lo stesso. Grazie per fare il primo passo e chiamarmi quando sono a Torino. Ti voglio bene.

Ringrazio le mie nonne, che seppur quest'oggi lontane, spero siano fiere di me.

Ringrazio Claudia, la mia compagna di disavventure da 22 anni. Nonostante le scelte di vita differenti, la tua amicizia sincera è una certezza per me, come è una certezza che ti risponderò sempre alle 4 di notte per parlare.

Ringrazio Giusy, la mia spalla all'università e non solo. Affrontare questo percorso con te, mi ha fatto scoprire una vera amica, su cui poter contare in ogni momento. Non vedo l'ora di organizzare il prossimo viaggio, direzione?

Ringrazio Marco, il mio ragazzo, per esserci sempre e per sostenermi nelle mie decisioni. Anche se sono pochi mesi che ci conosciamo, non smetterò mai di ringraziarti per ciò che fai per me.

Ringrazio Alessia, Chiara, Eleonora, Lydia, Giulia e Claudio. Con voi ho condiviso momenti belli e brutti e ho sempre ricevuto il consiglio giusto. Vi voglio bene.

Ringrazio mia zia Emanuela per essere la persona che più crede in me in assoluto. Seppur non legga sempre tutti i libri che mi regali, non smetti mai di trattarmi come una figlia.

Ringrazio tutti i miei amici ed in particolare Federico, Katia, Luca, Sergio e Tommaso. Con voi, Tommaso e Luca, ho condiviso il mio percorso universitario e non avrei potuto chiedere compagni di progetti migliori, oltre che di uscite. Grazie per il confronto e il sostegno continuo che ci siamo scambiati. A te, Sergio, ringrazio perché quest'esperienza sarebbe stata completamente diversa senza conoscerti, hai dato un altro sapore alle domeniche grazie al tuo pollo fritto. Non dimenticherò mai il primo incontro fuori dal poli, chi lo avrebbe mai detto che da lì a poco avrei conosciuto così tanti perugini. A te, Federico, grazie per farmi sentire come una sorella. Sono felice che il nostro rapporto sia così cresciuto da quando sei qui a Torino. E a te Katia, grazie per diffondere il tuo mood di vita, sei fantastica e non devi cambiare mai. Vi voglio bene.

Ovviamente ringrazio tutte le mie cavie dell'esperimento, senza di voi tutto questo non sarebbe possibile.

E, infine, grazie a me, per non aver mai mollato, per aver affrontato questa avventura iniziata nel 2018 ed aver raggiunto anche questo traguardo.