



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**STUDIO E SPERIMENTAZIONE DI SISTEMI INNOVATIVI
PER SUPPORTARE L'OPERATORE IN UNA POSTAZIONE
DI ASSEMBLAGGIO CAVI**

**STUDY AND TESTING OF INNOVATIVE SYSTEMS TO
SUPPORT THE OPERATOR IN A CABLE ASSEMBLY
STATION**

Relatrice: Chiar/ma
Papetti Alessandra

Tesi di Laurea di:
Duca Gabriel

Correlatrice: Chiar/ma
Ciccarelli Marianna

A.A. 2022/2023

A mia madre, Gessica,
che mi ha spronato sin dal primo momento a perseguire i miei sogni

A mio padre, Marco,
che mi ha insegnato l'umiltà e l'arte del sacrificio

A mia sorella, Annachiara,
per il supporto e la carica trasmessa

A Carlotta, la mia ragazza,
che mi è stata sempre a fianco e ha creduto in me

A Bonfi, amico e fratello per scelta,
che ha reso gli ultimi due anni di studi memorabili

Grazie

Sommario

| | |
|--|----|
| 1. Introduzione | 4 |
| 2. Tecnologie per la digitalizzazione della smart factory | 7 |
| 3. Azienda | 9 |
| 3.1 Caso studio | 9 |
| 3.1.1 Linea di assemblaggio attuale | 9 |
| 4. Modalità di istruzioni di lavoro proposte | 12 |
| 5. Test effettuati | 15 |
| 5.1 Test sull'inclinazione | 17 |
| 5.1.1 Xsens MVN | 19 |
| 5.1.2 Analisi RULA | 20 |
| 5.2 Test sulle tipologie di istruzioni | 23 |
| 6. Risultati e discussione | 26 |
| 6.1 Valutazione ergonomica | 26 |
| 6.1.1 Risultati del test sull'inclinazione | 27 |
| 6.1.2 Risultati del test sulle tipologie di istruzioni | 31 |
| 6.2 Valutazione soggettiva | 34 |
| 6.3 Valutazione delle performance | 40 |
| 7. Conclusione | 42 |

1.Introduzione

“L’innovazione è diventata la religione industriale della fine del XX secolo. Le imprese la vedono come lo strumento chiave per aumentare profitti e quote di mercato. I governi si affidano ad essa quando cercano di migliorare l’economia. Nel mondo, la retorica dell’innovazione ha recentemente rimpiazzato quella dell’economia del benessere, presente dal secondo dopoguerra”. (Economist)

Da qualche anno ormai è emersa la consapevolezza che una “cultura dell’innovazione” non è solo l’elemento per distinguersi nell’arena competitiva, ma l’approccio naturale per rimanere sul mercato; eppure, talvolta si ha la sensazione che la parola “innovazione” rimanga un mantra più che una consapevolezza dei meccanismi che la generano.

L’espressione “industria 4.0”, di cui tanto si discute nell’ultimo periodo, si riferisce all’attuale tendenza all’automazione e allo scambio di dati nelle tecnologie manifatturiere. Questa “quarta rivoluzione” prevede l’integrazione di sistemi cyber-fisici negli impianti di produzione e consente alle fabbriche di diventare "intelligenti", ovvero, dà loro la possibilità di comunicare con sistemi esterni, fornendo dati e informazioni in tempo reale che possono essere utilizzati per ottimizzare la produzione, ridurre gli sprechi e migliorare l’efficienza.

Il concetto di industria 4.0 mira a creare sistemi manifatturieri più flessibili, efficienti e interconnessi, in grado di adattarsi alle mutevoli esigenze di mercato e dei clienti.

Per quanto detto fino ad ora è facile capire che, in un contesto aziendale odierno, i meccanismi di cambiamento e di governo dell'azienda non possono essere gli stessi che hanno accompagnato il secolo scorso.

Molti affermano che questo modo di cambiare la fabbrica potrebbe comportare una perdita di posti di lavoro.

Non è questo, però, il modo di affrontare un cambiamento che comunque è in atto, e che, se gestito nel modo corretto, può rappresentare, piuttosto, un'opportunità enorme. Dobbiamo realizzare il fatto che, in futuro, il lavoratore non lavorerà più principalmente in azienda, con ritmi e modalità di presenza del passato, ma “a progetto” oppure “a risultato”, e probabilmente sarà un lavoratore che avrà più datori di lavoro. Può darsi, addirittura, che sarà lo stesso fornitore di macchinari altamente avanzati ad offrire, assieme al macchinario, anche un tecnico.

L'operatore 4.0 sarà altamente qualificato e utilizzerà tecnologie avanzate, come robot collaborativi, realtà aumentata, intelligenza artificiale, analisi dati e altre tecnologie digitali per migliorare i processi produttivi.

Questa transizione tecnologica enfatizza, perciò, una prospettiva decisamente incentrata sull'uomo e sulla prevenzione dei rischi ergonomici ad essa legati, in quanto il numero crescente di varianti di prodotto richiede un carico cognitivo maggiore e aumenta la probabilità di errori umani.

In questo scenario, dunque, fornire agli operatori delle istruzioni di lavoro facilmente comprensibili ed intuitive diventa fondamentale [1].

In questa tesi verrà approfondito uno studio mirato proprio all'applicazione della tecnologia su di una catena di montaggio che si occupa di cablaggi elettrici.

La ricerca è stata commissionata da un'importante azienda italiana, la ISE cablaggi, con l'obiettivo di investigare delle soluzioni per supportare un operatore che si occupa di assemblare cavi elettrici di diverse tipologie. Nello specifico, sono stati testati quattro diverse modalità di fruizione delle istruzioni di lavoro: istruzioni cartacee, istruzioni visualizzate su un display, istruzioni fornite tramite l'applicazione di un dispositivo di realtà mista (mixed reality) e istruzioni fornite tramite un sistema di proiezione (realtà aumentata).

La sperimentazione si è conclusa con una valutazione dell'esperienza da parte dell'utente, una valutazione oggettiva delle prestazioni e una analisi posturale attraverso dei sensori inerziali.

2. Tecnologie per la digitalizzazione della smart factory

Nell'era della trasformazione digitale, Augmented, Mixed e Virtual Reality sono tra le tecnologie abilitanti più promettenti.

1. **Augmented Reality (AR):** fa incontrare il mondo digitale con il mondo fisico. L'AR può essere pensata come un'espansione dell'ambiente dell'utente, che si arricchisce in tempo reale con modelli e informazioni digitali sovrapposti, come testi, grafica e contenuti multimediali. L'obiettivo di questa tecnologia è infatti "aumentare" o, in altre parole, migliorare il mondo fisico dell'utente con informazioni contestuali, significative e pertinenti;
2. **Mixed Reality (MR):** integra modelli digitali nel mondo fisico. A differenza dell'AR consente agli utenti di interagire con i modelli artificiali visualizzati nel loro campo visivo, rendendoli così consapevoli dell'ambiente circostante;
3. **Virtual Reality (VR):** può cambiare il modo in cui il mondo viene percepito poiché immerge gli utenti in un ambiente artificiale, immaginato e generato dal computer. Gli elementi vengono separati dal mondo reale e trasportati in uno virtuale, dove gli utenti sono in grado di interagire con oggetti e luoghi percepiti con i loro cinque sensi.

Le applicazioni di AR-MR-VR combinano i seguenti componenti:

- Dispositivi hardware che funzionano come display (ad esempio display head-mounted, schermo dello smartphone, occhiali) e sorgenti di input (ad esempio sensori, fotocamera, giroscopio, ecc.);

- Applicazioni software che trasformano dati in immagini 2D o 3D;
- Server web e cloud remoti che memorizzano dati e informazioni correlate.

I principali approcci attivati dalle applicazioni AR-MR-VR sono:

- Marker-based, quando attivato da un simbolo specifico (es. QR code);
- Location-based, quando attivato su una scena reale (es. macchinario) [2]

Il potenziale di AR e MR come tecnologia assistiva è in gran parte attribuito alla loro capacità di presentare informazioni rilevanti nel posto giusto al momento giusto. In questo modo, il tempo di esecuzione dell'attività e la qualità del prodotto può essere notevolmente migliorata. Utilizzando istruzioni cartacee, l'operatore perde tempo, sforza la sua memoria, e commette molti errori evitabili.

Così, queste tecnologie rappresentano un aiuto efficace per le aziende che trattano complessi processi di assemblaggio e necessitano un aumento della flessibilità produttiva.

In contesti industriali, l'adozione di dispositivi di proiezione e visori prevale in quanto consentono all'operatore di avere le mani libere durante le attività lavorative.

3. Azienda

La ISE Cablaggi è un'azienda italiana specializzata nella progettazione e produzione di cablaggi elettrici e sistemi di connessione per applicazioni industriali. Fondata nel 1983, l'azienda offre una vasta gamma di prodotti, tra cui cavi elettrici, connettori, adattatori e componenti per l'automazione industriale.

ISE Cablaggi fornisce servizi di progettazione personalizzata per soddisfare le esigenze specifiche dei clienti e si distingue per la qualità dei suoi prodotti, la precisione dei suoi processi produttivi e la rapidità delle sue consegne. L'azienda serve una vasta gamma di settori industriali, tra cui l'automazione, l'elettronica, il trasporto e la produzione di macchinari, sia a livello nazionale che internazionale.[3]

3.1 Caso studio

Questo caso di studio, che ha coinvolto l'azienda italiana ISE Cablaggi, si è prefissato come obiettivo principale quello di attenuare i rischi ergonomici per gli operatori, aumentare l'efficienza e ridurre il tasso di errore di una linea di produzione manuale modificando il sistema di istruzioni di lavoro.

3.1.1 Linea di assemblaggio attuale

Il layout attuale della linea di produzione è mostrato in Figura 2. I tavoli metallici forati e modulari (2,5 m x 1 m) sono dotati di supporti magnetici che consentono il collegamento dei cavi.

Tra il tavolo ed i supporti viene posta una carta plotter forata per fornire le istruzioni, che fanno riferimento all'intero assieme ed indicano i connettori elettrici da fissare sui supporti terminali ed il percorso di cablaggio.

OP1 esegue la prima parte dell'assemblaggio dei cavi, che viene completata da OP2. La stazione successiva è costituita da una fascettatrice montata su un robot Omron che fissa insieme i cavi (Figura 1).

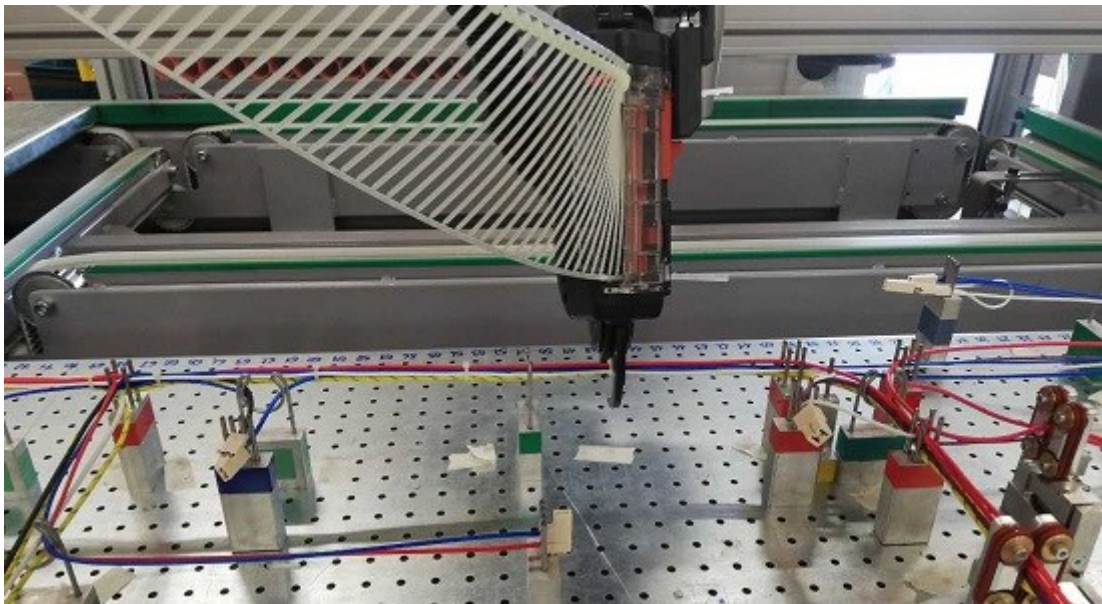


Figura 1: Fascettatrice meccanica

OP3 esegue l'ispezione visiva e corregge eventuali bloccaggi non riusciti o mancanti.

Infine, OP4 rimuove l'imbracatura dal tavolo.

I tavoli scorrono da una stazione all'altra attraverso un sistema di movimentazione automatico [4].

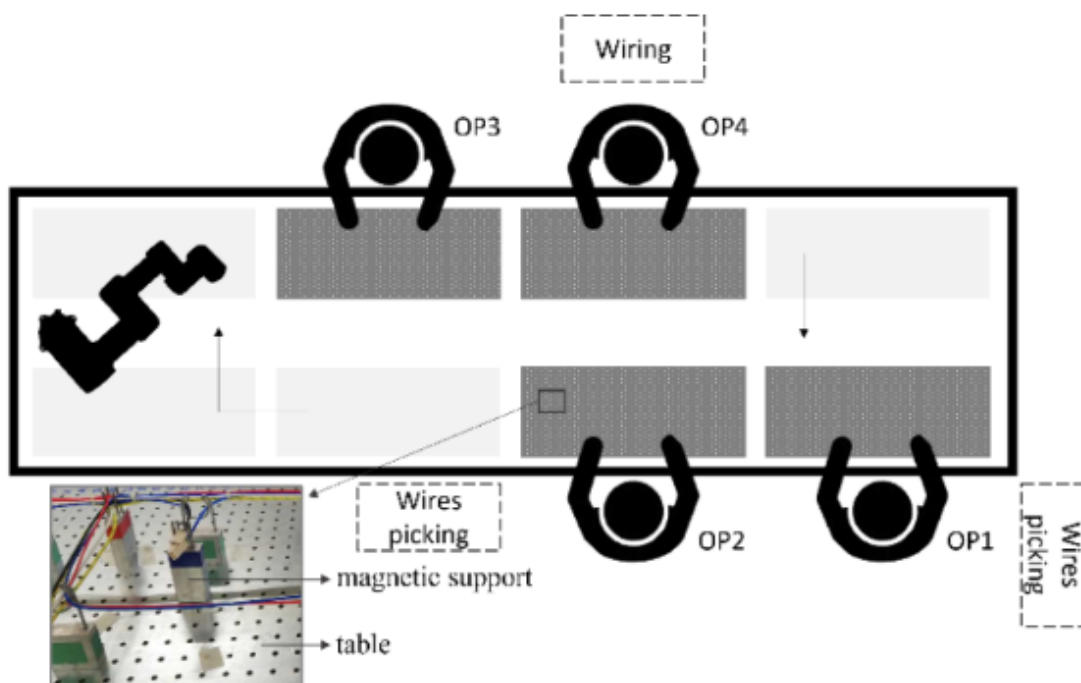


Figura 2: Linea di assemblaggio attuale

4. Modalità di istruzioni di lavoro proposte

Nella nuova catena di montaggio i tavoli potranno essere inclinati orizzontalmente per ridurre i rischi ergonomici per gli operatori e le istruzioni di lavoro saranno fornite digitalmente. A tal proposito, sono state studiate diverse tecnologie per definire quale sia la soluzione più idonea per raggiungere gli obiettivi aziendali.

Vengono proposte tre diverse modalità di fruizione delle istruzioni, come mostrato in Figura 3.

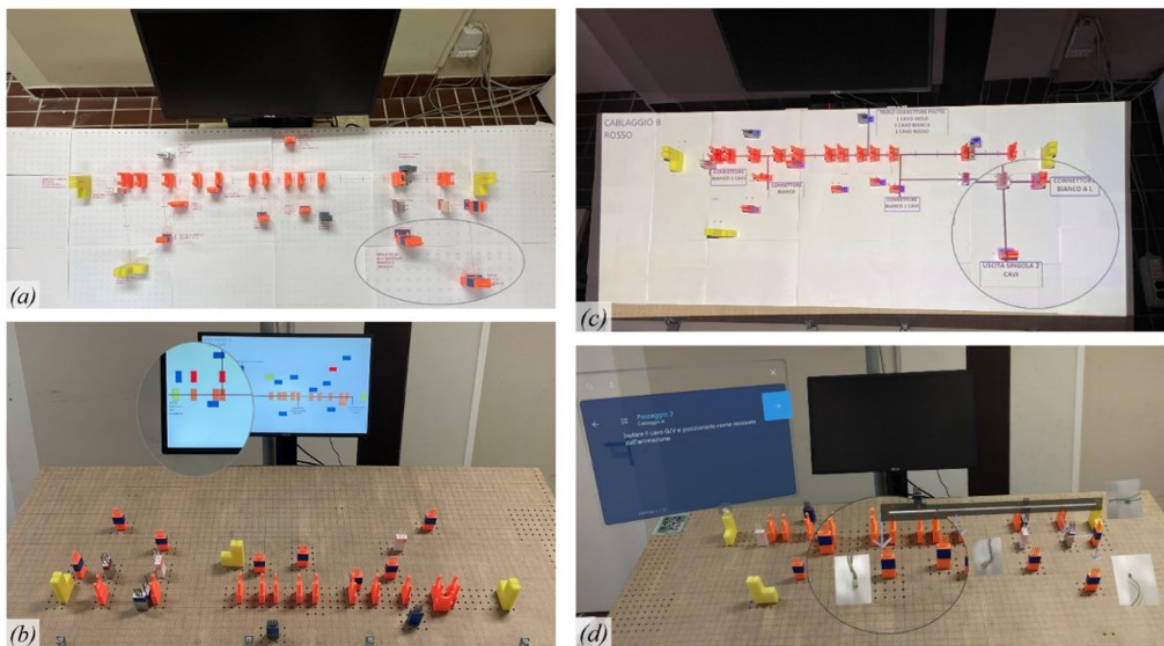


Figura 3: a) carta, b) display, c) proiettore, d) MR

La modalità cartacea viene utilizzata per confrontare le nuove modalità digitali con quelle tradizionali e consiste in una carta plotter, di dimensioni uguali alla tavola e

forata per l'inserimento dei supporti, su cui sono riportate le indicazioni di percorso dei cavi e le sagome rettangolari dei supporti metallici (Figura 3a). La peculiarità peggiore di questa modalità è che non viene indicata la sequenza dei cablaggi.

Per le istruzioni digitalizzate sono state sfruttate tre tecnologie: un display, un proiettore e un visore di realtà aumentata. In tutte e tre le modalità, le istruzioni vengono fornite passo dopo passo, un cavo alla volta. In questo modo l'operatore può leggere le indicazioni di un solo cavo e completarne il cablaggio, senza confondersi con informazioni ridondanti.

Un monitor da 24 pollici viene utilizzato come display e viene posizionato sopra il tavolo nella postazione di lavoro (Figura 3b). L'utente può passare da un'istruzione all'altra interagendo con il mouse. Sullo schermo vengono visualizzate le seguenti informazioni: la disposizione dei supporti (ognuno con il suo colore reale, in scala ridotta), il percorso del cavo con una linea spessa nera, i connettori elettrici specifici per ogni supporto terminale, e l'indicazione del cavo da assemblare in alto a sinistra. Il colore del supporto e le indicazioni sullo schermo permettono all'operatore di non confondersi su dove deve essere posizionato il cavo, anche se la "tavola digitale" non ha dimensioni reali. Inoltre, la tipologia del connettore è dettagliata per ogni supporto terminale (ad esempio, singolo connettore bianco, doppio connettore nero, etc.).

Il sistema di proiezione è costituito da un proiettore LED professionale di ASUS (BIMR), dotato di una luce di 900 lumen e un rapporto di proiezione di 0,9. Il proiettore è stato posizionato a 175 cm dal tavolo ed è stato correttamente orientato

per proiettare l'immagine sul tavolo inclinato. La posizione della proiezione viene determinata tenendo conto della necessità di non coprire la proiezione con l'ombra dell'utente. L'istruzione proiettata ha le dimensioni reali e contiene le stesse informazioni visualizzate sul display. La differenza è che si sovrappone al tavolo e ai supporti (Figura 3c). Per rendere più efficace la proiezione, il tavolo è stato ricoperto di fogli bianchi. L'operatore può passare all'istruzione successiva interagendo con il mouse.

Le istruzioni MR vengono visualizzate utilizzando un visore dedicato che supporta la proiezione trasparente di ologrammi, Microsoft HoloLens 2. L'applicazione MR è stata sviluppata utilizzando Dynamics 365 Guides for HoloLens, uno strumento di creazione utilizzato per creare un'applicazione MR immersiva con step istruzioni olografiche passo-passo posizionate dove si svolge il lavoro. Le istruzioni sono ancorate all'ambiente reale utilizzando un codice QR e per passare da un passaggio all'altro l'operatore può guardare e fissare il rispettivo simbolo con i suoi occhi (interazione basata sullo sguardo) o utilizzare gesti. È possibile aggiungere informazioni testuali, simboli come frecce e cerchi per indicare un'area o un punto specifico, immagini, video e oggetti animati 3D per fornire supporto visivo agli operatori. Per ogni istruzione di cavo sono incluse le seguenti informazioni: le informazioni testuali sul cavo da assemblare, il percorso del cavo con linee bianche e frecce per evidenziare i supporti terminali dove esce il cavo e un'immagine dei connettori elettrici in corrispondenza dei supporti terminali (Figura 3d) [5].

5. Test effettuati

Le stazioni di assemblaggio di cavi sono postazioni di lavoro utilizzate nella produzione di componenti elettrici ed elettronici, dove i lavoratori assemblano e collegano vari cavi e componenti.

Queste stazioni svolgono un ruolo significativo nel processo produttivo dell'azienda, poiché sono responsabili della produzione di prodotti funzionali e di alta qualità. Tuttavia, la natura ripetitiva delle attività di assemblaggio di cavi e l'utilizzo di strumenti e attrezzature ausiliari possono anche comportare rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori.

Uno dei più comuni rischi per la salute, associati alle stazioni di assemblaggio di cavi, sono i disturbi muscoloscheletrici (DMS). Quest'ultimi possono essere causati da movimenti ripetitivi, posture scomode e periodi prolungati di tempo trascorsi nella stessa posizione. Ciò può causare fastidio, dolore e disabilità a lungo termine, che possono avere un impatto negativo sulla salute e la produttività dei lavoratori [6].

È importante che i datori di lavoro considerino le implicazioni per la salute e la sicurezza delle stazioni di assemblaggio di cavi e che implementino i principi ergonomici nella loro progettazione per minimizzare il rischio di infortuni e migliorare il comfort e l'efficienza in generale.

L'ergonomia di una postazione di assemblaggio di cavi può essere valutata utilizzando diversi criteri, tra i quali, il più significativo è la postura.

Quest'ultima si riferisce alla posizione del corpo del lavoratore mentre esegue un compito. La postura ideale dovrebbe minimizzare lo stress su articolazioni, muscoli, ossa e può essere valutata osservando la posizione della testa, del collo, del torace e degli arti superiori mentre eseguono compiti alla postazione di assemblaggio di cavi [7].

Valutando la postazione tramite questo criterio, è possibile identificare aree di miglioramento e apportare modifiche per migliorare l'ergonomia del luogo di lavoro. Alcune di queste possono essere: l'altezza delle postazioni di lavoro, la fornitura di strumenti regolabili e la riorganizzazione della disposizione dell'area di lavoro per ridurre al minimo la necessità di torsione o piegamento di schiena o collo.

In letteratura esistono vari metodi per la valutazione dei rischi da sovraccarico biomeccanico degli arti superiori ognuno dei quali ha specifici ambiti di interesse e modalità di applicazione. Per ciascun metodo varia, inoltre, il valore in termini di previsione del rischio. Essi sono: metodo ACGIH, metodo Check-List OCRA, metodo Check-List OSHA, metodo OREGÉ, metodo Job Strain Index e metodo RULA (che è stato scelto per questo esperimento).

Questo caso di studio, come mostrato nelle pagine seguenti, si concentra in particolar modo su una analisi dettagliata dell'inclinazione ergonomicamente più adatta del tavolo di lavoro e della migliore modalità di fruizione delle istruzioni di lavoro.

5.1 Test sull'inclinazione

Per determinare l'inclinazione ergonomicamente più adatta del tavolo, è stata condotta una sessione di prova presso il laboratorio.

È stato costruito e forato un tavolo in legno (Figura 4), esattamente come quello in metallo presente attualmente alla ISE Cablaggi, e i supporti sono stati stampati utilizzando la tecnologia della manifattura additiva.

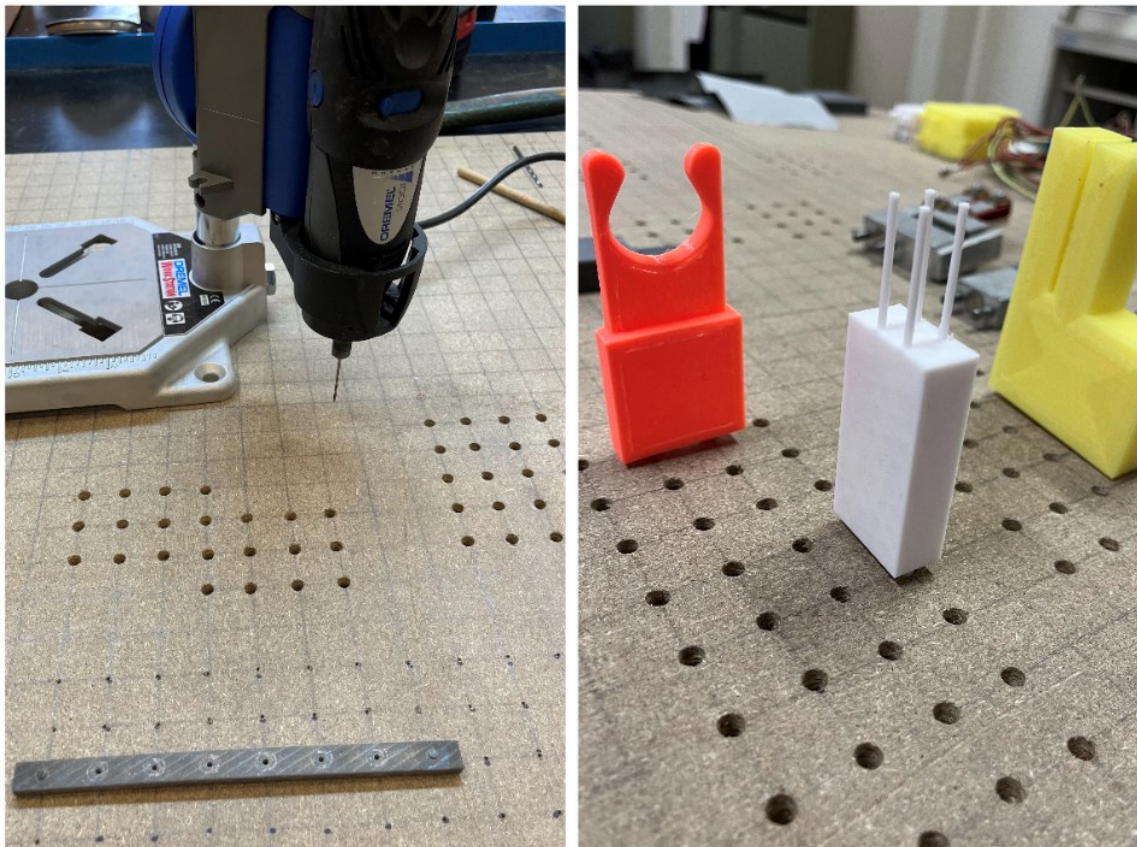


Figura 4: Realizzazione tavolo da lavoro

Sono state valutate quattro inclinazioni: 0°, 30°, 45° e 60°. L'obiettivo era quello di determinare quale angolazione garantisca un minore rischio ergonomico per

l'operatore. Il test ha coinvolto quattro utenti (2 di sesso maschile e 2 di sesso femminile) con altezze diverse: 164, 165, 178 e 193 cm.

Ai simulatori sono stati assegnati due compiti, che consistevano nel montaggio di due diversi cablaggi composti ciascuno da cinque cavi. I due cablaggi differivano l'uno dall'altro nel posizionamento dei supporti per far lavorare l'utente in zone diverse del tavolo.

Gli utenti sono stati monitorati dal sistema inerziale 11 Xsens MTw (Wireless Motion Tracker), come mostrato in Figura 5 e l'indice di rischio è stato calcolato secondo il metodo RULA (Rapid Upper Limb Assessment).



Figura 5: Test inclinazione tavola, destra 0°, sinistra 60°

5.1.1 Xsens MVN

Xsens MVN Awinda è un sistema di acquisizione del movimento inerziale, facile da usare, per l'acquisizione del movimento umano. MVN si basa su sensori inerziali indossabili e su soluzioni di comunicazione wireless combinati con algoritmi di fusione avanzati, utilizzando ipotesi di modelli biomeccanici. Questo sistema di misura cinematica inerziale permette di incorporare dati video sincronizzati di tutto il corpo e fornisce un output grafico istantaneo, inclusi gli angoli dei giunti.

Il sistema hardware di Awinda è composto da 17 sensori inerziali chiamati Wireless Motion Tracker (MTw) che contengono al loro interno una batteria, accelerometri lineari 3D, giroscopi a velocità 3D, magnetometri 3D e un barometro. I tracker sono posizionati in punti strategici sul corpo (fissati su delle fasce messe sul corpo), per misurare il movimento di ciascun segmento del corpo (Figura 6).



Figura 6: Tracker MVN

5.1.2 Analisi RULA

Per la valutazione del carico biomeccanico e posturale è stato scelto il metodo RULA (Rapid Upper Limb Assessment) che analizza l'esposizione dei singoli lavoratori ai rischi di insorgenza di disturbi muscoloscheletrici (MSD) agli arti superiori.

Esso considera le esigenze di carico biomeccanico e posturale delle mansioni di lavoro sul collo, sul tronco e sugli arti superiori.

Prima di tutto va condotta un'osservazione generale dell'attività lavorativa e un'eventuale intervista all'operatore al fine di individuare le posture più critiche che il lavoratore assume durante un ciclo di lavoro.

La selezione delle posture tiene conto di:

- posture e mansioni lavorative più scomode;
- postura sostenuta per il più lungo periodo di tempo;
- posture in cui si verificano i carichi di forza più elevati.

Possono essere valutati il lato sinistro e destro del corpo o entrambi, in base alle esigenze.

Successivamente si procede con l'osservazione dell'operatore durante l'esecuzione dei task e la compilazione della scheda (Figura 7), che avviene automaticamente grazie alla predisposizione di un template Excel dedicato all'interno dello strumento di acquisizione.

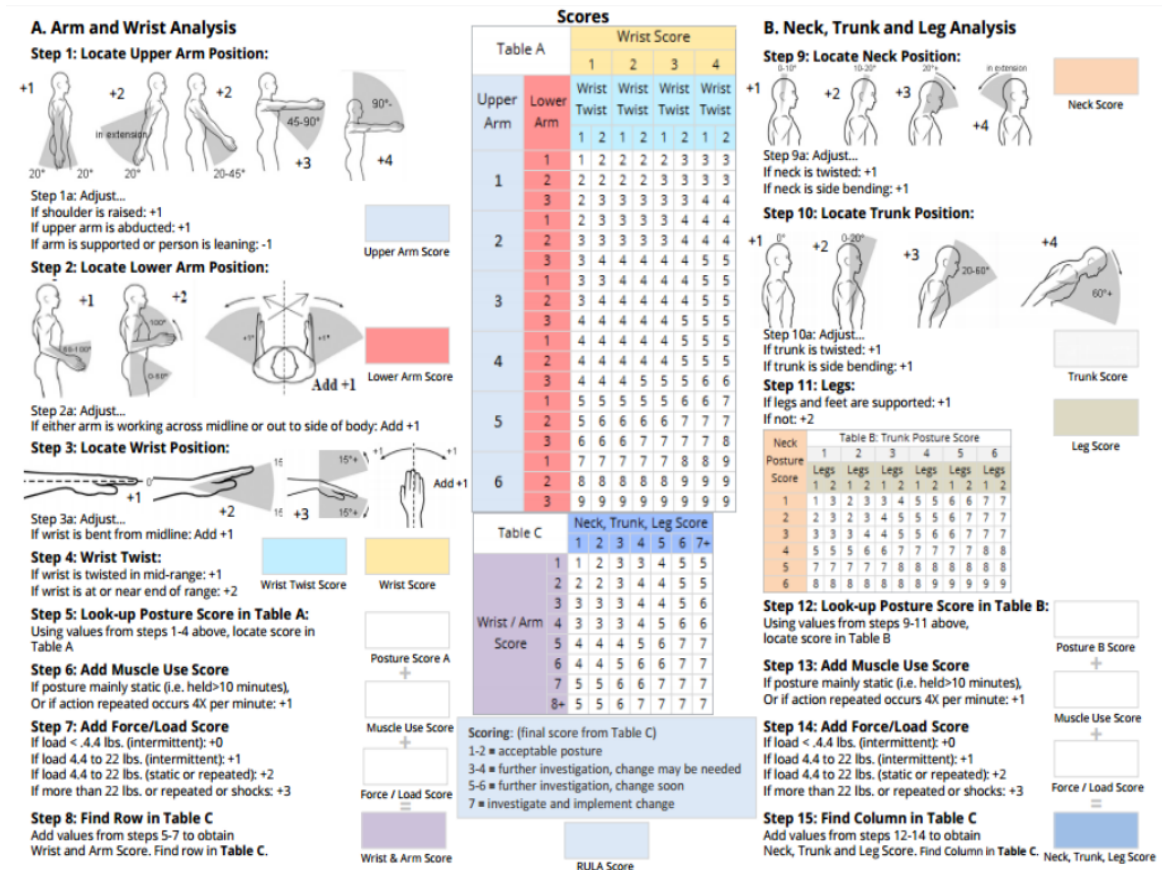


Figura 7: Tabella RULA

L'analisi è suddivisa in due parti: nella prima vengono presi in considerazione gli arti superiori e viene assegnato un punteggio a ciascuna delle deviazioni articolari citate in un'apposita tabella, mentre nella seconda vengono esaminate le deviazioni articolari al collo e al tronco mediante un procedimento analogo.

Il punteggio finale, variabile da 1 a 7, è la combinazione dei due punteggi ottenuti in precedenza, e consente di stabilire la necessità di migiorie all'ergonomia del compito lavorativo preso in esame (Figura 8).

| Score | Level of MSD Risk |
|-------|---|
| 1-2 | negligible risk, no action required |
| 3-4 | low risk, change may be needed |
| 5-6 | medium risk, further investigation, change soon |
| 6+ | very high risk, implement change now |

Figura 8: Livelli di rischio

Il metodo RULA può essere basato sull'osservazione diretta da parte di un esperto, come descritto in precedenza, o su dati oggettivi misurati da dispositivi IoT.

Nel secondo caso, il metodo è stato automatizzato attraverso specifici algoritmi che permettono di elaborare i dati raccolti dai sensori, calcolare i punteggi dei vari step e ottenere il punteggio finale come combinazione di essi.

Come dati di input si prendono i file di output del dispositivo Xsens MVN, sistema per la cattura del movimento, che registra tutti i movimenti dell'uomo e permette di esportare angoli articolari.

In particolare, per la compilazione del RULA si utilizzano principalmente gli angoli articolari degli arti superiori, del tronco e del collo, così da poter calcolare il punteggio RULA per ciascun frame registrato ed ottenere una valutazione dell'intero ciclo di lavoro.

Andando più nel dettaglio, si possono anche individuare i segmenti del corpo che determinano un punteggio alto (5-6-7), così da permettere la definizione di opportune e mirate azioni correttive.

5.2 Test sulle tipologie di istruzioni

Le quattro modalità di fruizione delle istruzioni di lavoro sono state testate utilizzando l'inclinazione del tavolo di 30 gradi.

Il test ha coinvolto otto utenti (4 di sesso maschile e 4 di sesso femminile) in buona salute fisica, maggiorenni tra 24 e 36 anni (media = 27,8 anni) e con un'altezza tra i 155 cm e i 193 cm.

Inoltre, sono stati considerati i seguenti criteri di inclusione: nessuna esperienza nelle attività di cablaggio e una certa familiarità con l'uso dell'HoloLens.

Sono stati simulati due cablaggi di stessa complessità e durata, ciascuno costituito da due fasi: task 1.1, task 1.2, task 2.1 e task 2.2 (nelle Figure 9-10 è mostrata la disposizione dei blocchi metallici nel task 1 e nelle Figure 11-12 quella nel task 2). Nei corrispondenti task 1.2 e 2.2 la disposizione dei blocchi è semplicemente ruotata di 180°.

La differenza principale riguarda la disposizione dei supporti magnetici sul tavolo, che determina l'area del tavolo in cui lavora l'operatore e il percorso dei cavi. Ogni utente ha eseguito tutte e quattro le attività, utilizzando un sistema di istruzioni diverso per ciascuna attività. L'ordine e l'associazione tra attività e sistemi sono stati definiti per coprire tutte le combinazioni e ridurre il pregiudizio (bias) del test.

Prima di iniziare il test, l'utente è stato dotato del sistema di registrazione del movimento e addestrato sull'attività di cablaggio in modo da non pregiudicare l'esecuzione del primo compito.

6. Risultati e discussione

Tutti i test eseguiti con le diverse modalità di fruizione delle istruzioni sono stati analizzati tramite tre approcci differenti:

1. il primo è stato una valutazione ergonomica, grazie alla tecnologia Xsens è stato assegnato un punteggio RULA agli angoli anatomici più critici;
2. il secondo una valutazione soggettiva, tramite dei questionari compilati dagli operatori sono state raccolte le sensazioni che hanno provato durante lo svolgimento (User Experience);
3. il terzo, una valutazione delle performance, per ogni test eseguito sono stati registrati i movimenti degli operatori, i tempi di esecuzione e gli errori compiuti.

6.1 Valutazione ergonomica

I test sull'ergonomia sono stati eseguiti per valutare il comfort, la sicurezza e l'efficienza dell'ambiente di lavoro, dei prodotti o dei processi produttivi.

Ad esempio, i test sull'inclinazione della tavola di lavoro sono stati utilizzati per determinare l'angolo ottimale della tavola di lavoro in modo da ridurre lo stress sul collo, sulle spalle e sulle braccia dei lavoratori.

I test sulle modalità di fruizione delle istruzioni di lavoro sono stati utilizzati per valutare la facilità di comprensione delle istruzioni e il tempo necessario per completare una specifica attività, in modo da migliorare l'efficienza e ridurre gli errori.

6.1.1 Risultati del test sull'inclinazione

Per valutare meglio i risultati, l'analisi è stata focalizzata sui movimenti dei segmenti corporei che potrebbero essere influenzati consultando le istruzioni di lavoro, come la testa, il collo, le spalle, la schiena, le braccia e i polsi.

L'attuale posizione del tavolo di lavoro a 0° espone l'operatore a rischio alto e medio, rispettivamente il 2% e il 14% delle volte (dati sperimentali riportati in Figura 13).

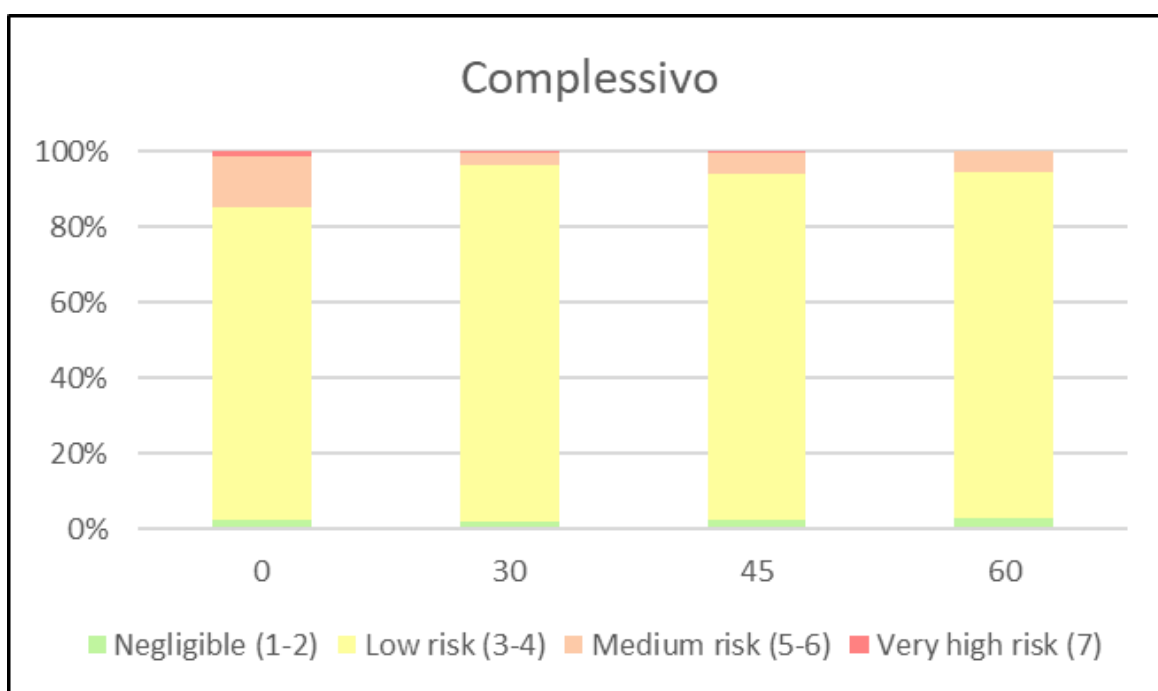


Figura 13: Punteggio rischio complessivo

Analizzando in profondità i diversi segmenti corporei, la posizione del lettino a 0° costringe gli utilizzatori ad estendere il collo durante l'operazione, soprattutto quando gli utilizzatori devono lavorare sulla parte superiore del lettino; mentre con un'inclinazione di 60° gli utilizzatori tendono a flettere il collo (Figura 14).

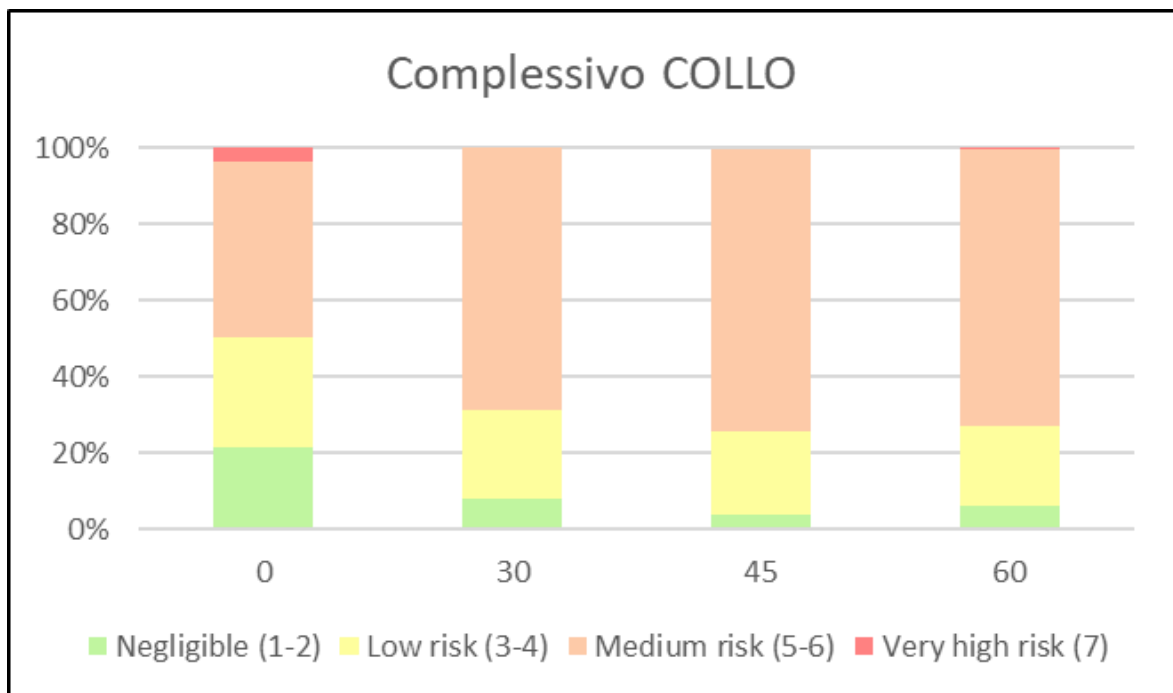


Figura 14: Punteggio complessivo del collo

Per quanto riguarda la schiena, maggiore è l'inclinazione e minore è la flessione dell'utilizzatore (Figura 15).

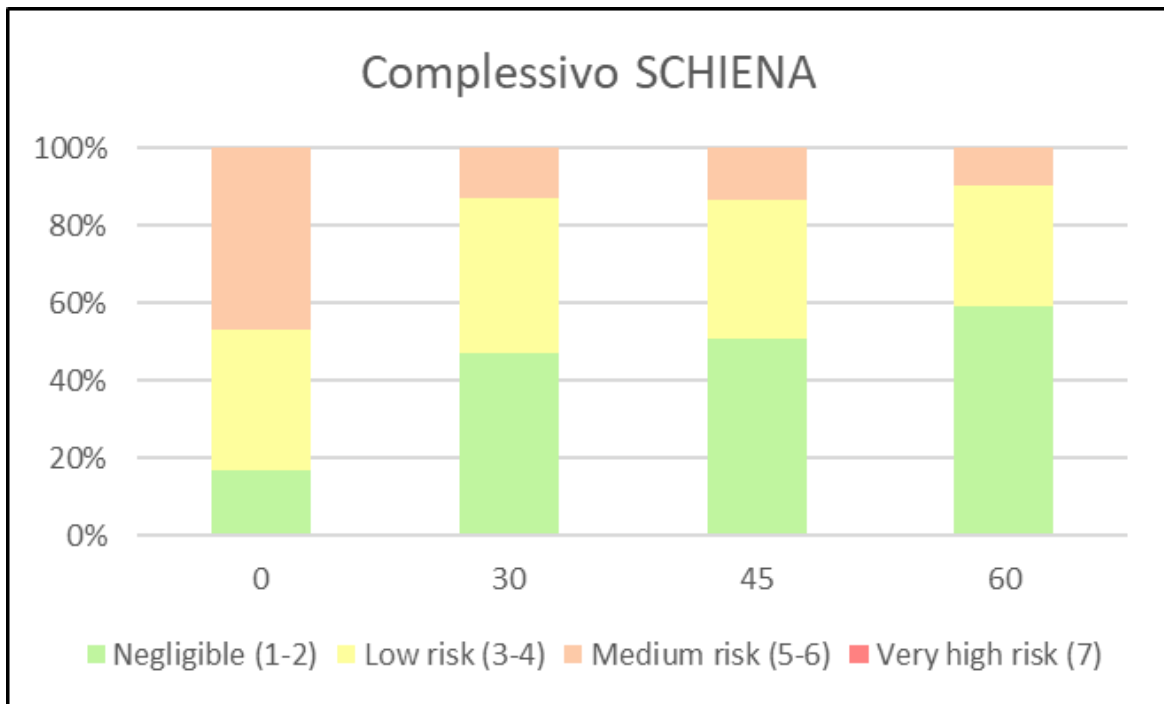


Figura 15: Punteggio complessivo della schiena

Complessivamente 30° è risultato il migliore in quanto espone l'operatore a rischio medio per meno del 5% del tempo considerando tutti i suoi segmenti anatomici.

Un'analisi altrettanto importante è quella riguardante la postura che assume il corpo quando l'operatore guarda le istruzioni. Tramite la tecnologia Xsens, che ci offre un modello del busto dell'operatore mentre è in movimento, possiamo notare che la postura assunta dal corpo, in questo caso, di un operatore alto 165 cm, sia più naturale e abbia angoli anatomici meno critici nei test con le istruzioni fornite in modalità display e HoloLens.

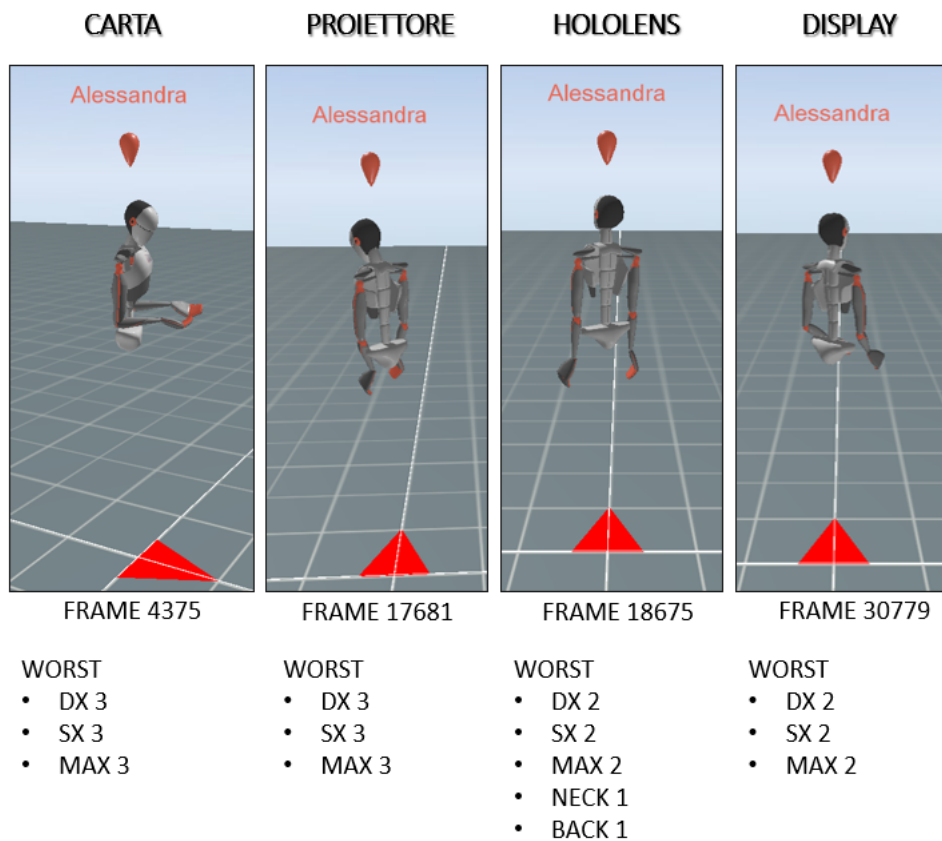


Figura 16: Postura OP. 165 cm

Dopo aver notato che, anche con gli altri operatori modello con una statura simile a quella di Alessandra, l'analisi rimaneva invariata, abbiamo posto l'attenzione sui test di un operatore con statura molto diversa (>190cm).

Si può notare che il display sia la soluzione più critica per collo e schiena, seguito dalla carta, poi dal proiettore e per ultimo dall'HoloLens, il quale risulta essere la soluzione ergonomicamente più sicura (per una statura come la sua).

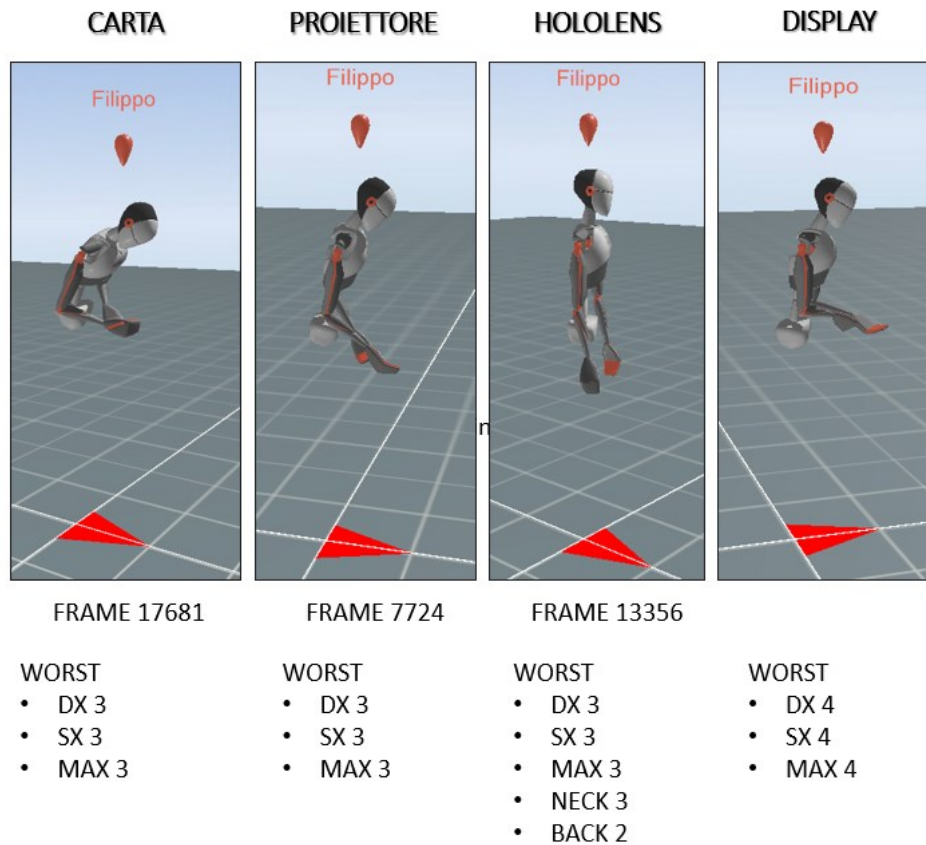


Figura 17: Postura OP. 190 cm

6.1.2 Risultati del test sulle tipologie di istruzioni

In particolare, si mostrano molto interessanti, i test in riferimento al lato peggiore (si intende tra parte destra o sinistra del corpo), al collo e alla schiena, suddivisi in task 1 e task 2: grazie alla tecnologia Xsens abbiamo potuto monitorare e tracciare i movimenti di alcuni operatori modello per poter eseguire un'analisi RULA approfondita.

Di seguito si possono notare alcuni risultati salienti:

| | | T1 | | | | T2 | | | |
|------------------------|--------------------|-----------|-----|-------|---------|-----------|-----|-------|---------|
| | | Projector | MR | Paper | Display | Projector | MR | Paper | Display |
| WORST RULA SCORE | Negligible (1-2) | 2% | 6% | 2% | 5% | 5% | 4% | 2% | 4% |
| | Low risk (3-4) | 91% | 88% | 89% | 89% | 80% | 82% | 93% | 91% |
| | Medium risk (5-6) | 7% | 6% | 9% | 7% | 14% | 13% | 5% | 5% |
| | Very high risk (7) | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% | 1% | 0% |

| | | T1 | | | | T2 | | | |
|------|---|-----------|-----|-------|---------|-----------|-----|-------|---------|
| | | Projector | MR | Paper | Display | Projector | MR | Paper | Display |
| NECK | 1 | 2% | 8% | 3% | 10% | 20% | 15% | 6% | 15% |
| | 2 | 11% | 11% | 7% | 18% | 22% | 26% | 17% | 37% |
| | 3 | 80% | 70% | 81% | 66% | 47% | 46% | 71% | 45% |
| | 4 | 7% | 10% | 8% | 6% | 10% | 11% | 5% | 2% |
| | 5 | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% |
| | 6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| BACK | 1 | 47% | 47% | 3% | 13% | 21% | 28% | 50% | 37% |
| | 2 | 37% | 40% | 52% | 56% | 53% | 50% | 34% | 41% |
| | 3 | 15% | 12% | 42% | 29% | 23% | 20% | 14% | 20% |
| | 4 | 2% | 1% | 3% | 2% | 3% | 2% | 1% | 1% |
| | 5 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Tabella 1: Risultati RULA

Analizzando i dati soprastanti scrupolosamente si è arrivati a concludere che, per quanto concerne alla parte peggiore, la percentuale più alta (>80%) è sempre rappresentata dal rischio basso e si può, dunque, affermare che, nonostante il task 2 è di poco più critico rispetto al task 1, non esiste una differenza particolarmente evidente nella criticità d'uso (lo si vede chiaramente nella Figura 18).

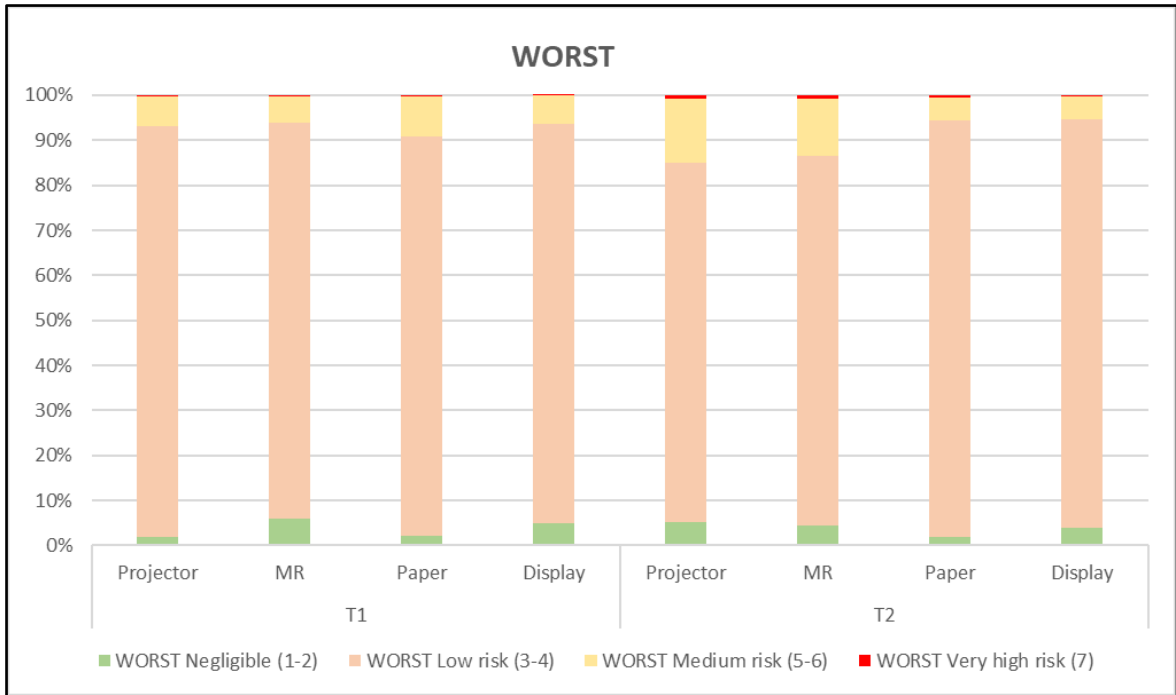


Figura 18: Punteggio peggiore suddiviso in task 1 e 2

Graficando il punteggio complessivo nel tempo per ogni operatore modello e per tutte le prove eseguite con le diverse istruzioni (8x4=32 grafici, in Figura 13 si riporta un esempio) è emerso che i picchi non sono dovuti ad attività relative alla lettura delle istruzioni. Bensì, sono relative al posizionamento dei cavi nei punti più lontani dall'operatore o alla stesura del filo negli appositi blocchi.

Di seguito sono mostrati alcuni esempi di frame che mostrano la veridicità delle precedenti affermazioni.

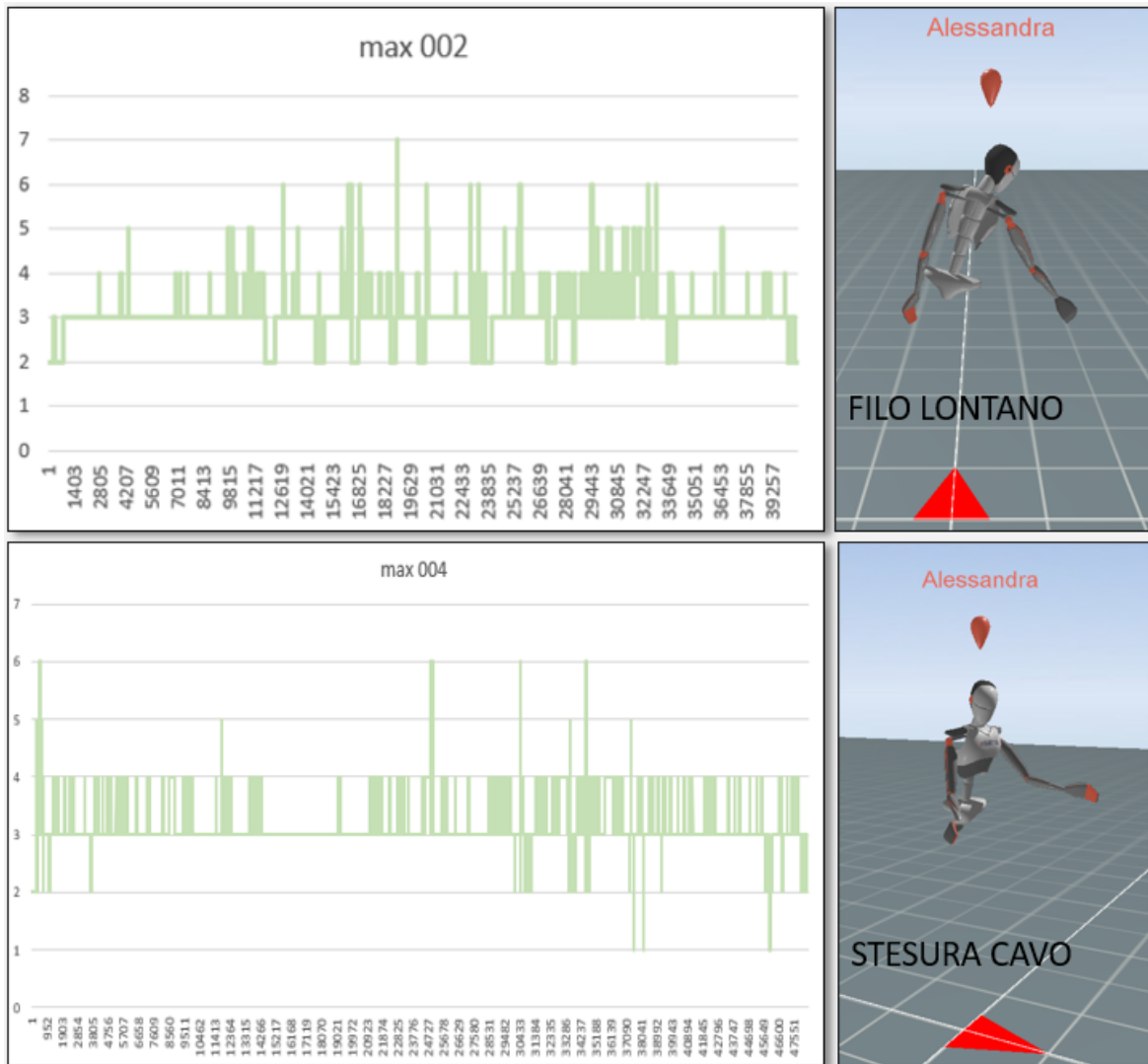


Figura 19: Grafici dell'andamento del punteggio RULA nel tempo

6.2 Valutazione soggettiva

L'esperienza utente è una sensazione soggettiva in quanto ogni individuo interagisce e sperimenta il mondo attraverso il proprio punto di vista e sulla base di specifici obiettivi.

A definirla nel suo complesso entrano in gioco una moltitudine di fattori esterni come gli specifici stati d'animo vissuti o lo status socioeconomico.

La soddisfazione si riferisce quindi a quegli aspetti emotivi che creano nell'utente un'esperienza d'uso positiva del prodotto o servizio con cui sta interagendo. Un'importante considerazione da fare è che l'esperienza d'uso di un prodotto o servizio è influenzata non solo dalla percezione che si ha nel momento in cui si interagisce, ma anche da aspetti dinamici come le esperienze pregresse, le aspettative dell'utente e il contesto in cui si opera. Tutti questi fattori sono importanti nella progettazione di un servizio che punta ad offrire una buona esperienza utente.

È possibile quindi individuare una varietà di soluzioni per misurare l'usabilità e la user experience.

Ci sono molte ragioni per misurare l'esperienza dell'utente, la principale, e più importante, è che si possono individuare le aree problematiche e migliorarle.

Diversi parametri e metriche sono utilizzati per la misurazione della UX. In questo articolo ci focalizzeremo su quelle dedicate alla soddisfazione.

La valutazione post-task (subito dopo una esecuzione), infatti, aiuta a individuare parti dell'interfaccia che sono risultate particolarmente problematiche, mentre la valutazione post-study, più profonda, permette una valutazione complessiva dopo che i partecipanti hanno avuto occasione di interagire con tutto il prodotto. Il metodo di misurazione che sottende entrambe le metriche indicate si basa su brevi questionari. Ad esempio, per ciò che concerne il “task level satisfaction”, gli utenti dovrebbero

compilarlo subito dopo aver concluso uno specifico compito (anche se l'obiettivo non è stato raggiunto). Questi sondaggi puntano a misurare e quantificare quanto è stato complesso portare a termine un determinato task durante un test utente [8].

Tra i questionari più popolari si annoverano:

- ASQ: After Scenario Questionnaire;
- UEQ: User Experience Questionnaire.

L'ASQ (After Scenario Questionnaire) è un questionario composto da alcune affermazioni, ognuna delle quali è accompagnata da una scala Likert a sette punti. Le affermazioni nel nostro caso sono:

“Valuta il sistema, sulla base delle seguenti affermazioni, assegnando un punteggio da 1 (fortemente in disaccordo) a 7 (fortemente d'accordo)”:

| TIPOLOGIA DI ISTRUZIONI | FACILITA' D'USO | TEMPO IMPIEGATO PERCEPITO | INFORMAZIONI DI SUPPORTO |
|--------------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| CARTA | 1-7 | 1-7 | 1-7 |
| PROIETTORE | 1-7 | 1-7 | 1-7 |
| HOLOLENS | 1-7 | 1-7 | 1-7 |
| DISPLAY | 1-7 | 1-7 | 1-7 |

Tabella 2: Scala Likert

I risultati degli otto utenti mostrano univocamente che i punteggi più alti sono stati sempre assegnati al display, seguito dall'HoloLens, poi dal proiettore e infine dalla carta (Figura 20).

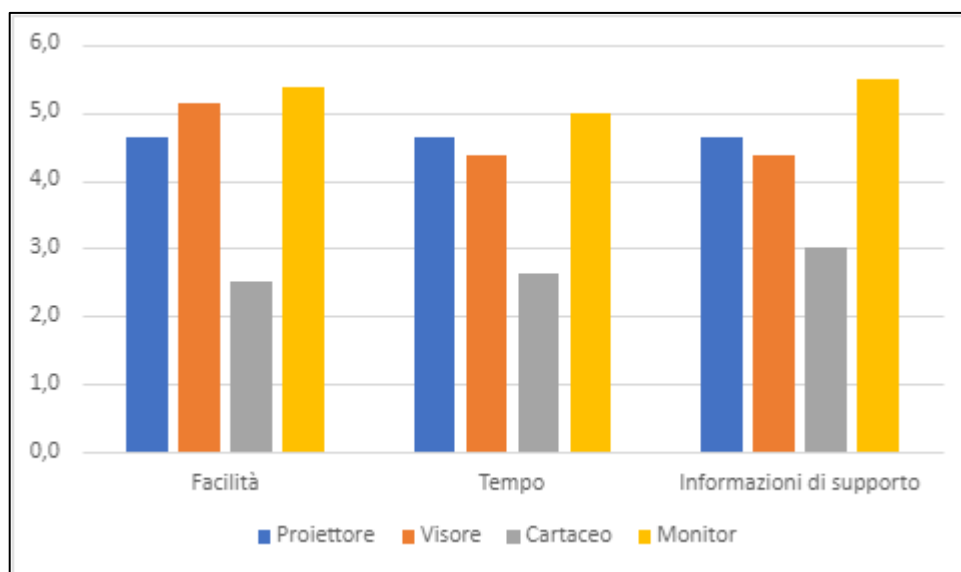


Figura 20: Risultati ASQ

Mentre lo User Experience Questionnaire (UEQ) consente una rapida valutazione della user experience di prodotti interattivi. Il formato del questionario aiuta gli utenti a esprimere immediatamente sentimenti, impressioni e atteggiamenti che emergono durante un'interazione. Nel nostro caso specifico si trattava di un Google form da compilare, che si presentava come una lista di aggettivi a cui dare un punteggio da 1 a 7 per ognuno dei quattro sistemi di fruizione delle istruzioni.

Gli aggettivi erano i seguenti: piacevole, comprensibile, facile da apprendere, di grande valore, interessante, veloce, originale, di supporto, buono, facile, gradevole, soddisfa le aspettative, efficiente, chiaro, pragmatico, ordinato, innovativo.

Anche in questo caso, i risultati dimostrano che i punteggi più alti sono stati sempre assegnati al display o all'HoloLens (Figura 21).

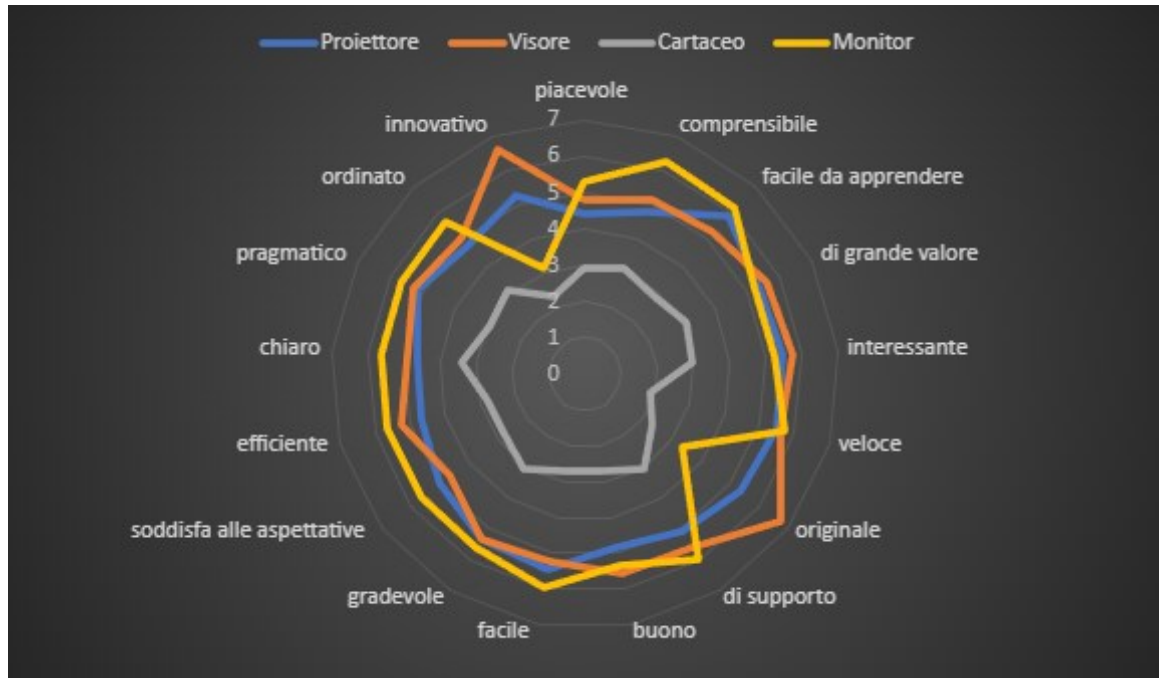


Figura 21: Risultati UEQ

Per completezza mostriamo anche i punteggi medi complessivi di entrambi i questionari:

| KPI | CARTA | DISPLAY | PROIETTORE | HOLENS |
|-----|---------|---------|------------|---------|
| ASQ | 2,7±1,3 | 5,3±1,1 | 4,6±1,4 | 4,6±1,5 |
| UEQ | 2,8±1 | 5,4±0,6 | 5,1±1,1 | 5,4±1,1 |

Tabella 3: ASQ & UEQ

L'ultimo indice misurato, ma non per importanza, è stato il NASA Task Load Index, ovvero, una procedura di valutazione multidimensionale che fornisce un punteggio complessivo del carico di lavoro basato su una media ponderata delle valutazioni di sei sotto scale [9]:

- Richiesta mentale: attività mentale e percettiva richiesta (ad esempio, pensare, decidere, calcolare, ricordare, cercare, ecc.);
- Richiesta fisica: attività fisica richiesta (spingere, tirare, girare, controllare, attivare, ecc.);
- Richiesta temporale: pressione di tempo sentita a causa della velocità o del ritmo con cui le attività si sono verificate;
- Prestazione: quanto pensi di aver avuto successo nel raggiungimento degli obiettivi del compito;
- Sforzo: quanto duramente hai dovuto lavorare (mentalmente e fisicamente) per realizzare la prestazione;
- Frustrazione: quanto insicuro, scoraggiato, irritato, stressato e infastidito o sicuro, gratificato, contento, rilassato e compiaciuto ti sei sentito durante lo svolgimento del compito.

Nel nostro studio, in particolare, agli otto utenti è stato chiesto, dapprima, se potessero apporre una crocetta sul parametro che era stato loro più richiesto per il completamento del task (tra una coppia di sotto scale sopraelencate); poi di assegnare un punteggio da 0 a 100, ad ognuno dei parametri richiesti.

I risultati del NASA TLX sono stati i seguenti:

| NASA TLX | User 1 | User 2 | User 3 | User 4 | User 5 | User 6 | User 7 | User 8 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Projector | 54 | 27 | 43 | 22 | 65 | 8 | 31 | 70 |
| MR | 41 | 29 | 75 | 20 | 63 | 38 | 40 | 50 |
| Paper | 40 | 49 | 100 | 61 | 71 | 34 | 49 | 68 |
| Display | 33 | 26 | 52 | 33 | 44 | 18 | 25 | 46 |

Tabella 4: NASA TLX

6.3 Valutazione delle performance

Il tempo di completamento dell'attività e il numero di errori sono gli indicatori di prestazione che abbiamo monitorato, in quanto sono i parametri oggettivi più significativi per le attività di assemblaggio manuale.

Di seguito sono riportati i risultati del test sulle performance compilato dagli operatori:

| | CARTA | DISPLAY | PROIETTORE | VISORE |
|---------------|--------------|----------------|-------------------|---------------|
| TEMPO | 19,1±6,6 | 12,6±2,7 | 10,9±3,8 | 15,2±9,8 |
| ERRORI | 10,3±4,4 | 1,6±1,9 | 2,9±1,8 | 2±1,3 |

Tabella 5: Tempo ed errori

Come si può notare dalla tabella, le istruzioni cartacee, rispetto alle altre, hanno ottenuto sommariamente un punteggio più elevato in termini di tempo di

completamento del task e numero degli errori commessi. Il display ha ottenuto ottimi risultati in entrambe i parametri, spiccando su tutti per il minor numero di errori commessi, mentre il proiettore si è diversificato tra tutti per minor tempo di completamento ed un numero di errori comunque molto contenuto. Infine, il visore HoloLens, è rimasto nella media per quanto riguarda il tempo di completamento ed ha ottenuto un punteggio ottimo negli errori; considerando che è una tecnologia alla quale ancora non siamo abituati ad interagire nella vita quotidiana e che il campo visivo è ridotto rispetto a quello dell'occhio umano, ha registrato degli ottimi punteggi.

7. Conclusione

Nel complesso, le istruzioni digitalizzate funzionano meglio di quelle cartacee in ogni aspetto.

Le istruzioni cartacee sono poco dettagliate e vengono fornite tutte insieme, generando maggiore confusione nell'utente, che si riflette sia nel numero di errori che nel tempo.

Le istruzioni visualizzate sul display sono state giudicate le più comprensibili, come dimostrato dal minor numero di errori. Gli utenti si sono sentiti più soddisfatti delle loro prestazioni sia in termini di tempo di completamento che di facilità di esecuzione delle attività. L'unica inefficienza è stata trovata nel tempo impiegato per identificare il supporto magnetico reale corrispondente alle istruzioni digitali visualizzate, perché sul display le distanze vengono rappresentate in scala più piccola.

Il sistema di proiezione ha garantito il tempo di completamento più breve a fronte di un piccolo aumento del numero di errori. Gli utenti si sono lamentati della difficoltà di visualizzare il percorso mentre i cavi venivano posizionati a causa delle loro ombre.

In effetti, gli utenti che hanno eseguito il task 2 con questo sistema hanno percepito una maggiore difficoltà dovuta alla presenza dei cavi e delle loro ombre assemblati in precedenza nel task 1.

Nonostante questo, il sistema di proiezione ha ricevuto punteggi in linea con gli altri in termini di gradimento.

L'HoloLens ha avuto successo anche se non è stato ritenuto adatto per l'impiego per l'intero turno di lavoro. L'utilizzo di immagini al posto delle istruzioni testuali è stato particolarmente apprezzato dagli utenti e tutti gli utenti hanno scelto di interagire con gli occhi piuttosto che con i gesti, suscitando pareri positivi in merito alla facilità d'uso. Tuttavia, gli utenti hanno percepito di dedicare più tempo all'esecuzione dell'attività con l'HoloLens, come dimostrato anche dal tempo di completamento.

Dal punto di vista ergonomico, l'indice RULA medio è quasi lo stesso tra i quattro sistemi. Analizzando la distribuzione dei livelli di rischio nel tempo (alto, medio, basso e trascurabile), il display e l'HoloLens sembrano essere di poco più ergonomici.

Questa bassa variabilità dei risultati può essere poiché la percentuale di tempo dedicata alla consultazione delle istruzioni è molto inferiore a quella dedicata al cablaggio.

Concludendo, per ciascun sistema digitale, sono emerse alcune limitazioni tecniche che verranno rafforzate nell'ambiente industriale reale. Nella postazione verrà installato un monitor più grande per rendere più chiare le istruzioni testuali e verrà utilizzato un proiettore a distanza corta per salvare spazio nella postazione di lavoro. Inoltre, di notevole interesse, potrebbe essere cambiare il materiale del tavolo da lavoro con uno trasparente per limitare al massimo le ombre del corpo sulle istruzioni.

Riferimenti bibliografici e sitografia

[1] <https://www.assolombarda.it/servizi/industria-innovazione-e-qualita/documenti/dispensa-su-iso-9001-2015-e-impresa-4.0>

[2] <https://www.eng.it/enabling-technologies/ar-mr-vr>

[3] <https://www.isecablaggi.com/>

[4] A. Papetti, M. Ciccarelli, M. Palpacelli, M. Germani. How to provide work instructions to reduce the workers' physical and mental workload. CIRP CMS '23, South Africa

[5] <https://www.studioessepi.it/magazine/sicurezza-sul-lavoro/carico-di-lavoro-mentale-iso-10075#:~:text=La%20norma%20di%20riferimento%2C%20in,tensione%20e%20de llo%20stress%20mentale.>

[6] <https://osha.europa.eu/it/themes/musculoskeletal-disorders>

[7] <https://www.puntosicuro.it/rischio-ergonomico-C-116/datore-di-lavoro-indicazioni-per-il-rispetto-dei-principi-ergonomici-AR-14555/>

[8] <https://www.boraso.com/blog/8-modi-per-misurare-la-customer-satisfaction-e-migliorare-la-ux/>

[9] NASA TASK LOAD INDEX, V1.0, Paper and Pencil Package, Human Performance Research Group NASA Ames Research Center