

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI DELLO STRESS NEI SISTEMI PRODUTTIVI PUSH E PULL



Relatore

Francesca Montagna

Candidati

Andrea Borgone
Carmine La Porta

Novembre 2025

INDICE

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1 – BACKGROUND	4
1.1 L’IMPATTO DELLE RECENTI RIVOLUZIONI INDUSTRIALI SUL SETTORE MANIFATTURIERO	4
1.1.1 INDUSTRIA 4.0.....	4
1.1.2 INDUSTRIA 5.0.....	7
1.2 WORK – RELATED STRESS	8
1.2.1 LO STRESS DEI LAVORATORI NEL SETTORE MANIFATTURIERO: CAUSE E CONSEGUENZE	8
1.2.2 EUSTRESS, DISTRESS E IPOSTRESS.....	9
1.3 CARATTERISTICHE E METODI DI DUE PRINCIPALI SISTEMI PRODUTTIVI E COME QUESTE INFLUENZANO IL BENESSERE DEL LAVORATORE	12
1.3.1 SISTEMA PUSH.....	13
1.3.2 SISTEMA PULL	13
CAPITOLO 2- METODO.....	14
2.1 OBIETTIVI E RESEARCH QUESTION	14
2.2 DESCRIZIONE DEL PROTOCOLLO SPERIMENTALE	15
2.2.1 TASK PULL	16
2.2.2 TASK PUSH.....	17
2.3 STRUMENTI DI MISURA.....	18
2.3.1 STRUMENTI SOGGETTIVI: QUESTIONARI	20
2.3.2 STRUMENTI OGGETTIVI: SEGNALI FISIOLOGICI	22
2.4 RECLUTAMENTO DEI SOGGETTI	27
2.4.1 QUESTIONARIO SOCIO-DEMOGRAFICO.....	28
2.5 ANALISI DEI DATI	28
2.5.1 ELABORAZIONE DEI SEGNALI.....	28
2.5.2 TEST STATISTICI	31
CAPITOLO 3. RISULTATI	32
3.1 MISURAZIONI OGGETTIVE	32
3.1.1 ATTIVITA’ CARDIACA	33
3.1.2 ATTIVITA’ RESPIRATORIA	38
3.1.3 ATTIVITA’ ELETTRODERMICA	41
3.1.4 ATTIVITA’ PUPILLOMETRICA	43

3.2 MISURAZIONI SOGGETTIVE	44
3.2.1 PSS-10.....	44
3.2.2 RAW NASA-TLX	45
3.2.3 VEDAS	47
3.2.4 ANALISI DELLA PERFORMANCE	48
CAPITOLO 4. DISCUSSIONI.....	49
4.1 CONFRONTO DEI LIVELLI DI STRESS TRA PUSH E PULL	49
4.2 ANALISI DI EUSTRESS, DISTRESS E COESISTENZA EUSTRESS-DISTRESS ...	54
4.3 ANALISI DEI FATTORE CHE HANNO INFLUENZATO LO STRESS E I RISULTATI	57
CONCLUSIONI	60
LIMITI DELLO STUDIO E DIREZIONI DI RICERCA FUTURI	61
BIBLIOGRAFIA	62
APPENDICE A	66
Questionario PSS-10.....	66
APPENDICE B	67
Questionario RAW NASA-TLX	67
APPENDICE C	68
Script Matlab per l'elaborazione del segnale ECG	68
APPENDICE D.....	74
Script Matlab per l'elaborazione del segnale EDA	74
APPENDICE E	78
Script Matlab per l'elaborazione del segnale respiratorio	78

ABSTRACT

Secondo lo European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), nel 2022 lo stress lavoro-correlato (WRS) si è posizionato al secondo posto nella classifica dei problemi di salute collegati al lavoro più frequentemente percepiti dai lavoratori dell'Unione Europea. Lo stress lavoro-correlato potrebbe portare all'insorgenza di diverse condizioni psicofisiche come ansia, depressione, malattie cardiovascolari per i lavoratori, con conseguente aumento dei giorni di malattia, l'abbandono più frequente del lavoro da parte degli stessi e inoltre ad una diminuzione della produttività (Paganin et al., 2021).

Il presente studio ha l'obiettivo di confrontare i livelli di stress tra differenti condizioni produttive e di approfondire gli stati di stress percepito con valenza positiva (definito come eustress), negativa (definito come distress), di noia e di coesistenza tra stress positivo e negativo.

Lo studio è stato condotto simulando un contesto di produzione reale in cui i partecipanti hanno svolto dei task di assemblaggio (basati sull'utilizzo di Lego Technic), che si ispirano per tempi e per modalità d'esecuzione a due differenti modalità operative tipiche di una linea di produzione. La prima è la logica Push, caratterizzata da un lotto predefinito di prodotti finiti da assemblare, stabilito ex-ante sulla base della previsione della domanda di mercato, entro un certo limite temporale imposto. L'altra condizione sperimentale è ispirata alla logica Pull, che vede la produzione basata sulla reale domanda di mercato, con lo scopo di migliorare l'efficienza dei processi produttivi riducendo gli sprechi di tempo.

Un campione di 39 soggetti ha preso parte alla campagna sperimentale. L'esperimento ha previsto la registrazione dei segnali fisiologici dei partecipanti (attività cardiaca, attività elettrodermica, respirazione e attività oculare) durante lo svolgimento dei task, oltre alla somministrazione di questionari (RAW NASA – TLX, VEDAS) per la valutazione soggettiva dell'intensità e della valenza dello stress percepito nei due task. I segnali fisiologici sono stati elaborati su MATLAB, con l'obiettivo di estrarre i principali indicatori di stress effettivamente provato. I questionari invece sono stati analizzati per valutare lo stress (positivo o negativo) percepito a livello psicologico e, tramite un confronto con gli indicatori fisiologici, verificare come questo cambia in ciascuna condizione sperimentale. Dall'analisi dei dati è emersa una differenza statisticamente significativa (Test di Wilcoxon, $p \leq 0,05$) tra le due condizioni sperimentali, con la condizione Pull rivelarsi più stressante

rispetto alla Push. Infine, non sono emerse differenze statisticamente significative tra gli stati di eustress, distress e la loro possibile coesistenza.

INTRODUZIONE

Nello scorso decennio il settore manifatturiero è stato influenzato dall'emergere di due nuovi paradigmi industriali, l'Industria 4.0 e 5.0. L'industria 4.0 ha introdotto una rivoluzione basata sull'integrazione di tecnologie digitali con l'obiettivo di automatizzare, ottimizzare e rendere più efficienti i processi produttivi. L'industria 5.0 rappresenta un'evoluzione del paradigma precedente: integra i principi della 4.0 ma sposta il focus dall'efficienza al ruolo centrale dell'uomo.

Proprio in questo scenario dinamico, l'attenzione si concentra sullo stress lavoro-correlato, uno dei principali problemi associati ai lavoratori all'interno del contesto lavorativo. Quest'ultimo si classifica come uno dei principali fattori di rischio psicosociale (che derivano da una cattiva progettazione, organizzazione e gestione del lavoro), con profonde implicazioni sia per i lavoratori sia per l'organizzazione aziendale (Paganin et al., 2021). Anche il modo con cui vengono gestiti i sistemi di produzione ha un impatto sullo stress lavoro-correlato, con dinamiche diverse a seconda del modello adottato. I sistemi di produzione di tipo Push contribuiscono imponendo un carico di lavoro costante ed elevato, basandosi su previsioni di mercato che rendono rigidi i ritmi di lavoro e lasciano al lavoratore scarso controllo sull'attività, portando a stress da sovraffaticamento (Karasek, 1979). Al contrario, i sistemi di tipo Pull sono fonte di pressione per i lavoratori a causa dell'elevata intensità operativa e rigore nella qualità; poiché le scorte sono minime, qualsiasi errore o rallentamento ha un impatto immediato sull'intera catena (Dombrowski et al., 2017). La letteratura scientifica ha esplorato il tema dello stress lavoro-correlato sotto diversi aspetti. Gli studi iniziali si sono concentrati sull'identificazione delle principali fonti di stress per i lavoratori del settore manifatturiero, distinguendo tra gli effetti delle ore di lavoro e del carico di lavoro (Hassan et al., 2015). L'esposizione prolungata allo stress non si limita a provocare problematiche di salute mentale, quali burnout, ansia e depressione, ma rappresenta un fattore di rischio per i lavoratori, che possono sviluppare anche malattie cardiovascolari o disturbi muscoloscheletrici. Infatti, dall'indagine condotta dall'EU-OSHA nel 2022 emerge che il 27% dei lavoratori soffre di disturbi di salute mentale causati o aggravati dal lavoro.

Lo studio di Awada et al. (2024) indaga il fenomeno dello stress e come esso non debba essere classificato unicamente come negativo. Tale fenomeno, infatti, è caratterizzato da vari stati di valenza: è più opportuno distinguerlo tra stress positivo (eustress), negativo (distress), noia e coesistenza tra eustress e distress. L'eustress indica una risposta ai fattori ambientali percepiti soggettivamente come sfida o opportunità, mentre il distress è associato a situazioni indesiderate, inattese e incontrollabili (Tafet, 2018).

In letteratura, per studiare questo fenomeno, gli studi adottano diversi approcci metodologici. Lo studio di Chernarboo et al. (2022) ha contribuito a distinguere i metodi di misurazione dello stress: il questionario NASA-TLX per l'autovalutazione dello stress, mentre i parametri oggettivi sono ricavati dalla misurazione di parametri fisiologici, come la respirazione, l'attività elettrodermica, l'attività cardiaca e l'attività pupillometrica. Inoltre, lo studio di Ciccarelli et al. (2023) osserva che in letteratura sono presenti numerosi articoli che combinano la valutazione soggettiva con lo studio dei parametri fisiologici; l'approccio più efficiente per l'analisi dei segnali è di tipo multimodale, ovvero basato sullo studio simultaneo di più parametri, in modo da trarre conclusioni maggiormente precise (Lucchese et al., 2025).

Nonostante i numerosi studi in letteratura, si evidenzia la mancanza di studi sperimentali che mettano a confronto lo stress generato dai sistemi di gestione della produzione di tipo Push e Pull, con un'analisi su come questi sistemi produttivi generino diversi stati di stress nei lavoratori.

Per questo motivo, il presente lavoro di tesi si propone di condurre una campagna sperimentale al fine di confrontare lo stress percepito durante lo svolgimento di un task di assemblaggio nelle due condizioni sperimentali Push e Pull, per poi determinare quale tra le due sia la più stressante e approfondire la presenza dei vari stati di stress. L'obiettivo è fornire indicazioni utili per la progettazione di ambienti di lavoro più sani ed efficienti, contribuendo al miglioramento del benessere e della produttività dei lavoratori.

Il primo capitolo presenta il contesto industriale nel quale si inserisce questo lavoro di tesi. In seguito, vengono definiti i vari stati di stress, e vengono discussi i principi fondanti delle due condizioni sperimentali e le loro caratteristiche principali.

Il secondo capitolo è dedicato alla descrizione dei metodi di acquisizione dei dati. Viene descritto il protocollo sperimentale ideato per rispondere agli obiettivi posti e gli strumenti

utilizzati per ricavare i dati utili. In seguito, vengono elencate e descritte le funzionalità dei questionari sottoposti, oltre che gli indicatori fisiologici.

Il terzo capitolo riporta i risultati ricavati dalle varie analisi, mentre il quarto capitolo interpreta i risultati, confrontando i dati soggettivi e oggettivi ottenuti per comprendere se questi si sono rivelati utili per rispondere agli obiettivi di ricerca posti.

Il quinto capitolo è dedicato alle conclusioni, alla descrizione dei limiti del protocollo sperimentale e ai suggerimenti per gli studi futuri.

Seguono, in Appendice, la lista dei questionari somministrati con l'elenco completo delle domande e gli script Matlab utilizzati per elaborare i segnali fisiologici.

CAPITOLO 1 – BACKGROUND

1.1 L’IMPATTO DELLE RECENTI RIVOLUZIONI INDUSTRIALI SUL SETTORE MANIFATTURIERO

1.1.1 INDUSTRIA 4.0

Il contesto industriale è in continua evoluzione, a causa di svariati fattori quali il crescente interesse nell’efficienza ed efficacia, la necessità di ridurre il più possibile i costi, e soprattutto sempre più innovazioni tecnologiche che portano costanti opportunità. In questo nuovo paradigma si inserisce anche l’essere umano, che vede il proprio ruolo aggiornarsi, per potersi adattare a quelli che sono i nuovi dogmi e le nuove regole che governano i contesti industriali odierni. Per analizzare approfonditamente il cambiamento dell’essere umano bisogna soffermarsi sulle due rivoluzioni più recenti e significative degli ultimi tempi: l’industria 4.0 e l’industria 5.0. Concentrandosi sulla prima, ci si può basare sul documento redatto dall’Accademia Nazionale di Scienza, Ingegneria e patrocinato dal Ministero federale dell’Istruzione e della Ricerca, intitolato “Garantire il futuro dell’industria manifatturiera in Germania – Raccomandazioni per implementare l’iniziativa strategica di Industria 4.0”. Questo documento ha proposto un piano basato su due pilastri principali: dapprima considera l’opportunità di introdurre delle tecnologie digitali nell’ambito industriale, che avrebbe come conseguenza quella di dare nuova spinta alla produttività e all’efficienza delle industrie tedesche; in secondo luogo, si sottolinea la volontà di far raggiungere alle imprese tedesche un predominio nella produzione e fornitura delle nuove tecnologie. È importante sottolineare che le tecnologie in questione non rappresentavano una novità assoluta sul mercato; di conseguenza, non si può parlare di una vera e propria rivoluzione in termini di innovazione digitale. Il cambiamento fondamentale

risiede invece nella loro applicazione, la vera trasformazione è avvenuta attraverso l'utilizzo "integrato, automatizzato e ottimizzato" di queste tecnologie preesistenti.

I principali strumenti digitali integrati nel nuovo sistema operativo industriale, descritti da Rezaei et al. (2024), sono:

- **Internet of Things (IoT)**: ci si riferisce a tutti quei sistemi informatici collegati a tutti i sottosistemi, oggetti interni ed esterni, che comunicano e cooperano tra di loro e con gli esseri umani;
- **Internet of Industrial Things (IIoT)**: caratterizzata da macchinari interconnessi che trasformano la catena di montaggio in un polo di innovazione digitale. Aiuta a riconoscere i possibili colli di bottiglia, le lacune dei processi e i guasti della linea;
- **Internet of Services (IoS)**: si indicano servizi interni e tutti quelli che attraversano le organizzazioni che vengono dati in dotazione ai partecipanti alla catena del valore e guidati dai big data e cloud computing.

Una delle ultime tecnologie introdotte all'interno della fabbrica 4.0 è il robot collaborativo, detto anche cobot. L'idea alla base è che la robotica collaborativa assista e collabori con l'uomo nell'eseguire azioni, supportandolo principalmente compiendo lo sforzo fisico. L'operaio in questo contesto svolge un lavoro principalmente mentale, di supervisione, con la necessità di acquisire varie competenze tecniche al fine di capire quando e come muoversi all'interno dello stesso spazio fisico condiviso tra umano e robot.

La classificazione delle relazioni uomo-robot è ripresa dallo studio di Wang et al. (2019):

- La situazione di base è la **coesistenza**, ovvero quando robot ed essere umano si trovano all'interno dello stesso spazio fisico ma senza che i rispettivi spazi di lavoro siano sovrapposti reciprocamente;
- L'**interazione** è presente invece quando operatore e robot condividono lo stesso spazio di lavoro comunicando tra loro; entrambi possono lavorare allo stesso compito ma solamente in un ordine sequenziale;
- La **cooperazione** è sviluppata quando i robot sono dotati di una propria autonomia, in termini di obiettivi, finalità, utilità. Possono lavorare simultaneamente e condividere temporaneamente alcune delle loro risorse fisiche e cognitive;
- La **collaborazione** ha come obiettivo preciso quello di portare a termine una serie di compiti lavorativi prefissati con un'attività coordinata e sincrona, in cui è consentito anche il contatto fisico.

La seguente tabella (Tab. 1.1) riassume le caratteristiche delle diverse relazioni uomo robot.

Tabella 1.1. Caratteristiche delle relazioni uomo-robot

	Coesistenza	Interazione	Cooperazione	Collaborazione
Area di lavoro		✓	✓	✓
Contatto diretto		✓		✓
Compito lavorativo		✓		✓
Risorsa			✓	✓
Processo simultaneo	✓		✓	✓
Processo sequenziale		✓	✓	

Una volta analizzate le nuove condizioni del contesto dell’Industria 4.0 è possibile dedurre ed elencare una serie di problematiche nel rapporto tra questo nuovo paradigma e i lavoratori, che vedono il proprio ruolo cambiare, con la necessità di acquisire nuove conoscenze e competenze per far fronte alle nuove regole. Per quanto concerne quindi la salute dei lavoratori si possono elencare:

- **Rischi di contatto tra operatori umani e robot:** a causa dell’aumento della presenza di strumentazione automatizzata, potrebbero aumentare i rischi di urti o contatti tra robot e lavoratori (Wang et al., 2019). Lo studio di Ogorodnikova (2008) ha analizzato tre possibili fonti di errore nell’interazione tra robot e uomo che possono portare a vari rischi per l’operatore:
 - Errori del robot legati al malfunzionamento dello stesso, che potrebbero generare movimenti imprevisti;
 - Errori umani nell’applicazione delle procedure richieste per l’utilizzo dei robot;

- Tutte le possibili fonti di errori derivanti da condizioni ambientali.
- **Rischi relativi all'aumento di ansia e stress:** se i lavoratori non comprendono a pieno i robot collaborativi con cui devono interagire o se non ne hanno le competenze adeguate, rischiano di sviluppare frustrazione, ansia e stress a fronte della non comprensione di cosa stia avvenendo. Anche l'accesso ad una notevole quantità di dati (in tempo reale o quasi) rischia di trasformarsi in un ostacolo, anziché in un'opportunità, se mancano l'abitudine e le competenze per la loro gestione. Ultimo ma non per importanza, sapere di essere oggetto di valutazione non solo sulle proprie capacità manuali come in passato, ma anche sulle proprie capacità cognitive, rischia di causare una maggiore pressione, che può influire anche sulle prestazioni e sulle performance (McColl et al., 2016). Pertanto, prima di introdurre nuove tecnologie in un posto di lavoro è necessario verificare l'eventuale accettazione di queste da parte dei dipendenti (Paganin et al., 2021).

1.1.2 INDUSTRIA 5.0

L'industria 5.0 riconosce l'utilità delle innovazioni tecnologiche dell'Industria 4.0 associate ai processi industriali e ne supporta gli obiettivi, ma pone l'attenzione su due aspetti non considerati o comunque non sviluppati a pieno: la sostenibilità ambientale e il benessere del lavoratore. Il documento della commissione europea “Industry 5.0- Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry” (Breque et al., 2021) identifica tre fattori chiave all'interno del nuovo paradigma:

- **Approccio human-centric:** pone i bisogni dell'essere umano al centro del processo, utilizzando la tecnologia come supporto all'operatore e non viceversa;
- **Sostenibilità:** ha come principi cardine quelli del riutilizzo delle risorse e del riciclo delle stesse, minimizzando sprechi e riducendo l'impatto ambientale;
- **Resilienza:** indica la robustezza nella produzione industriale, che fornisce supporto attraverso processi flessibili e capacità di adattamento nei cicli produttivi, specialmente in caso di crisi.

La progettazione incentrata sull'uomo è definita come un metodo iterativo che prevede il coinvolgimento sistematico degli utenti durante tutte le fasi di sviluppo del processo (Brunzini et al., 2021). L'obiettivo finale è quello di garantire ai lavoratori un ambiente in cui operare più sicuro e più confortevole possibile, incentivando così una motivazione ulteriore all'utente che potrebbe migliorare di conseguenza le proprie performance e ridurre il rischio di sviluppare condizioni psicofisiche che possano comprometterne il benessere,

quali ansia, stress, difficoltà nel muoversi agilmente etc... Questo però implica lo sviluppo dei processi lavorativi secondo una prospettiva “umana”, dove il lavoratore non è più visto come un “costo”, ma come un “investimento”: dunque i processi produttivi vengono sviluppati adattando l’uso e l’integrazione della tecnologica ai bisogni del lavoratore, e non viceversa (Brunzini et al., 2021). Per quanto concerne il già citato rapporto tra operatore umano e le nuove tecnologie industriali, come robotica e Intelligenza Artificiale (IA), l’obiettivo è renderlo quanto più orientato verso il benessere umano: dunque si può pensare di affidare ai robot attività dispendiose e soprattutto poco stimolanti, come ripetizioni semplici, mentre le tecnologie sull’IA possono guidare il lavoratore verso compiti più specializzati, supportando il loro pensiero creativo, flessibile e aperto.

1.2 WORK – RELATED STRESS

1.2.1 LO STRESS DEI LAVORATORI NEL SETTORE MANIFATTURIERO: CAUSE E CONSEGUENZE

Lo stress lavoro-correlato si presenta quando la domanda di lavoro richiesta supera la capacità di un singolo di soddisfarla (Brunzini et al., 2021); da qui si innescano vari meccanismi, come il tentativo di superare i propri limiti, fisici e mentali, causando stress, frustrazione, sforzi eccessivi. L’intensità con cui si provano i vari sforzi fisici e mentali, e l’esposizione prolungata nel tempo, possono gravare sullo stato psicofisico dell’essere umano provocando danni permanenti e a volte di non facile risoluzione. Lavorare in un ambiente che richiede un costante ed intenso coinvolgimento può dare soddisfazioni quando gli obiettivi vengono raggiunti, ma quando questo sforzo è eccessivo e /o non viene ripagato dai risultati, può manifestarsi lo stress. Questo fenomeno risulta svantaggioso sia per lo stato di salute del lavoratore sia per l’organizzazione intera, perché un lavoratore stressato può innanzitutto non performare adeguatamente, con un peggioramento progressivo nel tempo. Inoltre, se lo stress raggiunge livelli eccessivi, può sfociare nei disturbi sopracitati, obbligando il lavoratore ad assentarsi per malattia.

Vi sono altri fattori, oltre allo squilibrio tra domanda e capacità, che entrano in gioco e possono indurre stress nei lavoratori. Lo studio di Hassan et al. (2015) suggerisce altri aspetti importanti da tenere in considerazione nella valutazione di ciò che è potenzialmente più stressante per un operatore, quali il **work design**, il **work process design**, le **working hours** e il **workload**. Nel loro studio gli autori definiscono questi concetti e indagano, tramite questionari, quali siano i più impattanti per i lavoratori.

Il Work design permette ai dipendenti di vedere come i loro metodi di lavoro e le procedure di gestione si collegano tra loro, così come l'interazione tra persone e macchine. Secondo Freivalds e Niebel (2014), il work design può contribuire a superare l'alienazione e l'insoddisfazione dei dipendenti che derivano da compiti meccanici e ripetitivi.

Il Work process design consiste nel definire il flusso di lavoro, le esigenze relative alle attrezzature e i requisiti necessari per l'implementazione di un determinato processo. Utilizza solitamente una serie di strumenti come software di simulazione dei processi, diagramma di flussi e simili. Quando si progetta un processo si devono tenere conto di tutti gli attori che sono coinvolti, come i lavoratori e le attrezzature a disposizione, tra cui i mezzi automatizzati presenti, e altri aspetti come il carico di lavoro richiesto ecc...

Le Working hours sono il numero di ore che ciascun operatore trascorre lavorando ed essendo retribuito. Un orario di lavoro prolungato aumenta lo stress e i problemi di salute. Un mancato riposo, adeguato alle esigenze del singolo, rischia di aumentare la depressione e di portare allo stress;

Il Workload è quantità di lavoro attesa (o assegnata) da un lavoratore in un periodo di tempo specificato. Esistono sia il carico mentale che fisico, ed entrambi sono capaci di produrre stimoli di stress se c'è quello squilibrio tra capacità e richiesta a cui si faceva già riferimento.

I risultati dello studio hanno chiaramente delineato quali sono gli elementi più impattanti dai lavoratori. In termini di peso complessivo, il workload è emerso come l'elemento dominante, con un impatto del 47,4%. A seguire, le working hours si posizionano al secondo posto, con un impatto del 32,1%. Infine, con un peso inferiore, troviamo il work design al 23,5% ed il work process design al 21,7%. Questo è sicuramente utile per orientare le soluzioni al problema sullo stress in ambito lavorativo: concentrarsi sull'elemento percepito dai soggetti come più grave ed urgente è sicuramente una strategia corretta.

1.2.2 EUSTRESS, DISTRESS E IPOSTRESS

Finora è stato considerato lo stress come un unico fenomeno, ma al suo interno vi sono varie sfaccettature; in particolare possiamo distinguerli in eustress, distress e noia (o ipostress).

L'eustress indica lo stress positivo, ovvero quando ci si ritrova in una situazione in cui si interagisce con fattori ambientali che percepiamo o valutiamo positivamente dal punto di vista soggettivo (Tafet, 2018). Nello specifico del contesto industriale si tratta di tutto ciò che causa un senso di sfida, che contribuisce all'accrescimento di uno stimolo positivo.

Il distress indica lo stress negativo, associato a situazioni indesiderate, inattese e incontrollabili, che non vogliamo né ricerchiamo, ma che ci ritroviamo ad affrontare. Questo tipo di stress causa stati di ansia, depressione e altre sintomatologie negative col tempo (Tafet, 2018).

L'ipostress indica lo stress causato dalla noia o dalla mancanza di motivazione, che può indurre in ambito industriale a rilassamento e disattenzione e dunque errori per distrazione (Tafet, 2018).

Le organizzazioni lavorative si concentrano tipicamente sul ridurre le condizioni di stress negativo, quindi distress, senza però concentrarsi sul presupposto che esistano questi altri aspetti, ignorando dunque i potenziali benefici dell'eustress, come l'aumento della concentrazione e della motivazione; a tal ragione le organizzazioni stesse potrebbero progettare ambiti e processi industriali che abbiano come obiettivo ultimo quello di minimizzare il distress e l'ipostress e massimizzare l'eustress, attraverso approcci che stabiliscano aspettative impegnative ma raggiungibili per i lavoratori (Awada et al., 2024).

È importante notare inoltre come eustress e distress possano presentarsi contemporaneamente nello stesso spazio di lavoro: infatti per esempio un soggetto potrebbe provare eustress perché sta lavorando su di un progetto altamente stimolante, ma al contempo provare distress per altri motivi, come ad esempio il poco supporto da parte dei colleghi. È essenziale dunque considerare tutti gli aspetti possibili come importanti e di conseguenza creare uno spazio di lavoro bilanciato.

LEGGE YERKES-DODSON

La legge di **Yerkes-Dodson** è stata concettualizzata da due psicologi, Robert Yerkes e John Dodson, nel 1908. Essa chiarisce la relazione tra eccitazione e prestazione, sostenendo come il livello di prestazione ottimale sia ottenuto quando il livello di eccitazione è moderato; dunque, dove non sono presenti né picchi di bassa eccitazione (noia) né di alta eccitazione.

La figura 1.1, tratta dallo studio di Awada et al. (2024), mostra come lo spettro sia molto più ampio della semplice differenza tra stress positivo e negativo. Si parte da una condizione molto bassa di stress (ipostress), che porta ad un livello di performance insufficiente, fino ad arrivare al picco di questa U rovesciata, in cui il livello di stress è identificato come ‘focused’ e ‘motivated’, che porta al livello di performance massimo: quel punto è proprio la rappresentazione dell'eustress, quindi un range di percezione dello stress da parte del soggetto che porta ad essere stimolati ed a compiere il proprio compito al meglio possibile.

Aumentato ancor di più il livello di stress si presentano varie sfumature del distress, che conducono ad una diminuzione della performance, fino ad arrivare al punto più basso, ovvero il burnout.



Figura 1.1. Legge di Yerkes-Dodson

Tutto ciò è fondamentale per i manager o coloro che progettano un ambiente di lavoro: riconoscere l'impatto di noia, eustress, coesistenza tra eustress e distress e il distress puro può aiutare i datori di lavoro a promuovere ambienti di lavoro positivi che portino ad aumentare la produttività.

A tal proposito uno studio condotto da Jarinto (2010) conferma la teoria espressa dalla legge di Yerkes-Dodson tramite un esperimento condotto su di un gruppo di 160 lavoratori di un'industria manifatturiera: questa ricerca ha rivelato come l'eustress è il fattore chiave per raggiungere una soddisfazione lavorativa, e che questo è stimolato solo tramite un livello di eccitazione moderato. Un'insufficiente stimolazione porta alla noia e conseguentemente a livelli di performance inadeguati mentre un livello di eccitazione eccessivo può causare malattie fisiche, subconscie e mentali, in accordo con la legge di Yerkes-Dodson.

Da qui in avanti l'attenzione è rivolta principalmente sul concetto di eustress e distress e la loro coesistenza, e i motivi sono riconducibili allo studio di Vikoler et al. (2024): il modello sperimentale di questo studio prevede la rimozione del fattore di analisi ‘ipostress’ e si concentra solamente su eustress e distress. Il motivo principale è che i dati ricavati dai test sperimentali conducevano ad un'elevata correlazione nelle risposte dei partecipanti tra eustress e ipostress (circa 80%), che ha suggerito statisticamente che “noia” e “non ispirazione” possano rappresentare l'altra estremità del continuum dell'eustress piuttosto che un fattore di ipostress indipendente. La conclusione giunta è che il concetto di non

ispirazione e di noia sia un qualcosa legato alla costanza del non essere stimolato, e condividono più caratteristiche dello stress cronico rispetto a quello acuto.

1.3 CARATTERISTICHE E METODI DI DUE PRINCIPALI SISTEMI PRODUTTIVI E COME QUESTE INFLUENZANO IL BENESSERE DEL LAVORATORE

Nell'ambito della gestione della produzione, i principali sistemi di pianificazione e controllo del flusso dei materiali sono chiamati **Pull** e **Push**. Questi sistemi si basano su filosofie produttive che differiscono per la logica con cui vengono gestite le risorse, i tempi ed i materiali, influenzando sia l'efficienza dei processi sia la condizione psicofisiologica degli operatori.

Alcuni indicatori fondamentali consentono di descrivere l'andamento e l'efficienza di tali sistemi:

- il **Production Time** o **Cycle Time (CT)** rappresenta il tempo medio di attraversamento di un prodotto all'interno del sistema produttivo. Esso comprende l'intervallo che va dal momento in cui vengono ordinate le materie prime fino a quello in cui il prodotto finito è completato, passando attraverso le varie fasi del processo;
- Il **Throughput (TH)** indica invece il tasso di produzione, ovvero il numero medio di pezzi lavorati nell'unità di tempo;
- Il **Work In Process (WIP)** si riferisce al numero di pezzi presenti contemporaneamente all'interno del sistema produttivo.

Queste grandezze sono correlate tra loro dalla **Legge di Little** (1961), secondo la quale esiste una proporzionalità diretta tra il tempo medio di attraversamento ed il materiale in lavorazione ($WIP = TH \times CT$). In altre parole, all'aumentare del numero di pezzi presenti nel sistema, cresce proporzionalmente anche il tempo necessario affinché ciascun prodotto completa il suo ciclo produttivo.

Il **Takt Time** rappresenta il ritmo con cui un prodotto deve essere completato per soddisfare la domanda del cliente, ovvero il tempo massimo disponibile per produrre un'unità, dati il tempo disponibile di produzione e la domanda del cliente.

$$\text{Takt Time} = \frac{\text{Tempo disponibile di produzione}}{\text{Domanda del cliente}}$$

Il Takt time definisce il ritmo ideale di produzione richiesto, mentre il Throughput rappresenta il ritmo effettivo con cui il sistema produce; ne consegue che, quando il sistema

produce più rapidamente del Takt Time si accumulano scorte e WIP, quando produce più lentamente si generano ritardi.

1.3.1 SISTEMA PUSH

In un sistema Push la programmazione si basa sugli ordini ricevuti o più frequentemente sulla domanda prevista. La produzione viene pianificata in funzione di previsioni sui bisogni futuri dei clienti, con l'obiettivo di disporre sempre delle scorte e delle materie prime necessarie al processo produttivo. Gli ordini di produzione vengono quindi trasmessi in sequenza dalla fase a monte a quella a valle, secondo una logica pianificata centralmente; i lotti di materie prime vengono inviati al primo centro di lavoro, che li elabora e li trasferisce al successivo, senza verificare se quest'ultimo sia pronto a processarli o se dovranno attendere in coda. Il controllo del processo produttivo si concentra soprattutto sul TH, mentre il WIP viene monitorato come variabile d'osservazione.

La produzione viene avviata quando il sistema di pianificazione (MRP) rileva la necessità dei nuovi lotti: il materiale viene quindi prelevato dai magazzini, processato nei diversi centri di lavoro e infine ricollocato in magazzino al termine del ciclo produttivo. La logica Push si basa su previsioni che, se inaccurate, possono determinare un eccessivo accumulo di materiali a magazzino che si traduce con un aumento degli spazi occupati, costi aggiuntivi per la gestione del magazzino e rischi legati al deterioramento delle materie prime.

1.3.2 SISTEMA PULL

La filosofia di produzione su cui si basano i sistemi Pull prende il nome di “Just in Time” (JIT) che si concretizza in un insieme di tecniche, procedure e semplici accorgimenti volti a coordinare i flussi di produzione e a mantenerli il più possibile regolari. In un sistema Pull l'ordine di produzione è trasmesso da valle a monte, e quando il livello di magazzino dei prodotti finiti si approssima a zero viene ordinata al centro di lavoro immediatamente a monte la produzione di una quantità di prodotto sufficiente a ricostruire il magazzino. La produzione determina uno svuotamento del magazzino a monte che, a sua volta, richiederà la produzione per ripristinare il livello ottimale delle scorte. In sintesi, la produzione è regolata sulla domanda reale, in modo che venga prodotto soltanto ciò che è necessario, nella quantità necessaria e solo quando c'è una richiesta del cliente. Il controllo del processo

produttivo si concentra soprattutto sul WIP, mentre il TH viene monitorato come variabile d'osservazione. Infatti, i sistemi Pull stabiliscono un limite sul WIP.

Altri fondamenti del JIT includono:

- Riduzione della dimensione dei lotti: i lotti di piccole dimensioni contribuiscono a mantenere uniforme il carico di lavoro nel sistema mentre i lotti di grandi dimensioni comportano tempi di processo più lunghi e grande capacità produttiva;
- MPS (Master Production Schedule) uniforme: un MPS uniforme permette di pianificare la capacità produttiva, individuare i vincoli di capacità delle stazioni critiche e bilanciare le linee produttive;
- Tempi di attrezzaggi brevi: poiché i piccoli lotti di produzione richiedono set-up frequenti, è necessario che i tempi di set-up siano ridotti per non compromettere l'utilizzo delle macchine e delle risorse umane.

CAPITOLO 2- METODO

In questo capitolo verranno descritti i metodi usati nelle sessioni di acquisizioni di dati sperimentali svolte presso il DIGEP (Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione) del Politecnico di Torino.

2.1 OBIETTIVI E RESEARCH QUESTION

La presente tesi, incentrata sul tema “No Stress – Manufacturing”, si propone di analizzare gli aspetti fisiologici e psicologici dello stress lavoro-correlato, attraverso la raccolta di dati biometrici e la somministrazione di questionari. L’obiettivo è simulare un contesto produttivo reale al fine di rispondere alle seguenti research question:

- Quale condizione produttiva tra Push e Pull è la più stressante?
- È possibile valutare la presenza di eustress, distress e coesistenza tra eustress e distress?

Al fine di simulare un contesto di assemblaggio industriale, sono stati progettati due task sperimentali basati sull’utilizzo dei Lego Technic. L’impiego di questi strumenti ha permesso di riprodurre, in scala ridotta, le principali dinamiche di un processo produttivo reale, mantenendo al contempo un ambiente sicuro, ripetibile e facilmente standardizzabile. I task assegnati richiedevano ai partecipanti di eseguire operazioni di assemblaggio, che replicassero le caratteristiche tipiche di un contesto industriale, come la precisione dei movimenti e la gestione del tempo. Ogni partecipante è stato sottoposto ad entrambe le condizioni sperimentali secondo un ordine controbilanciato: metà dei soggetti ha iniziato

con il task Push e l'altra metà con il task Pull, al fine di ridurre i possibili effetti di apprendimento o affaticamento.

2.2 DESCRIZIONE DEL PROTOCOLLO SPERIMENTALE

Ogni sessione sperimentale si è svolta in modo individuale e ha seguito una procedura standardizzata (Fig. 2.1), della durata complessiva di circa un'ora.

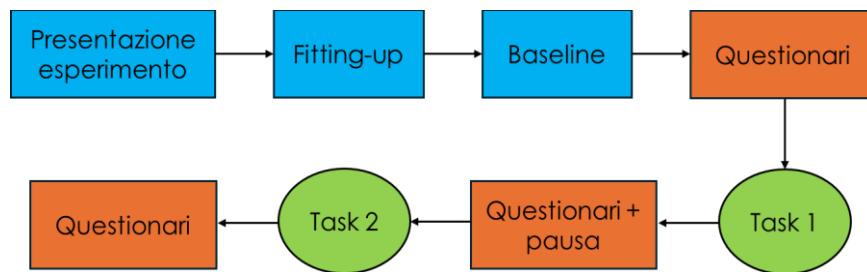


Fig. 2.1 - Diagramma a blocchi del protocollo sperimentale

Indipendentemente dal livello di familiarità dichiarato nell'utilizzo dei pezzi di Lego Technic, tutti i partecipanti hanno eseguito un breve esercizio preliminare di montaggio e smontaggio di un modellino, unico per tutti i soggetti, con l'obiettivo di acquisire manualità con i materiali e ridurre i possibili effetti legati all'inesperienza.

Completata la fase introduttiva, i partecipanti hanno compilato due questionari: il questionario sociodemografico e la Perceived Stress Scale (PSS – 10).

Terminata questa fase, è stata applicata la strumentazione biomedica per la registrazione dei segnali fisiologici.

Una volta completato il set up strumentale, che richiedeva in media circa dieci minuti, è stata avviata una fase di baseline della durata di cinque minuti, durante la quale i partecipanti, seduti e in posizione rilassata, sono stati invitati a non muoversi né parlare, in modo da minimizzare gli artefatti nei segnali fisiologici. Lo scopo di questa fase è quello di registrare i vari segnali fisiologici a riposo per poi avere una base su cui confrontare e normalizzare i segnali durante le attività.

Successivamente il partecipante si è spostato presso la postazione di lavoro, che è stata mantenuta identica in ogni sessione sperimentale, dove gli sono stati illustrati ed ha eseguito i task sperimentali in posizione eretta.

Al termine della prima condizione sperimentale, è stata concessa una pausa di cinque minuti, durante la quale il partecipante ha potuto rilassarsi e ha compilato i questionari NASA – TLX e VEDAS, volti a valutare il carico di lavoro percepito e ad individuare i diversi stati di stress. La durata di cinque minuti è stata scelta in quanto rappresenta il tempo medio necessario affinché i segnali fisiologici tornino al livello basale (Xinyue Ma et al., 2024).

Successivamente, ha eseguito il secondo task e, al termine, ha nuovamente compilato il NASA – TLX ed il VEDAS relativi a quella condizione.

Infine, la strumentazione biomedica è stata rimossa, concludendo la sessione sperimentale.

2.2.1 TASK PULL

Il task Pull è stato ideato per rappresentare una modalità operativa tipica dei sistemi di Lean Manufacturing, in cui l'attività produttiva viene avviata solo in risposta ad una richiesta effettiva e il flusso di lavoro è scandito dai ritmi reali della domanda.

In questa condizione, il partecipante aveva 2 min 34 sec per assemblare un singolo modellino realizzato con Lego Technic, per un totale di cinque modellini consecutivi (Fig. 2.2).

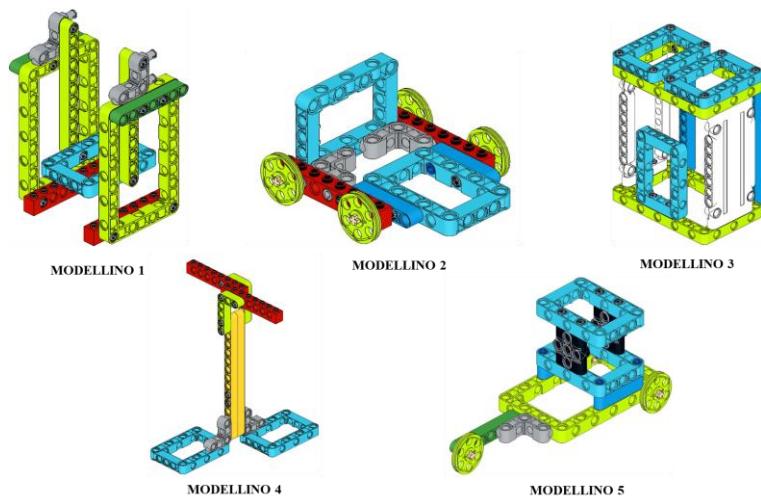


Fig. 2.2 Modellini Pull

Il tempo di completamento è stato determinato sulla base dei risultati di un test preliminare che ha coinvolto un campione pilota di nove soggetti, ai quali era stato chiesto di assemblare i cinque modellini senza vincoli di tempo. Durante questa fase, il tempo di completamento di ciascun modellino è stato cronometrato e registrato per ogni singolo step; la media dei

tempi complessivi ottenuti ha fornito il valore di riferimento utilizzato come tempo limite nel task sperimentale e, inoltre, ha permesso di ricalibrare la difficoltà di alcuni modellini che erano risultati particolarmente impegnativi.

Ogni modellino svolto dal partecipante durante la sessione sperimentale era accompagnato da istruzioni di montaggio dettagliate, proiettate su un monitor posto davanti al partecipante, suddivise in step numerati, ciascuno dei quali corrispondeva ad una cassetta numerata contenente i pezzi necessari per completare quella specifica fase. Le cassettine erano disposte frontalmente sul piano di lavoro, permettendo un accesso ordinato ed intuitivo ai componenti, in linea con l'obiettivo di minimizzare sprechi di tempo e movimenti superflui, secondo i principi della metodologia Pull.

I cinque modellini sono stati progettati in modo da garantire un livello di difficoltà omogeneo, mantenendo pressoché costante il numero di componenti e la difficoltà delle operazioni di assemblaggio.

La performance di ciascun partecipante è stata valutata in base al risultato ottenuto per ogni modellino, classificato come:

- Corretto, se completato senza errori di assemblaggio nel tempo stabilito
- Errato, se presentava collegamenti impropri o se non terminato nel tempo

assegnato

2.2.2 TASK PUSH

Il task Push è stato progettato per riprodurre una modalità operativa basata su una logica di produzione “a spinta”, in cui il lavoro procede in base ad una pianificazione prestabilita.

L'attività consisteva nel montaggio ripetuto di un modellino realizzato con Lego Technic rappresentato attraverso tre viste (completa, laterale e dall'alto) riportate su un monitor posto davanti al partecipante. A differenza del task Pull, in questa condizione non venivano fornite istruzioni: i partecipanti dovevano basarsi esclusivamente sulle viste fornite e sul banner superiore che indicava le quantità dei pezzi necessari per l'assemblaggio di ciascun modellino.

Tutti i componenti erano collocati all'interno di cassettine organizzate sulla destra del piano di lavoro. All'inizio di ogni ripetizione il partecipante doveva prelevare esclusivamente i

pezzi necessari alla costruzione di un singolo modellino, assemblarli sul tavolo e completare il prodotto nel minor tempo possibile.

La durata complessiva del task era fissata a 12 min 50 sec, durante i quali il partecipante doveva realizzare almeno sette modellini completi. Nel caso in cui l'obiettivo fosse stato raggiunto prima della scadenza del tempo, veniva richiesto di continuare l'assemblaggio fino al termine stabilito. Ai fini della valutazione della performance, solo i modellini correttamente assemblati venivano conteggiati nel computo totale dei prodotti finiti.

Per garantire comparabilità tra i due task sperimentalni, il tempo totale del task Push è stato scelto equivalente a quello del task Pull ed il numero di ripetizioni è stato dunque determinato sulla base dei risultati preliminari ottenuti dal gruppo pilota, utilizzato per la calibrazione del protocollo.

Di seguito la Fig. 2.3 mostra il modellino utilizzato per il task Push, oltre alle viste fornite e ai pezzi necessari per assemblarlo:

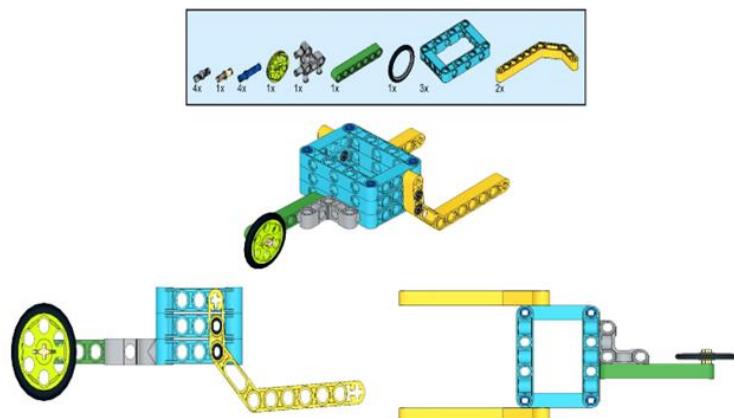


Fig. 2.3 - Modellino Push

2.3 STRUMENTI DI MISURA

Per quanto riguarda l'identificazione dello stress sono state utilizzate misure soggettive ed oggettive. Le misure di stress basate sulla compilazione di questionari sono considerate **soggettive** perché si basano sulla percezione dell'individuo riguardo alla propria esperienza di stress, invece, le misure che includono parametri fisiologici sono classificate come **oggettive** perché si basano su dati misurabili, quantificabili e indipendenti dal giudizio dell'individuo.

Nel presente esperimento, le misure soggettive utilizzate sono:

- **Perceived Stress Scale-10 (PSS-10)**
- **RAW NASA-TLX**
- **VEDAS**

Le misure oggettive, invece:

- **Elettrocardiogramma (ECG)**
- **Attività Elettrodermica (EDA)**
- **Respirazione (RESP)**
- **Attività Pupillometrica**

L'attività cardiaca, l'attività elettrodermica e la respirazione sono stati acquisiti mediante il registratore telemetrico wireless multicanale Encephalan Mini ABP-10 (Fig. 2.4), con campionamento a 250 Hz.



Fig. 2.4 Encephalan Mini ABP-10

L'attività pupillometrica ha richiesto l'utilizzo dell'Eye tracker Tobii Pro Glasses 3, un dispositivo indossabile non invasivo dotato di videocamera (Fig. 2.5).



Fig. 2.5 Eye tracker Tobii Pro Glasses 3

2.3.1 STRUMENTI SOGGETTIVI: QUESTIONARI PSS – 10

Il Perceived Stress Scale è uno dei questionari psicologici più utilizzati per misurare il livello di stress percepito di una persona. È stato sviluppato nel 1983 dallo psicologo Sheldon Cohen con la collaborazione di Tom Kamarck e Robin Mermelstein. Le domande che compongono il Perceived Stress Scale, a cui gli intervistati sono chiamati a rispondere, sono state concepite per rilevare in che misura gli individui percepiscono la propria vita come incontrollabile, imprevedibile e sovraccarica. Il questionario originale presenta 14 domande, di cui sette hanno formulazione negativa e sette positiva. Le domande con formulazione negativa chiedono all'intervistato la frequenza con cui ha vissuto situazioni o sensazioni stressanti. Quelle positive, al contrario, sono legate alla capacità di gestione o senso di controllo di tali situazioni. Ogni domanda è valutata su una scala Likert da 0 a 4 (0 = per nulla, 4 = molto spesso), e il valore finale è ottenuto rovesciando il punteggio delle domande positive e sommando, in seguito, il punteggio di tutte le domande. Un valore finale alto indica un livello di percezione dello stress maggiore.

La versione maggiormente impiegata, sottoposta ai partecipanti nella presente ricerca, è la PSS – 10 (Appendice A) che, a differenza dell'originale, è composta da 10 domande, nelle quali si indaga se ci sono state delle situazioni mentalmente significative all'interno della vita del partecipante nell'ultimo mese. Delle dieci domande che compongono la scala solo

quattro hanno una formulazione positiva. La scala è stata validata in italiano da Messineo e Tosto (2024).

RAW NASA - TLX

Pubblicato per la prima volta nel 1988 nel capitolo “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research” in Human Mental Workload da Sandra G. Hart e Lowell E. Staveland, il NASA – TLX viene proposto come soluzione al problema dell’elevata variabilità tra i soggetti nell’uso delle scale soggettive adoperate nei contesti operativi. Il NASA – TLX è una misura soggettiva multidimensionale del carico di lavoro percepito, che tiene conto di sei dimensioni: richiesta mentale, richiesta fisica, richiesta di tempo, prestazione, sforzo e frustrazione.

Le prime tre dimensioni sono correlate alle esigenze del partecipante, mentre le ultime tre sono correlate all’interazione del partecipante con l’attività.

Ogni sottoscala ha un punteggio da 0 a 20 (0 = nullo, 20 = molto alto) con incrementi di 5, che portano ad avere un risultato finale che varia tra 0 e 100 per ognuna di esse. Viene chiesto al partecipante di effettuare un confronto a coppie per stabilire quali dimensioni hanno più peso nel loro carico, il valore di carico di lavoro finale è calcolato come somma pesata delle sotto scale dove i pesi riflettono l’importanza attribuita dal partecipante a ciascun fattore.

Nella presente ricerca è stata somministrata ai partecipanti una versione semplificata del classico NASA – TLX chiamata RAW NASA – TLX (APPENDICE B) utilizzata maggiormente in contesti sperimentali in cui il tempo è limitato. Questa variante, introdotta negli anni ‘90, non prevede il confronto a coppie da parte del partecipante e per questo motivo il punteggio finale viene calcolato facendo la media aritmetica delle sei dimensioni.

VEDAS

Per distinguere tra eustress e distress, i partecipanti hanno valutato l’attività svolta utilizzando la Valencia Eustress-Distress Appraisal Scale (VEDAS) (Rodriguez et al., 2013). Il VEDAS è un questionario usato per valutare la percezione di eustress e distress in ambito lavorativo e si compone di 20 elementi suddivisi in quattro dimensioni principali: carico di lavoro, conflitto vita-lavoro, responsabilità personale e qualità delle relazioni. In linea con il metodo proposto da Parga et al. (2024), anziché somministrare l’intero questionario, i partecipanti hanno risposto a due domande chiave, valutate su una scala Likert da 1 a 6 punti (1 = “sicuramente no”, 6 = “sicuramente sì”). Le domande indagano

se l'attività è percepita come una fonte di opportunità (indicativa di eustress) o come una fonte di pressione (indicativa di distress). Utilizzando questo metodo è possibile ricostruire i diversi stati di stress, seguendo il criterio di Awada et al., (2024); le valutazioni relative a opportunità e pressione vengono convertite in categorie binarie: i punteggi da 1 a 3 sono ricodificati come “non è”, mentre quelli da 4 a 6 come “è”, da qui le quattro possibili combinazioni:

- Noia (E = non è, D = non è)
- Distress (E = non è, D = è)
- Eustress (E = è, D = non è)
- Coesistenza Eustress – Distress (E = è, D = è)

2.3.2 STRUMENTI OGGETTIVI: SEGNALI FISIOLOGICI ATTIVITÀ CARDIACA

L'elettrocardiogramma (ECG) registra e riporta graficamente il ritmo e l'attività elettrica del cuore, rappresentando uno degli indicatori fisiologici più utilizzati nello studio e nel monitoraggio dello stress. La facilità di raccolta e misurazione dei parametri cardiaci, unita al fatto che è relativamente economica, non invasiva e indolore, rendono l'ECG ampiamente accessibile (Laborde et al., 2017). Dallo studio di Järveline - Pasanen et al. (2018) si evince come in condizioni di stress, l'attivazione simpatica e parasimpatica del sistema nervoso autonomo si riflettono su parametri come la frequenza cardiaca (HR) e la variabilità della frequenza cardiaca (HRV). Il tono vagale cardiaco, che rappresenta il contributo del sistema nervoso parasimpatico alla regolazione cardiaca, risulta correlato a numerosi fenomeni rilevanti per la ricerca psicofisiologica, tra cui l'autoregolazione a livello cognitivo, emotivo e di salute (Laborde et al., 2017).

Dall'ECG è possibile estrarre numerosi indicatori, tra cui indici nel dominio del tempo, della frequenza e non lineari. I parametri considerati nell'analisi sono: la frequenza cardiaca (HR), la deviazione standard degli intervalli RR normali (SDNN) e la radice quadrata della media delle differenze tra intervalli RR consecutivi (RMSSD) per quanto riguarda il dominio del tempo; la bassa frequenza (LF), l'alta frequenza (HF) e il relativo rapporto (LF/HF) per quanto riguarda il dominio della frequenza.

Lo studio di Immanuel et al. (2023) propone il significato fisiologico delle metriche HRV, riassunte nella tabella Tab. 2.1.

Tab. 2.1 – Metriche HRV con relativa descrizione e significato fisiologico

Metriche HRV	Descrizione	Significato fisiologico
SDNN	Deviazione standard degli intervalli RR	Rappresenta la funzione globale autonoma del cuore
RMSSD	Radice quadrata della media della somma dei quadrati delle differenze tra intervalli RR adiacenti	Rappresenta prevalentemente la modulazione parasimpatica della frequenza cardiaca
HF	Alta Frequenza (0.15-0.4 Hz)	Riflette l'aritmia sinusale respiratoria, mediata dai cambiamenti nel tono vagale.
LF	Bassa Frequenza (0.04-0.15 Hz)	Riflette una combinazione delle influenze simpatiche e vagali
LF/HF	Rapporto nel dominio della frequenza tra potenza LF e HF	Concepito come indice globale dell'equilibrio simpatico-vagale

La frequenza cardiaca invece è un importante marcitore quantitativo della regolazione cardiovascolare da parte del sistema autonomo: essa è tradizionalmente stimata come il numero di eventi dell'onda R (battiti cardiaci) per unità di tempo (Barbieri et al., 2005).

L'aumento dello stress lavorativo è associato a una diminuzione della HRV, in particolare a una riduzione dell'attivazione parasimpatica. Una bassa attività parasimpatica, caratterizzata da una diminuzione della potenza ad alta frequenza HF e da un aumento della potenza a bassa frequenza LF, è stata segnalata come il fattore più comune associato ai cambiamenti nello stress (Immanuel et al., 2023).

Contestualmente l'aumento dello stress lavorativo è associato ad una diminuzione degli indicatori SDNN e RMSSD, e ad un aumento degli indicatori HR e del rapporto LF/HF (Brugnera et al., 2018).

Per la rilevazione dell'attività cardiaca sono stati utilizzati tre elettrodi, due posti sul braccio sinistro e uno sul braccio destro (Fig 2.6).

Sebbene sia una misura robusta, l'ECG è fortemente sensibile agli artefatti da movimento e per questo motivo è necessaria un'accurata preelaborazione del segnale per identificare correttamente i picchi R.



Fig 2.6 Elettrodi per l'acquisizione del segnale ECG

ATTIVITÀ ELETTRODERMICA

L'attività elettrodermica (EDA) rappresenta la variazione della conduttanza cutanea ed è considerata un indicatore dell'attività del sistema nervoso autonomo, in particolare della componente simpatica. Con l'aumento dei livelli di stress cresce anche la conduttanza elettrica della pelle (μS), in conseguenza della maggiore stimolazione delle ghiandole sudoripare (Leiner et al., 2012). Le risposte registrate dai segnali EDA possono riflettere sia forme di stress percepite come positive sia come negative. Per questo motivo, l'EDA è

ampiamente riconosciuto come un segnale capace di fornire informazioni preziose sull'interazione tra i processi mentali e risposte fisiologiche (Leiner et al., 2012).

Dal punto di vista analitico, l'EDA viene comunemente descritta attraverso due componenti principali: tonica e fasica. La componente tonica corrisponde alle variazioni lente e graduali della conduttanza cutanea note come livello di conduttanza cutanea (SCL); invece, la componente fasica si manifesta attraverso risposte rapide denominate risposte della conduttanza cutanea (SCR) (Meijer et al., 2023). Gli indicatori utilizzati in questo studio sono ricavati dalla componente fasica, e sono la frequenza e l'ampiezza. Un aumento dello stress lavorativo è associato ad un cambiamento della condutività elettrica della pelle, che comporta un aumento dei valori di frequenza e ampiezza della componente fasica (Sharma et al., 2016).

In questa ricerca, l'acquisizione dell'EDA è stata effettuata mediante sensori applicati alle dita della mano non dominante (Fig 2.7), al fine di ridurre gli artefatti da movimento. La qualità del segnale, infatti, può essere influenzata sia dai movimenti sia da fattori ambientali come la temperatura (Sharma et al., 2016).



Fig 2.7 Sensori per l'acquisizione dell'EDA

ATTIVITÀ RESPIRATORIA

L'attività respiratoria è considerata uno dei segnali più affidabili per la misurazione dello stress. La relazione tra stress e respirazione è così stretta che in alcuni articoli il controllo volontario della respirazione viene studiato per ridurre gli effetti negativi dello stress (Hernando et al., 2015). La frequenza respiratoria, espressa in respiri al minuto, corrisponde al numero di cicli di inspirazione – espirazione che una persona compie in un minuto; l'ampiezza toracica, espressa in millimetri, rappresenta la variazione dell'escursione del torace, considerata un indice della profondità del respiro. In condizioni di stress, la letteratura riporta tipicamente un aumento della frequenza respiratoria, con un respiro più rapido e superficiale, accompagnato da una riduzione dell'ampiezza toracica, segno di una respirazione meno profonda (Hernando et al., 2015).

Il monitoraggio respiratorio mediante fascia toracica si rivela pertanto uno strumento particolarmente utile perché lo stress influenza fortemente la dinamica respiratoria attraverso l'attivazione del sistema nervoso autonomo.

Per il rilevamento del segnale respiratorio è stata impiegata una fascia toracica dotata di estensimetri (Fig. 2.8), in grado di registrare le variazioni meccaniche associate ai movimenti di espansione e contrazione del torace durante la respirazione.



Fig 2.8 Fascia toracica per l'acquisizione del segnale respiratorio

ATTIVITÀ PUPILLOMETRICA

L'oculometria è una tecnica che permette di misurare i movimenti oculari per raccogliere informazioni su indicatori quali la direzione dello sguardo, il tempo di fissazione, il diametro delle pupille e la frequenza del battito di ciglia (Bergstrom et al., 2014).

In questo studio l'indicatore utilizzato per ricavare informazioni sullo stress del partecipante è il diametro della pupilla. Il diametro della pupilla tende a dilatarsi proporzionalmente all'aumento del carico cognitivo e dello stress (Gawron, 2008), per poi diminuire quando il carico eccede il limite delle risorse cognitive disponibili (Marinescu et al., 2018). La dilatazione della pupilla è una risposta del sistema nervoso simpatico autonomo, che reagisce a stati di stress, interesse ed emozioni (Bergstrom et al., 2014).

Le registrazioni video sono state acquisite mediante l'utilizzo dell'eye tracker. Con software specializzati è possibile, in seguito, analizzare i dati video per estrapolare le caratteristiche oculari di interesse per il rilevamento dello stress. (Gervasi et al. 2024).

Le criticità associate a questo indicatore risiedono nella natura stessa della pupilla: infatti le pupille si dilatano e restringono non solo come risposta ad un certo carico cognitivo, ma anche per motivi naturali. I due motivi principali sono la regolazione dell'intensità luminosa e la profondità visiva (Zhong et al., 2011).

2.4 RECLUTAMENTO DEI SOGGETTI

Il progetto di ricerca ha coinvolto un campione di 39 soggetti. Di questi, 2 sono stati esclusi a causa di segnali fisiologici non rilevati correttamente dai dispositivi utilizzati, portando il campione finale a 37 partecipanti. I soggetti erano studenti laureandi e giovani ricercatori con formazione in ambito ingegneristico. Il reclutamento dei soggetti è avvenuto su base volontaria in seguito ad annunci pubblicati sui canali social della facoltà e mediante passaparola tra studenti e colleghi che avevano già preso parte all'esperimento. All'inizio di ogni sessione sperimentale è stato chiesto ai soggetti di acconsentire alla partecipazione allo studio, preventivamente esaminato ed approvato dal Comitato Etico del Politecnico di Torino, firmando il modulo di consenso informato. Per garantire la sicurezza dei partecipanti e la qualità dei dati raccolti, sono stati selezionati esclusivamente soggetti in buono stato di salute, senza patologie note a livello neurologico, cardiaco o respiratorio; inoltre, ai soggetti che normalmente indossano gli occhiali è stato chiesto di utilizzare le lenti a contatto per garantire una migliore acquisizione del segnale oculare. I dati biometrici rilevati e le risposte

ai questionari sono stati associati ad un codice casuale in modo da garantire l’anonimizzazione dei dati raccolti.

2.4.1 QUESTIONARIO SOCIO-DEMOGRAFICO

Il questionario sociodemografico è stato somministrato al partecipante prima dell’esperimento. La raccolta di questi dati è fondamentale non solo perché consente di verificare che non ci siano differenze sistematiche tra i gruppi sperimentali, assicurando che i gruppi siano bilanciati, ma soprattutto perché permette di analizzare a posteriori se e come le variabili sociodemografiche possano aver influenzato i risultati ottenuti.

Di seguito si riporta la composizione del campione in esame:

- **Età dei partecipanti:** L’età dei partecipanti è un requisito del protocollo sperimentale: infatti l’obiettivo era quello di avere soggetti compresi in un range d’età quanto più possibile ristretto, in modo da eliminare elementi di variabilità quali abitudini e ritmi di vita diversi, che possono portare il partecipante ad approcciare l’esperimento con livelli basali di stress diversi. Il range d’età ottenuto è dai 19 ai 31 anni, con una media di circa 25 anni.
- **Genere dei partecipanti:** La suddivisione del campione è del 64% di donne e del 36% di uomini. Nonostante si sia cercato di rendere il campione quanto più omogeneo, la distribuzione di genere finale presenta uno sbilanciamento.
- **Titolo di studio:** Il 51% dei partecipanti è attualmente frequentante di un corso di Laurea Magistrale, il 41% di un corso di Laurea Triennale, mentre l’8% ha in corso un Dottorato.
- **Area di formazione:** I partecipanti sono principalmente suddivisi in frequentanti/aventi frequentato in Ingegneria Gestionale (30%) e Ingegneria Biomedica (35%).
- **Disturbi della vista:** Si evidenzia come il 51 % dei partecipanti non possedeva disturbi visivi.

2.5 ANALISI DEI DATI

2.5.1 ELABORAZIONE DEI SEGNALI

I segnali ECG, EDA e respiratorio sono stati analizzati mediante specifici script sviluppati in MATLAB, mentre l’elaborazione del segnale oculare è stata condotta tramite il software Tobii Pro Lab.

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le procedure e i codici utilizzati per l'analisi di ciascun segnale.

ECG

Il codice per l'analisi dell'ECG (APPENDICE C) è stato progettato per la rilevazione delle serie RR relative alle diverse fasi sperimentali: baseline, task Push e task Pull. Le serie RR sono poi state esportate in formato testo per essere compatibili con il software Kubios HRV, utilizzato per la successiva estrazione dei principali indicatori di variabilità cardiaca.

Sono state eseguite una serie di operazioni che partono dalla lettura e dalla scalatura dei dati grezzi provenienti dai file di registrazione. In seguito, il segnale è stato sottoposto a pulizia dei valori non numerici e ad una segmentazione basata sugli indici temporali, corrispondenti alle diverse condizioni. Il segnale ECG di ciascun segmento è stato successivamente filtrato mediante una combinazione di filtri Butterworth passa-alto e passa basso per eliminare rispettivamente i drift di linea e il rumore ad alta frequenza, preservando la componente utile del tracciato. Dopo la fase di filtraggio sono stati individuati i picchi R e da questi è stata poi calcolata la serie degli intervalli RR, espressa in millisecondi, che rappresentava la sequenza dei battiti cardiaci nel tempo. Le serie sono state infine ripulite da eventuali valori anomali, eliminando intervalli minori di 300 ms e maggiori di 2000 ms, considerati fisiologicamente non plausibili (Almalchy et al., 2019).

Successivamente, per ogni soggetto, gli indicatori ottenuti per ogni task sono stati normalizzati rispetto alla baseline utilizzando il metodo del rapporto (Sacha, 2013), in modo da ottenere dei valori confrontabili con quelli ottenuti dagli altri soggetti analizzati.

EDA

Attraverso lo script (APPENDICE D) il segnale subisce una fase di preelaborazione volta a rimuovere eventuali valori anomali o mancanti tramite interpolazione lineare, e ad applicare un coefficiente di calibrazione specifico del sensore utilizzato per convertire in microSiemens (μ S) i dati grezzi, espressi originariamente in unità arbitrarie.

Il segnale così pre-elaborato è stato poi analizzato con Ledalab, un software dedicato alla scomposizione del tracciato EDA nelle sue componenti tonica e fasica. Sulla base della struttura temporale del protocollo sperimentale, il segnale è stato segmentato nelle tre condizioni. Per ogni segmento sono stati calcolati il numero totale di SCR e la loro ampiezza media, considerando valide solo le risposte con ampiezza pari o superiore a 0.01 μ S. La

frequenza delle SCR (espressa in Hz) è stata determinata come rapporto tra il numero di risposte e la durata del segmento (Braithwaite et al., 2013)

Infine, i valori della componente fasica di frequenza ed ampiezza relativi ai task di Push e di Pull sono stati normalizzati rispetto alla baseline mediante una trasformazione logaritmica (Subramanian et al., 2020) in modo da ottenere indici indipendenti dalle differenze individuali nel livello di conduttanza.

RESPIRAZIONE

Il processo di analisi del segnale respiratorio è stato implementato attraverso uno script, la cui elaborazione è suddivisa in fasi sequenziali (APPENDICE E).

Inizialmente, il segnale grezzo è stato sottoposto ad una fase di pulizia dei dati, in cui eventuali valori anomali o non numerici sono stati gestiti tramite interpolazione lineare per mantenere continuità temporale. Con l'applicazione del filtro Butterworth passa-basso con frequenza di taglio a 20 Hz è stato rimosso il rumore ad alta frequenza in modo da rendere il segnale idoneo all'analisi dei picchi. I potenziali artefatti da movimento sono stati gestiti identificando i salti bruschi (variazione superiore a cinque deviazioni standard del segnale) e riallineando successivamente il segnale. Infine, il segnale è stato segmentato nelle fasi sperimentali e, per ciascuna di esse, sono state estratte le metriche chiave: la frequenza respiratoria (RR), calcolata contando i picchi inspiratori e convertita in respiri al minuto, e l'ampiezza respiratoria media, definita come la differenza tra il valore medio dei picchi e il valore medio del segnale (Uttam et al., 2012).

Tali metriche sono state successivamente normalizzate rispetto alla fase di baseline utilizzando il metodo della sottrazione (Kempfle et al., 2021).

ATTIVITÀ PUPILLOMETRICA

La fase di estrazione dei dati pupillometrici non ha richiesto la necessità di implementare uno script di elaborazione dedicato, in quanto il software Tobii Pro Lab, ovvero il software ufficiale dell'eye-tracker utilizzato, permette di estrarre una vasta gamma di indicatori biometrici.

Per ricavare l'indicatore relativo al diametro pupillare, si è proceduto alla segmentazione del tracciato oculare, introducendo eventi specifici in corrispondenza dell'inizio e della fine sia della fase di baseline sia dei task sperimentali. I valori istantanei del diametro pupillare

estratti dal software, sono stati normalizzati seguendo il metodo dello z-score (Gervasi et al. 2024) calcolato attraverso la seguente formula:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$$

dove z_{ij} è lo z-score i per il partecipante j, x_{ij} il valore istantaneo del diametro pupillare i per il partecipante j, \bar{x}_j la media della baseline del partecipante j, e s_j la deviazione standard della baseline del partecipante j.

Infine, sono stati calcolate la media degli z-score e la media delle deviazioni standard dei singoli z-score per entrambe le condizioni sperimentali.

È stata applicata una normalizzazione per sottrazione del diametro pupillare medio di ciascun task rispetto al corrispondente valore della baseline.

2.5.2 TEST STATISTICI

TEST DI NORMALITÀ'

È stato effettuato il test di normalità di Anderson-Darling al fine di comprendere se le distribuzioni dei dati ottenuti dai questionari e dallo studio dei parametri fisiologici seguissero una gaussiana.

Il test si basa sull'ipotesi nulla H_0 che il campione segua una distribuzione gaussiana. È stato scelto un livello di significatività del 5% e i possibili risultati del test sono i seguenti:

- Se $p_value \leq 0,05 \rightarrow$ si rifiuta l'ipotesi nulla \rightarrow i dati non sono distribuiti normalmente;
- Se $p_value > 0,05 \rightarrow$ non si può rifiutare l'ipotesi nulla \rightarrow i dati sono distribuiti normalmente.

I test effettuati sugli indicatori oggettivi e soggettivi indicano una non normalità degli indicatori ($p \leq 0,05$), suggerendo l'utilizzo di test non parametrici per le analisi successive.

TEST DI WILCOXON

Il test di Wilcoxon è un test statistico non parametrico utilizzato per valutare se esiste una differenza statisticamente significativa tra le mediane di due serie di dati. È stato condotto assegnando un livello di significatività del 5% e l'ipotesi nulla H_0 stabilisce che le differenze tra due campioni non sono statisticamente significative. Dunque:

- Se $p_value \leq 0,05 \rightarrow$ si rifiuta l'ipotesi nulla \rightarrow le differenze sono statisticamente significative;

- Se $p_value > 0,05 \rightarrow$ non si può rifiutare l'ipotesi nulla \rightarrow le differenze non sono statisticamente significative.

TEST DI SPEARMAN

Il test di Spearman è un test statistico non parametrico che valuta il grado di relazione tra due variabili. È stato condotto assegnando un livello di significatività del 5% e l'ipotesi nulla H_0 stabilisce che non c'è correlazione monotona significativa nella popolazione. Dunque:

- Se $p_value \leq 0,05 \rightarrow$ si rifiuta l'ipotesi nulla \rightarrow le due variabili sono significativamente correlate;
- Se $p_value > 0,05 \rightarrow$ non si può rifiutare l'ipotesi nulla \rightarrow le due variabili non sono significativamente correlate.

Il coefficiente ottenuto dal test di correlazione valuta la forza e la direzione della relazione monotona delle due variabili:

- Un valore di coefficiente di correlazione $r > 0$ indica una correlazione positiva tra le variabili, quindi all'aumentare di una variabile l'altra tende ad aumentare;
- Un valore di coefficiente di correlazione $r < 0$ indica una correlazione negativa tra le variabili, quindi all'aumentare di una variabile l'altra tende a diminuire;
- Un valore di coefficiente di correlazione $r = 0$ indica un'assenza di correlazione tra le variabili.

CAPITOLO 3. RISULTATI

In questo capitolo vengono presentati i risultati dell'esperimento. In particolare, le misurazioni oggettive ricavate dall'analisi dei segnali fisiologici, e le misurazioni soggettive, quindi le risposte ottenute dai questionari.

3.1 MISURAZIONI OGGETTIVE

I risultati ottenuti dalle analisi dei segnali fisiologici vengono mostrati tramite dei box plot (o diagrammi a scatola), con lo scopo di mostrare per ogni indicatore la tendenza centrale (la mediana), la dispersione e l'eventuale presenza di outlier per ogni condizione sperimentale. I dati ottenuti per ogni soggetto vengono in seguito normalizzati rispetto alla baseline in modo da rendere il dato finale quanto più indipendente dal soggetto; questo permette di confrontare i risultati ottenuti. Sono riportate le principali statistiche descrittive

(media, mediana e deviazione standard) per ogni indicatore normalizzato nelle due condizioni Push e Pull.

3.1.1 ATTIVITA' CARDIACA

Sono riportati i risultati degli indicatori sull'attività cardiaca:

- **Risultati HR**

La Fig. 3.1 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore HR nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.1 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore HR normalizzato (Sacha, 2013).

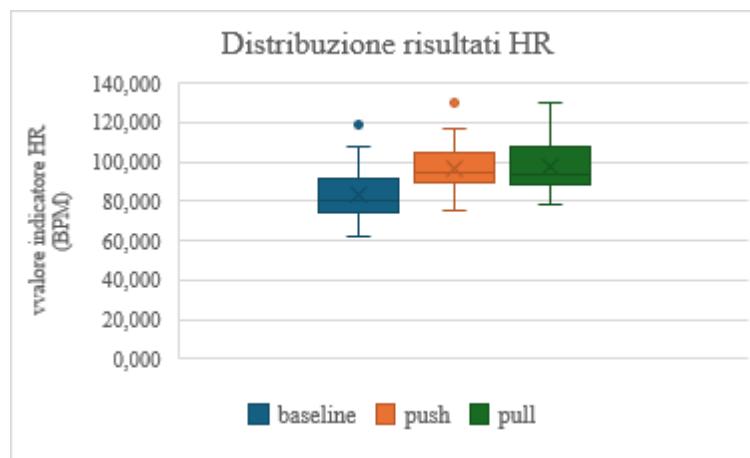


Fig 3.1- Distribuzione dei risultati per l'indicatore HR (misurato in BPM)

Tab 3.1 – Statistiche descrittive dell'indicatore HR, normalizzate rispetto alla baseline

	HR_Push	HR_Pull
Media	1,1507	1,1918
Mediana	1,1590	1,1696
Deviazione standard	0,2014	0,1138

I risultati mostrano una media dell'indicatore HR maggiore nella condizione Pull rispetto alla condizione Push.

Sono stati rilevati due valori anomali (outlier), il primo durante la Baseline mentre il secondo nella condizione Push.

L'indicatore HR ha mostrato una maggiore dispersione dei dati nella condizione Push, dato il valore della deviazione standard maggiore rispetto a quello ricavato nella condizione Pull.

- **Risultati SDNN**

La Fig. 3.2 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore SDNN nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.2 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore SDNN normalizzato (Sacha, 2013).

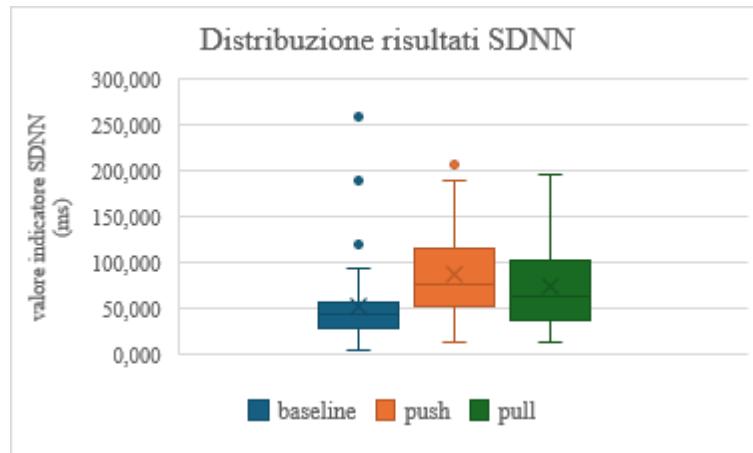


Fig 3.2-Distribuzione dei risultati per l'indicatore SDNN (misurato in ms)

Tab 3.2 – Statistiche descrittive dell'indicatore SDNN, normalizzate rispetto alla baseline

	SDNN_Push	SDNN_Pull
Media	2,1146	1,7867
Mediana	2,0056	1,3860
Deviazione standard	1,1160	1,1201

I risultati mostrano una media dell'indicatore SDNN maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Nelle condizioni Push e Pull è presente una maggiore distribuzione dei dati rispetto alla Baseline.

L'indicatore SDNN ha mostrato una dispersione dei dati simile tra la condizione Push e Pull, dati i valori della deviazione standard.

- **Risultati RMSSD**

La Fig. 3.3 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore RMSSD nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.3 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore RMSSD normalizzato (Sacha, 2013).

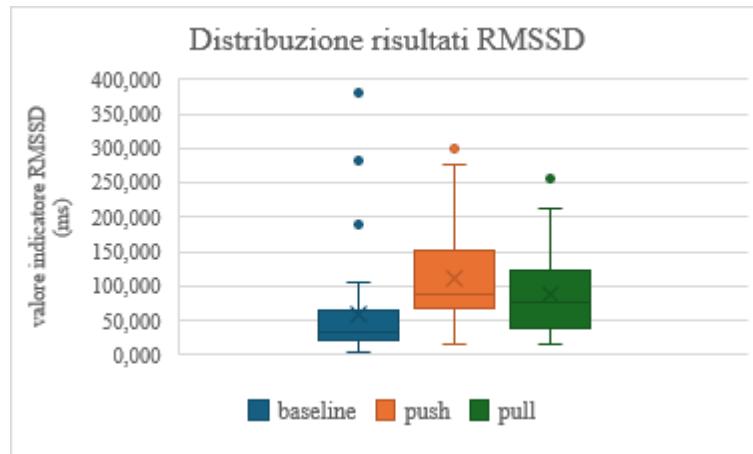


Fig 3.3- Distribuzione dei risultati per l'indicatore RMSSD (misurato in ms)

Tab 3.3 – Statistiche descrittive dell'indicatore RMSSD, normalizzate rispetto alla baseline

	RMSSD_Push	RMSSD_Pull
Media	3,3304	2,5765
Mediana	2,7652	1,7149
Deviazione standard	2,4734	2,2746

I risultati mostrano una media dell'indicatore RMSSD maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Sono presenti valori anomali sia durante la Baseline sia nelle due condizioni produttive.

L'indicatore RMSSD ha mostrato una dispersione dei dati elevata in entrambe le condizioni, con la deviazione standard nella condizione Push maggiore rispetto al Pull.

- **Risultati LF**

La Fig. 3.4 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore LF nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.4 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore LF normalizzato (Sacha, 2013).

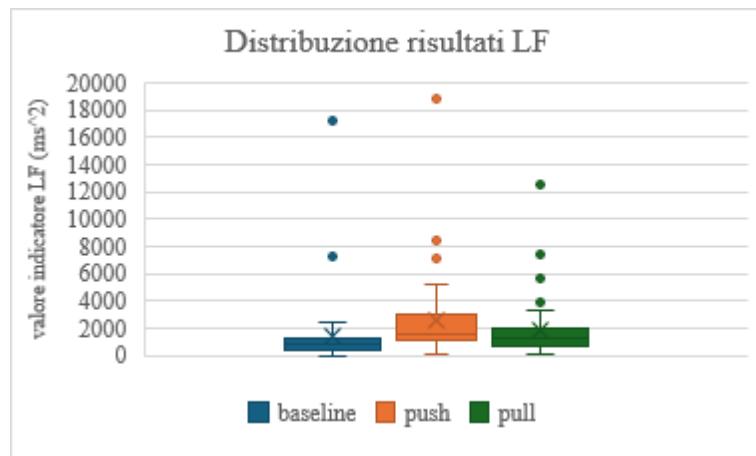


Fig 3.4- Distribuzione dei risultati per l'indicatore LF (misurato in ms^{-2})

Tab 3.4 – Statistiche descrittive dell'indicatore LF, normalizzate rispetto alla baseline

	LF_Push	LF_Pull
Media	3,5463	2,7190
Mediana	2,6348	1,5979
Deviazione standard	3,8101	3,3755

I risultati mostrano una media dell'indicatore LF maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Sono presenti valori anomali sia durante la Baseline sia nelle due condizioni produttive, in maggior numero nella condizione Pull.

L'indicatore LF ha mostrato una dispersione dei dati elevata in entrambe le condizioni, con la deviazione standard durante la condizione Push maggiore rispetto al Pull.

- **Risultati HF**

La Fig. 3.5 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore HF nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.5 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore HF normalizzato (Sacha, 2013).

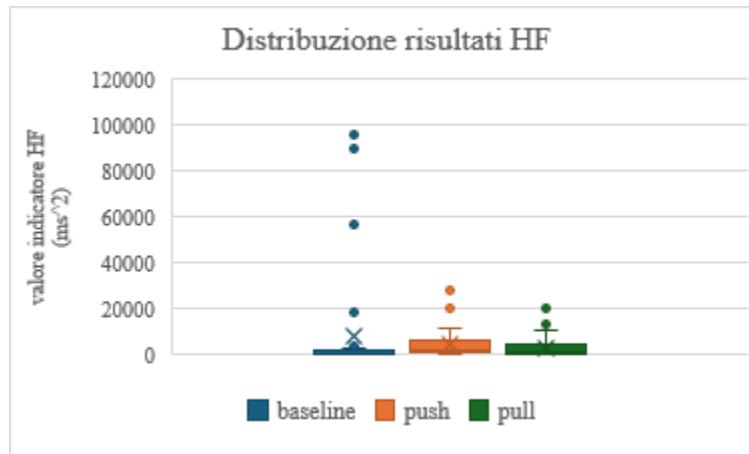


Fig 3.5- Distribuzione dei risultati per l'indicatore HF (misurato in ms^{-2})

Tab 3.5 – Statistiche descrittive dell'indicatore HF, normalizzate rispetto alla baseline

	HF_Push	HF_Pull
Media	7,9874	6,2137
Mediana	3,7158	1,6331
Deviazione standard	11,2136	15,8340

I risultati mostrano una media dell'indicatore HF maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Sono presenti valori anomali sia durante la Baseline (in maggior numero) sia nelle due condizioni produttive.

L'indicatore HF ha mostrato una dispersione dei dati molto elevata in entrambe le condizioni dati i valori della deviazione standard.

- **Risultati LF/HF**

La Fig. 3.6 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore LF/HF nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.6 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore LF/HF normalizzato (Sacha, 2013).

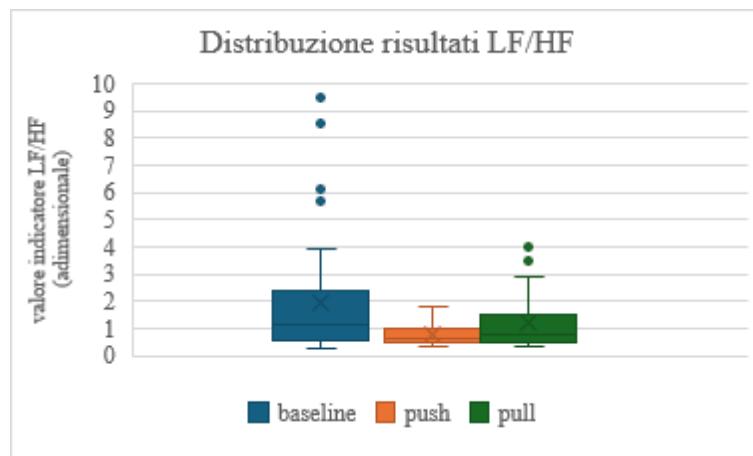


Fig 3.6- Distribuzione dei risultati per l'indicatore LF/HF (misura adimensionale)

Tab 3.6 – Statistiche descrittive dell'indicatore LF/HF, normalizzate rispetto alla baseline

	LF/HF_Push	LF/HF_Pull
Media	0,8348	1,0625
Mediana	0,6482	0,8583
Deviazione standard	0,7638	0,8216

I risultati mostrano una media dell'indicatore LF/HF maggiore nella condizione Pull rispetto alla condizione Push.

Sono presenti valori anomali principalmente durante la Baseline.

L'indicatore LF/HF ha mostrato una dispersione dei dati contenuta in entrambe le condizioni, con valori leggermente più elevati nella condizione Pull, data la deviazione standard maggiore rispetto al Push.

3.1.2 ATTIVITA' RESPIRATORIA

Vengono riportati i risultati sull'attività respiratoria:

- **Risultati RR**

La Fig. 3.7 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore RR nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.7 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore RR normalizzato (Kempfle, et al., 2021).

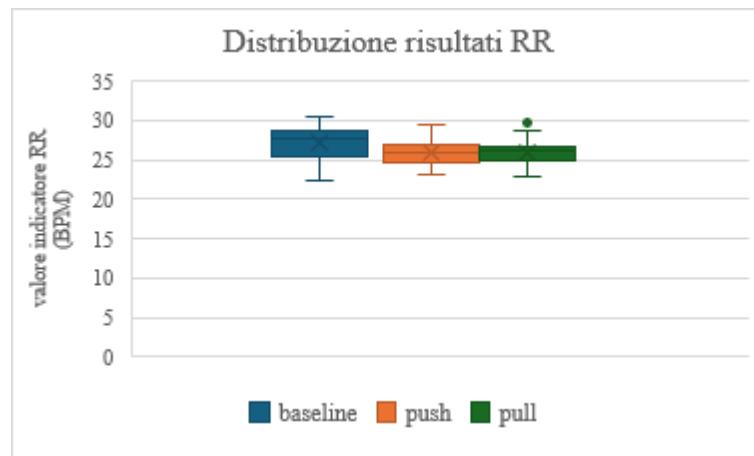


Fig 3.7-Distribuzione dei risultati per l'indicatore RR (misurato in BPM)

Tab 3.7- Risultati dell'indicatore RR, normalizzate rispetto alla baseline

	RR_Push	RR_Pull
Media	0,9630	0,9611
Mediana	0,9581	0,9416
Deviazione standard	0,1014	0,0965

I risultati mostrano una media dell'indicatore RR maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Nella condizione Pull è presente un valore classificabile come anomalo.

L'indicatore RR ha mostrato una dispersione dei dati contenuta in entrambe le condizioni.

- **Risultati Ampiezza toracica:**

La Fig. 3.8 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore Ampiezza toracica nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.8 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore Ampiezza toracica normalizzato (Kempfle et al., 2021).

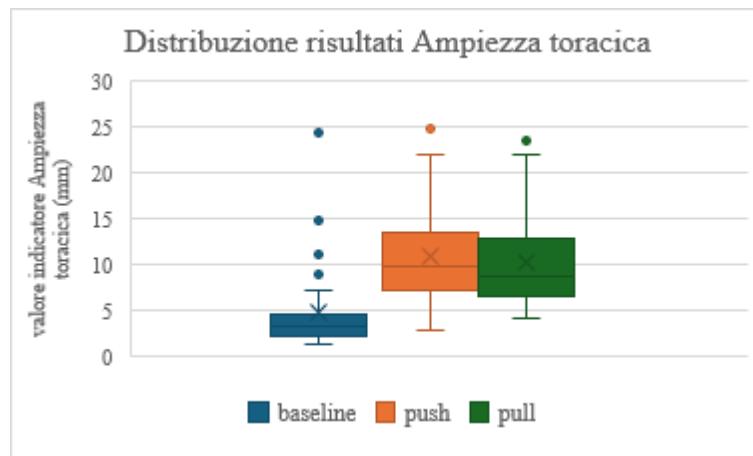


Fig 3.8- Distribuzione dei risultati per l'indicatore Ampiezza toracica (misurato in mm)

Tab 3.8- Risultati dell'indicatore Ampiezza toracica, normalizzate rispetto alla baseline

	Aampiezza_Push	Aampiezza_Pull
Media	3,2984	2,9908
Mediana	3,1825	2,7121
Deviazione standard	1,7941	1,5997

I risultati mostrano una media dell'indicatore Ampiezza toracica maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Sono presenti valori anomali principalmente durante la Baseline.

L'indicatore Ampiezza toracica ha mostrato una dispersione dei dati elevata in entrambe le condizioni, in misura superiore nella condizione Push, data la deviazione standard maggiore rispetto al Pull.

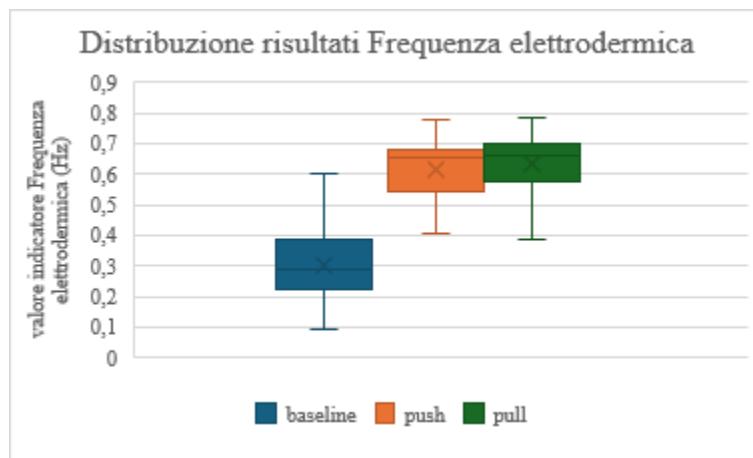
3.1.3 ATTIVITA' ELETTRODERMICA

Vengono riportati i risultati sull'attività elettrodermica:

- **Risultati Frequenza elettrodermica**

La Fig. 3.9 mostra la distribuzione dei risultati della Frequenza elettrodermica, estratta dalla componente fasica del segnale, nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.9 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore Frequenza elettrodermica (Subramanian et al., 2020).

Fig 3.9- Distribuzione dei risultati della Frequenza elettrodermica, estratta dalla componente fasica del segnale (misurato in Hz)



Tab. 3.9- Risultati della Frequenza elettrodermica, estratta dalla componente fasica del segnale, normalizzate rispetto alla baseline

	Aampiezza_Push	Aampiezza_Pull
Media	0,6109	0,6205
Mediana	0,6317	0,6424
Deviazione standard	0,2697	0,2926

I risultati mostrano una media dell'indicatore Frequenza elettrodermica maggiore nella condizione Pull rispetto alla condizione Push.

Non sono presenti valori anomali.

L'indicatore Frequenza elettrodermica ha mostrato una dispersione dei dati contenuta per entrambe le condizioni, date le deviazioni standard simili.

- **Risultati Ampiezza elettrodermica**

La Fig. 3.10 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore Ampiezza elettrodermica, estratta dalla componente fasica del segnale, nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.10 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore Ampiezza elettrodermica normalizzato (Subramanian et al., 2020).

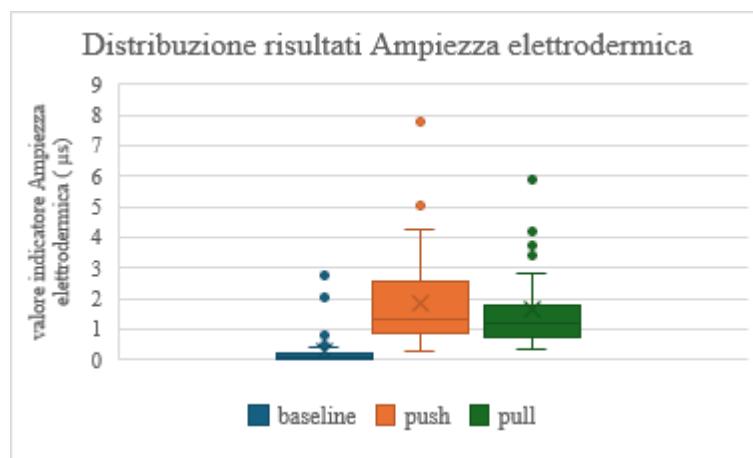


Fig 3.10- Distribuzione risultati dell' Ampiezza elettrodermica, estratta dalla componente fasica del segnale (misurato in μs)

Tab. 3.10- Risultati dell' Ampiezza elettrodermica, estratta dalla componente fasica del segnale, normalizzati rispetto alla baseline

	Aampiezza_Push	Aampiezza_Pull
Media	2,2733	2,1989
Mediana	2,4975	2,3618
Deviazione standard	1,3655	1,3585

I risultati mostrano una media dell'indicatore Ampiezza elettrodermica maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Sono presenti valori anomali, in particolare nella Baseline e nella condizione Pull.

Dati i valori delle deviazioni standard, l'indicatore Ampiezza elettrodermica ha mostrato una dispersione dei dati simili per entrambe le condizioni.

3.1.4 ATTIVITA' PUPILLOMETRICA

Vengono riportati i risultati sull'attività pupillometrica:

- **Risultati diametro della pupilla**

La Fig. 3.11 mostra la distribuzione dei risultati per l'indicatore Diametro della pupilla nelle varie condizioni produttive, mentre nella Tab. 3.11 sono riportate le principali statistiche descrittive dell'indicatore Diametro della pupilla normalizzato. La Tab. 3.12 riporta la deviazione standard ottenuta dal metodo di normalizzazione z-score (Gervasi et al., 2024) per entrambe le condizioni produttive.

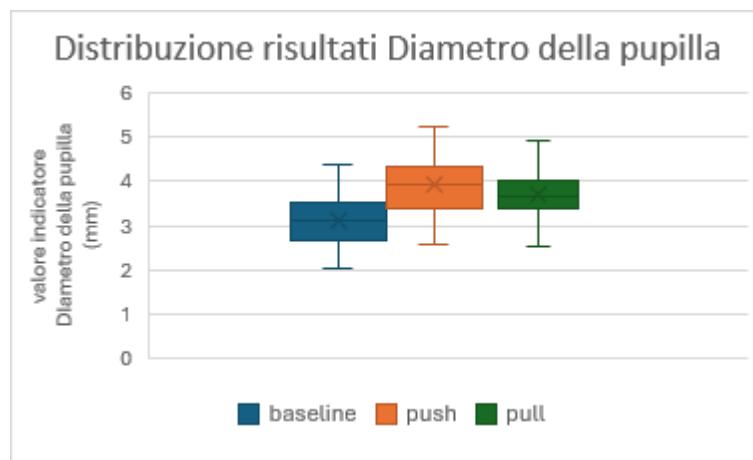


Fig 3.11- Distribuzione dei risultati per l'indicatore diametro della pupilla (misurato in mm)

Tab. 3.11- Risultati dell'indicatore Diametro della pupilla, normalizzati rispetto alla baseline

	Diametro_Push	Diametro_Pull
Media	3,9919	2,8758
Mediana	2,6025	2,0392
Deviazione standard	4,6405	3,3321

Tab. 3.12- Media della deviazione standard degli z score dell'indicatore Diametro della pupilla

	Deviazione Standard Z_score_Push	Deviazione Standard Z_score_Pull
Media	2,0186	1,4376

I risultati mostrano una media dell'indicatore Diametro della pupilla maggiore nella condizione Push rispetto alla condizione Pull.

Non vi sono valori anomali nelle distribuzioni dei dati.

L'indicatore Diametro della pupilla ha mostrato una dispersione dei dati contenuta elevata in entrambe le condizioni. In particolare, la condizione Push presenta una deviazione standard maggiore rispetto al Pull.

3.2 MISURAZIONI SOGGETTIVE

In questa sezione sono analizzate le misurazioni soggettive, ovvero le risposte ai vari questionari somministrati nelle diverse fasi dell'esperimento.

3.2.1 PSS-10

Sono riportati i risultati del questionario PSS-10, formato da 10 domande con un range di risposta da 0 (mai) a 4 (molto spesso), per indicare il livello basale di stress con il quale il partecipante si presta allo svolgimento dell'esperimento. Nella fig. 3.12 sono riportate sull'asse delle ascisse le domande del questionario, mentre sull'asse delle ordinate la media delle risposte per ogni domanda. Come si evince dal grafico la maggioranza delle risposte si concentra intorno al valore 2, suggerendo come i partecipanti hanno approcciato all'esperimento con una percezione dello stress intermedia.

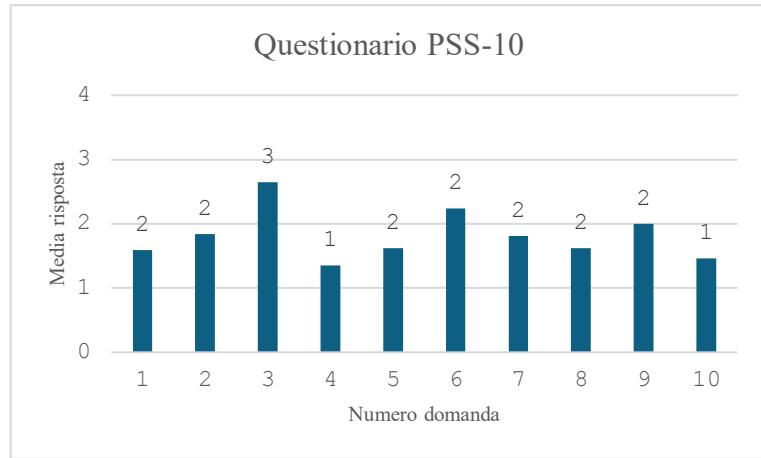


Fig 3.12 – Risposte al questionario PSS-10

3.2.2 RAW NASA-TLX

I risultati del RAW NASA-TLX mostrano i livelli di carico di lavoro che i soggetti hanno percepito dopo lo svolgimento dei task in ciascuna condizione sperimentale. La Fig. 3.13 mostra un box-plot delle risposte a tutte le differenti domande sottoposte dopo la condizione Push, con relative statistiche descrittive nella Tab. 3.13, mentre la Fig. 3.14 si concentra sulle risposte dopo la condizione Pull, e le relative statistiche descrittive nella Tab. 3.14.

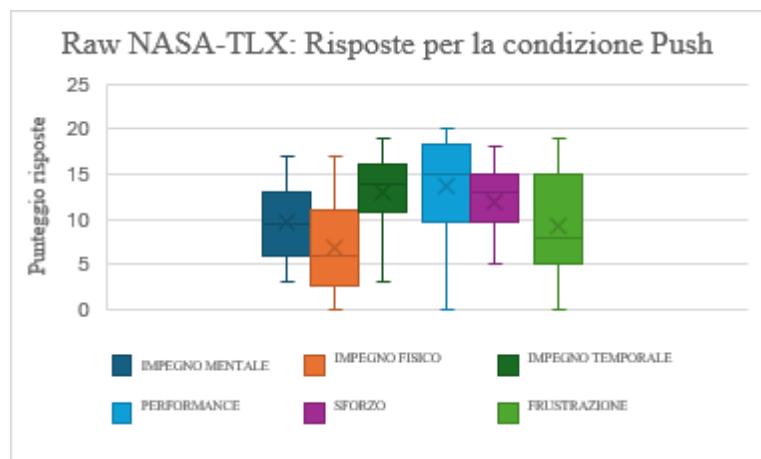


Fig. 3.13 – Box-plot delle risposte al questionario RAW NASA-TLX nella condizione Push

Tab. 3.13 – Statistiche descrittive delle risposte al questionario RAW NASA-TLX nella condizione Push

NASA_PUSH	Impegno mentale	Impegno fisico	Impegno temporale	performance	sforzo	frustrazione
Media	9,68	6,76	13,00	13,61	12,03	9,37
Mediana	9,50	6,00	14,00	15,00	13,00	8,00
Deviazione Standard	3,90	4,85	4,13	5,77	3,37	5,41

La condizione Push ha mostrato un livello di sforzo e impegno temporale medio, mentre l'autovalutazione della performance è stata giudicata positivamente. Relativamente alla dimensione Frustrazione, i risultati indicano una mancanza di omogeneità a causa dell'elevata deviazione standard.

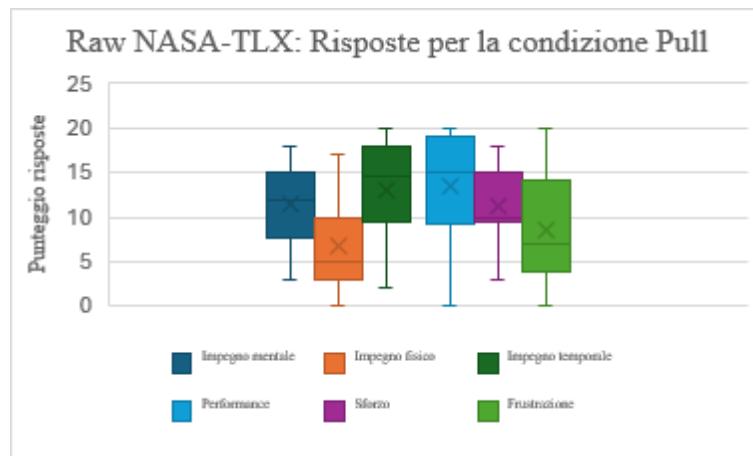


Fig. 3.14 – Box-plot delle risposte al questionario RAW NASA-TLX nella condizione Pull

Tab. 3.14 – Statistiche descrittive delle risposte al questionario RAW NASA-TLX nella condizione Pull

NASA_PUSH	Impegno mentale	Impegno fisico	Impegno temporale	performance	sforzo	frustrazione
Media	11,50	6,66	13,13	13,45	11,21	8,50
Mediana	12,00	5,00	14,50	15,00	10,00	7,00
Deviazione Standard	4,46	4,60	5,12	5,94	4,03	6,19

La condizione Pull ha mostrato un livello di impegno temporale e mentale medio, mentre l'autovalutazione della Performance è stata giudicata positivamente. Relativamente alla dimensione Frustrazione, i risultati indicano una mancanza di omogeneità a causa dell'elevata deviazione standard.

3.2.3 VEDAS

La sintesi dei dati del VEDAS è stata effettuata contando quanti partecipanti hanno percepito ognuna delle varie valenze di stress. Sono riportate nella Fig. 3.15 e nella Fig. 3.16 rispettivamente il conteggio dei partecipanti nella condizione Push e nella condizione Pull. Nella condizione Push c'è una prevalenza di partecipanti che hanno provato la condizione distress, mentre nel Pull diminuiscono ma aumentano invece i partecipanti che hanno provato coesistenza tra eustress e distress.

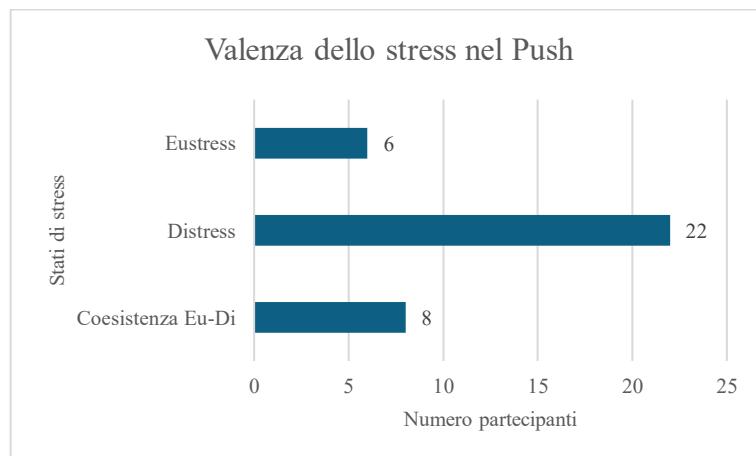


Fig. 3.15 – Condizioni di stress percepite nella condizione Push tramite questionario Vedas

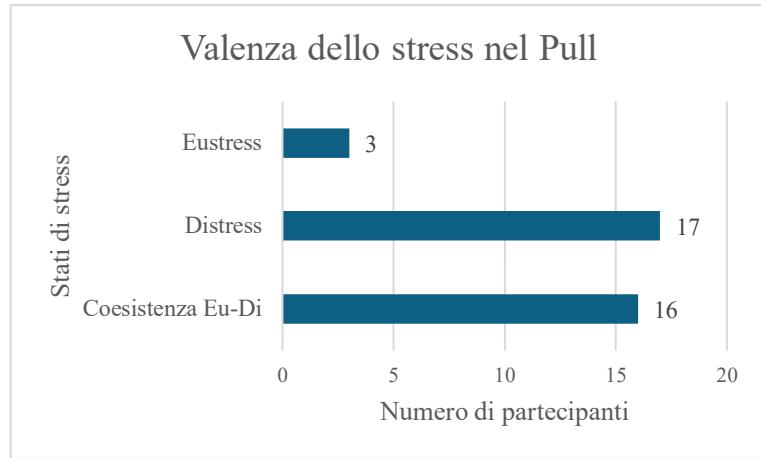


Fig 3.16 – Condizioni di stress percepite nella condizione Pull tramite questionario Vedas

3.2.4 ANALISI DELLA PERFORMANCE

Il livello di Performance per entrambe le condizioni produttive è stato determinato calcolando la media aritmetica della percentuale di completamento del compito richiesto registrata per l'intero campione di soggetti.

La figura 3.17 presenta la distribuzione della quantità di modellini completati nella condizione Push. I risultati mostrano come 11 partecipanti su 37 hanno prodotto più di sette modellini, determinando sovrapproduzione.

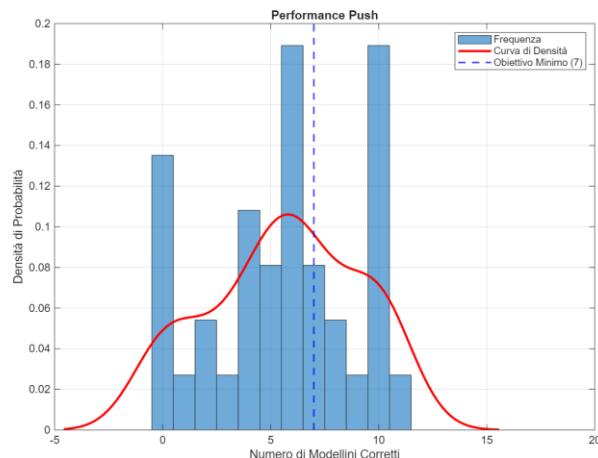


Fig. 3.17 – Performance nella condizione sperimentale Push

La figura 3.18 mostra la frequenza con cui i soggetti hanno ottenuto ogni punteggio nella condizione Pull, dove il massimo possibile era cinque modellini corretti. In particolare, si

osserva che nove partecipanti hanno completato cinque modellini corretti e solo due soggetti non hanno completato alcun modellino.

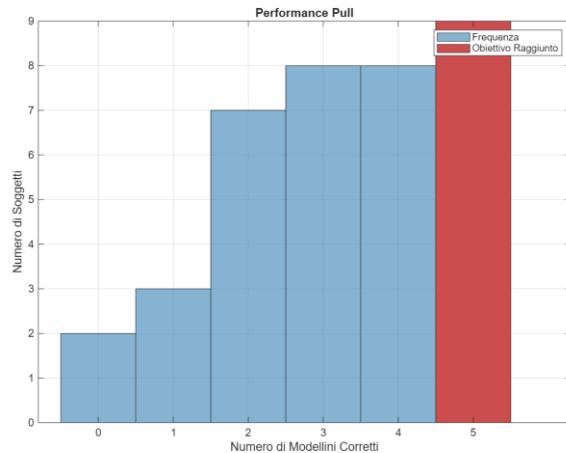


Fig. 3.18 – Performance nella condizione sperimentale Pull

CAPITOLO 4. DISCUSSIONI

Questo capitolo intende confrontare i risultati oggettivi e soggettivi ottenuti, al fine di rispondere alle research question, quindi confrontare i livelli di stress tra Push e Pull e analizzare la presenza di eustress, distress o coesistenza tra eustress e distress.

4.1 CONFRONTO DEI LIVELLI DI STRESS TRA PUSH E PULL

Di seguito la tabella 4.1 mostra i risultati del test di Wilcoxon su ogni indicatore fisiologico analizzato, per verificare se è statisticamente visibile una differenza nei livelli di stress tra la condizione produttiva Push e quella Pull. Si può notare come gli indicatori privi di differenze statistiche significative ($p>0,05$) sono l'HR per l'attività cardiaca, il tasso di respirazione RR per l'attività respiratoria e la componente fasica dell'attività elettrodermica.

Tab. 4.1 – Risultati del Test di Wilcoxon per gli indicatori fisiologici. L’asterisco segnala una differenza statisticamente significativa (Wilcoxon, $p \leq 0,05$)

Segnale	Indicatore	p_value	Interpretazione
Attività cardiaca	HR	0,3882	Non statisticamente differente
	SDNN*	0,0011	Statisticamente differente
	RMSSD*	0,0001	Statisticamente differente
	LF*	0,0100	Statisticamente differente
	HF*	0,0005	Statisticamente differente
	LF/HF*	0,0129	Statisticamente differente
Attività respiratoria	RR	0,6271	Non statisticamente differente
	AMPIEZZA*	0,0192	Statisticamente differente
Attività elettrodermica	FREQUENZA FASICA*	0,0494	Statisticamente differente
	AMPIEZZA FASICA	0,2315	Non statisticamente differente
Attività pupillometrica	DIAMETRO PUPILLA*	0,0001	Statisticamente differente

Vengono analizzate in seguito le medie per gli indicatori le cui differenze sono risultate statisticamente significative.

- **ECG: Media SDNN normalizzata**

In condizioni maggiormente stressanti lo studio di Immanuel et al. (2023) mostra come il valore dell’SDNN tende a decrescere. Il grafico sottostante (Fig. 4.1) mostra come per l’indicatore SDNN normalizzato il valore medio Push è maggiore di quello Pull. Queste considerazioni suggeriscono come la condizione Pull sia più stressante di quella Push per l’indicatore SDNN normalizzato.

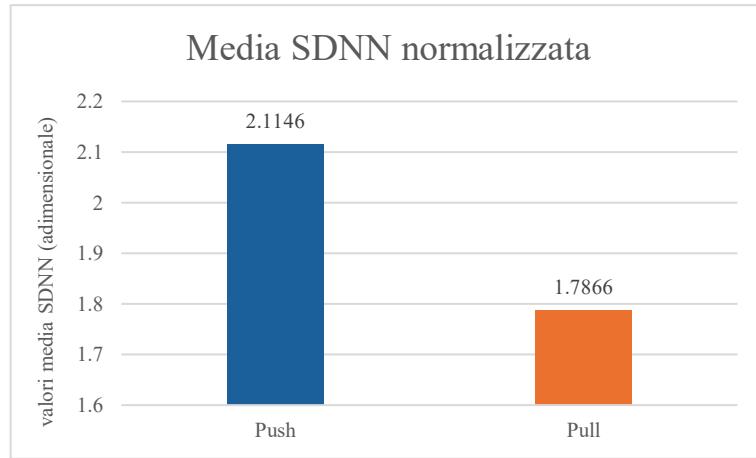


Fig. 4.1 – Confronto tra Push e Pull per l’indicatore SDNN

- **ECG: Media RMSSD normalizzata**

In condizioni maggiormente stressanti lo studio di Immanuel et al. (2023) mostra come il valore dell’RMSSD tende a decrescere. Il grafico sottostante (Fig. 4.2) mostra come per l’indicatore RMSSD normalizzato il valore medio Push è maggiore di quello Pull. Queste considerazioni suggeriscono come la condizione Pull sia più stressante di quella Push per l’indicatore RMSSD normalizzato.

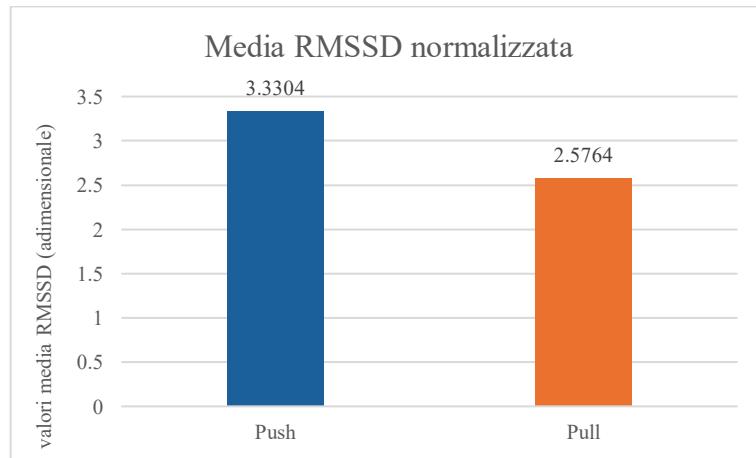


Fig. 4.2 – Confronto tra Push e Pull per l’indicatore RMSSD

- **ECG: Media LF/HF normalizzata**

In condizioni maggiormente stressanti lo studio di Jarvelin-Pasanen et al. (2018) mostra come il valore di LF/HF tende a crescere. Il grafico sottostante (Fig. 4.3) mostra come per l’indicatore LF/HF normalizzato il valore medio Pull è maggiore di quello Push. Queste

considerazioni suggeriscono come la condizione Pull sia più stressante di quella Push per l'indicatore LF/HF normalizzato.

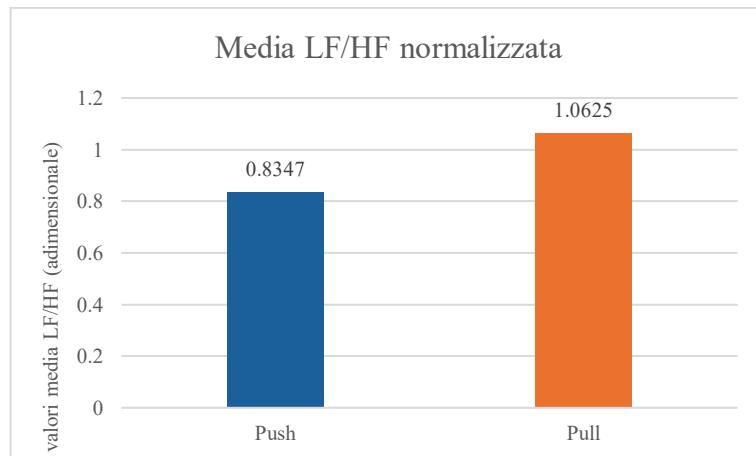


Fig. 4.3 – Confronto tra Push e Pull per l'indicatore LF/HF

- **RESPIRAZIONE: Media Ampiezza normalizzata**

In condizioni maggiormente stressanti lo studio di Hernando et al. (2015) mostra come il valore di ampiezza toracica tende a decrescere. Il grafico sottostante (Fig. 4.4) mostra come per l'indicatore Ampiezza normalizzato il valore medio Push è maggiore di quello Pull. Queste considerazioni suggeriscono come la condizione Pull sia più stressante di quella Push per l'indicatore ampiezza normalizzato.

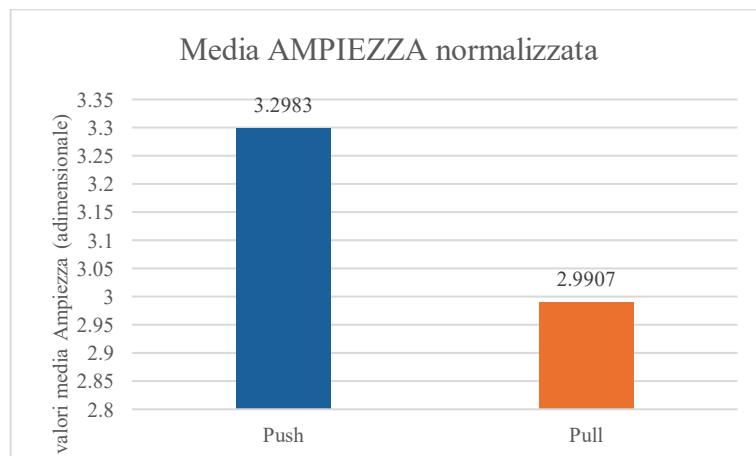


Fig. 4.4 – Confronto tra Push e Pull per l'indicatore ampiezza

- **EDA: Media Frequenza normalizzata**

In condizioni maggiormente stressanti lo studio di Meijer et al. (2023) mostra come il valore della frequenza tende a crescere. Il grafico sottostante (Fig. 4.5) mostra come per l'indicatore Frequenza normalizzata il valore medio Pull è maggiore di quello Push. Queste considerazioni suggeriscono come la condizione Pull sia più stressante di quella Push per l'indicatore frequenza normalizzata.

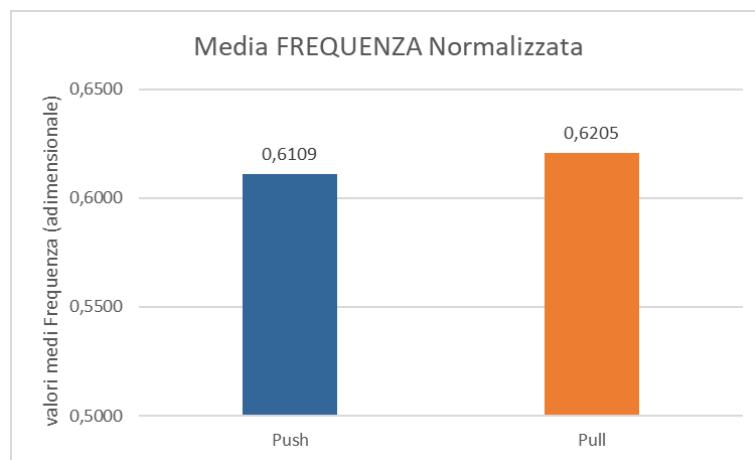


Fig. 4.5 – Confronto tra Push e Pull per l'indicatore frequenza

- **ATTIVITA' PUPILLOMETRICA: Media del Diametro della pupilla normalizzato**

In condizioni maggiormente stressanti lo studio di Ferreira et al. (2024) mostra come il valore del diametro della pupilla tende a crescere. Il grafico sottostante (Fig. 4.6) mostra come per l'indicatore Diametro della pupilla normalizzato il valore medio Push è maggiore di quello Pull. Queste considerazioni suggeriscono come la condizione Push sia più stressante di quella Pull per l'indicatore Diametro della pupilla normalizzato.

A queste considerazioni si aggiunge l'analisi della deviazione standard dei singoli z-score. Il fatto che la deviazione standard sia maggiore nella condizione Push rispetto a Pull indica che la risposta fisiologica è stata meno omogenea e più variabile. Questo suggerisce che il carico cognitivo non è stato mantenuto costante per tutta la durata del task, coerentemente con la struttura del compito, con uno sforzo maggiore all'inizio dovuto alla mancanza di istruzioni e un successivo apprendimento.

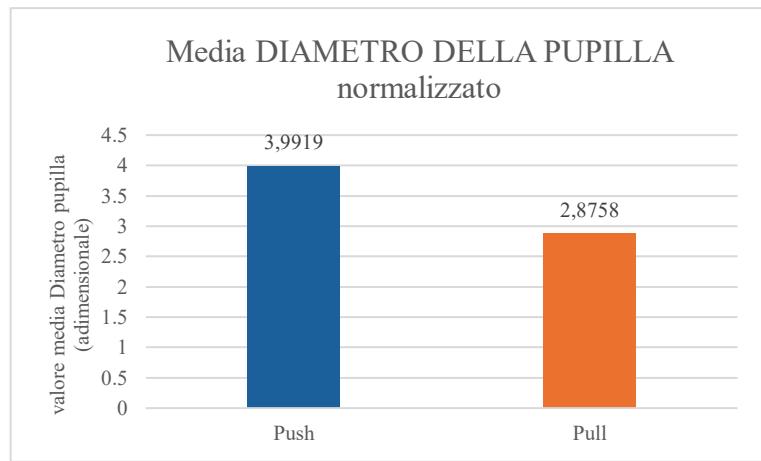


Fig. 4.6 – Confronto tra Push e Pull per l’indicatore diametro della pupilla

ANALISI DELLA PERFORMANCE

Per rispondere alla prima research question è utile analizzare i livelli di performance ottenuti dai partecipanti. I dati mostrano come il livello medio di performance nel Push (80%) è maggiore rispetto alla media del Pull (64%), e questa differenza è statisticamente significativa per il Test di Wilcoxon ($p=0,0038$).

4.2 ANALISI DI EUSTRESS, DISTRESS E COESISTENZA EUSTRESS-DISTRESS

La seconda research question è quella di ricavare delle considerazioni sulla presenza di eustress, distress o coesistenza tra eustress e distress. Gli unici strumenti a nostra disposizione per verificare ciò sono le risposte al questionario VEDAS, che tramite la combinazione dei valori inseriti da ogni partecipante indica la valenza dello stress percepito dai soggetti in questione. Lo studio di Vikoler et al. (2024) propone di unire la noia all’eustress, in quanto la noia in una condizione sperimentale breve non è altro che un continuo della condizione di eustress. Nel seguente studio non sono emerse differenze statisticamente significative tra i due indicatori (Test di Wilcoxon, $p > 0,05$), dunque è stato deciso di unirli nell’unico indicatore chiamato eustress.

Sono stati effettuati dei test di correlazione di Spearman tra le combinazioni possibili derivanti dal questionario VEDAS e i vari segnali fisiologici. In particolare, sono proposte delle tabelle che analizzano la correlazione tra la distribuzione delle varie risposte e i vari segnali fisiologici: sono calcolati il coefficiente di Spearman r e il p_value per indicare se è statisticamente significativa la correlazione.

Confronto tra segnali fisiologici nelle due condizioni produttive con la risposta “Eustress”:

La Tab. 4.2 evidenzia come nessuna correlazione è statisticamente significativa tra tutti gli indicatori e la distribuzione delle risposte “Eustress”.

Tab 4.2 - Confronto tra segnali fisiologici nelle due condizioni produttive con la risposta “Eustress”

Segnale	Indicatore	r_Push	p_Push	r_Pull	p_Pull
Attività cardiaca	HR	0,1579	0,3505	0,0278	0,8702
	SDNN	0,0343	0,8401	-0,0185	0,9132
	RMSSD	0,0824	0,6278	0,0000	1,0000
	LF	-0,0755	0,6568	-0,0185	0,9132
	HF	0,0069	0,9678	0,0185	0,9132
	LF/HF	-0,1579	0,3505	-0,0185	0,9132
Attività respiratoria	RR	0,0206	0,9037	0,1206	0,4772
	Aampiezza	-0,0824	0,6278	-0,0278	0,8702
Attività elettrodermica	Frequenza	-0,2266	0,1774	-0,0556	0,7436
	Fasica				
Attività pupillometrica	Aampiezza	0,2472	0,1402	0,2040	0,2258
	Fasica				
Attività pupillometrica	Diametro	-0,1648	0,3296	-0,0927	0,5851
	pupilla				

Confronto tra segnali fisiologici nelle due condizioni produttive con la risposta “Distress”:

La Tab. 4.3 evidenzia come nessuna correlazione è statisticamente significativa tra tutti gli indicatori e la distribuzione delle risposte “Distress”

Tab 4.3 - Confronto tra segnali fisiologici nelle due condizioni produttive con la risposta “Distress”

Segnale	Indicatore	r_Push	p_Push	r_Pull	p_Pull
Attività cardiaca	HR	-0,3093	0,0625	-0,1270	0,4539
	SDNN	-0,0928	0,5849	0,0914	0,5905
	RMSSD	-0,1134	0,5039	0,0965	0,5699
	LF	-0,0619	0,7160	-0,0254	0,8814
	HF	-0,1289	0,4471	0,0863	0,6113
	LF/HF	0,2165	0,1980	-0,1778	0,2925
Attività respiratoria	RR	0,1031	0,5436	0,3200	0,0535
	Aampiezza	0,2114	0,2091	0,1981	0,2399
Attività elettrodermica	Frequenza	0,0155	0,9276	-0,2032	0,2278
	Fasica				
	Aampiezza	-0,1856	0,2714	0,0914	0,5905
	Fasica				
Attività pupillometrica	Diametro pupilla	0,2939	0,0775	0,1625	0,3365

Confronto tra segnali fisiologici nelle due condizioni produttive con la risposta “Coesistenza Eustress-Distress”:

La Tab. 4.4 evidenzia come l'unica correlazione statisticamente significativa ($p_value=0,0183$) è con l'indicatore Frequenza dell'Attività elettrodermica nella condizione Pull; il valore del coefficiente di Spearman negativo ($r=-0,3860$) suggerisce una correlazione negativa tra le due variabili; dunque, la presenza più frequente della risposta “Coesistenza Eustress-Distress” è associata ad un valore sempre minore dell'indicatore Frequenza dell'Attività elettrodermica.

Tab 4.4 - Confronto tra segnali fisiologici nelle due condizioni produttive con la risposta “Coesistenza Eustress-Distress”. L’asterisco segnala che le due variabili sono statisticamente correlate (Spearman, $p \leq 0,05$)

Segnale	Indicatore	r_Push	p_Push	r_Pull	p_Pull
Attività cardiaca	HR	0,2183	0,1943	0,1117	0,5102
	SDNN	0,0767	0,6518	-0,0813	0,6325
	RMSSD	0,0590	0,7287	-0,0965	0,5699
	LF	0,1357	0,4232	0,0356	0,8345
	HF	0,1416	0,4032	-0,0965	0,5699
	LF/HF	-0,1121	0,5089	0,1879	0,2653
Attività respiratoria	RR*	-0,1357	0,4232	-0,3860	0,0183
	Aampiezza	-0,1711	0,3113	-0,1829	0,2787
Attività elettrodermica	Frequenza Fasica	0,1770	0,2946	0,2337	0,1640
	Aampiezza Fasica	0,0000	1,0000	-0,2032	0,2278
Attività pupillometrica	Diametro pupilla	-0,1947	0,2482	-0,1117	0,5102

4.3 ANALISI DEI FATTORI CHE HANNO INFLUENZATO LO STRESS E I RISULTATI

In questo paragrafo sono analizzati i fattori che hanno influenzato lo stress e i risultati ottenuti. In particolare, verranno evidenziati, ove presenti, i valori ottenuti dai vari test statistici degni di analisi e interpretazioni ulteriori, oltre che l’influenza data dalla struttura sperimentale, che ha condizionato alcuni risultati.

Segue quindi un elenco di indicatori o segnali degni di ulteriori analisi con relativa discussione.

- **ECG: HR**

I valori della deviazione standard dell'HR (0,2014 per la condizione Push, 0,1138 per la condizione Pull) non suggeriscono un'elevata variabilità all'interno del campione, portando ad escludere questa come causa principale della non significatività nella differenza tra le due condizioni produttive (Test di Wilcoxon, p=0,3882).

Sono state condotte ulteriori ricerche per comprendere i motivi della non significatività dei dati dell'HR.

Vi sono delle differenze tra l'indicatore HR con gli altri indicatori analizzati nel segnale ECG. Infatti, gli indicatori SDNN, RMSSD, LF, HF e LF/HF rientrano in una categoria denominata HRV (Heart Rate Variability), che analizza anche le piccole variazioni del segnale, nell'ordine dei millisecondi, a differenza dell'HR che considera come range temporale il minuto (Sacha, 2014). Dunque, si può ipotizzare come gli indicatori della categoria HRV siano più indicativi e precisi rispetto alla frequenza cardiaca HR.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione riguarda il modo in cui il segnale è stato registrato nel corso dell'esperimento. La baseline e la pausa tra le due condizioni prevedeva che il soggetto fosse in posizione seduta, a differenza dei momenti in cui il partecipante ha dovuto svolgere i task, che richiedeva una posizione eretta. Questa variabilità può influenzare in maniera significativa i segnali (Supreet et al., 2016), rendendo il confronto tra i valori della baseline e i valori ricavati dalle due condizioni sperimentali non omogeneo.

- **RESPIRAZIONE: RR**

I valori della deviazione standard dell'RR (0,1014 per la condizione Push, 0,0965 per la condizione Pull) non suggeriscono un'elevata variabilità all'interno del campione, portando ad escludere questa come causa principale della non significatività nella differenza tra le due condizioni produttive (Test di Wilcoxon, p=0,6271).

Lo studio di Kempfle et al. (2021) evidenzia come il tasso di respirazione RR sia altamente influenzato dalla postura del corpo al momento della ricezione del segnale, dal momento che la fascia per rilevare gli indicatori dell'attività respiratoria, posizionata al livello del torace, è molto sensibile al movimento del soggetto e dalla posizione che esso assume. I dati ottenuti dal seguente studio dimostrano che il livello di accuratezza massimo dei valori ottenuti dal segnale in esame è dato quando il partecipante è in posizione seduta (circa il 92%), mentre crolla in maniera importante quando il soggetto è in posizione eretta (circa il

51%); questo aspetto suggerisce come i valori ottenuti siano altamente influenzati dal modo con cui il partecipante svolge la baseline (seduto) e i task (in piedi).

- **EDA: AMPIEZZA DELLA COMPONENTE FASICA**

I valori della deviazione standard della componente fasica dell'ampiezza elettrodermica (1,3655 per la condizione Push, 1,3585 per la condizione Pull) possono suggerire variabilità all'interno del campione. Sono presenti inoltre vari outlier, in particolare nella baseline e nella condizione Pull. Questa considerazione può dedurre in prima analisi come possa essere questa una causa della non significatività nella differenza tra le due condizioni produttive (Test di Wilcoxon, $p=0,2315$).

Inoltre, è stato condotto uno studio sull'eventuale incisione sui risultati dell'ordine di esecuzione delle due condizioni. Il Test di correlazione di Spearman ha suggerito come chi ha svolto prima la condizione Push ha restituito un'ampiezza galvanica superiore ($r= -0,3809$, $p_value=0,0200$) rispetto a chi ha svolto il task Push per secondo, mentre chi ha svolto la condizione Pull come secondo task ha restituito un'ampiezza galvanica superiore ($r= 0,3708$, $p_value=0,0239$) rispetto a chi l'ha svolta come prima.

Una possibile interpretazione di questo fenomeno è che dopo aver completato il task sulla condizione mediamente più stressante, il livello di ampiezza cutaneo è rimasto elevato, "trascinandolo" anche alla condizione successiva. Inoltre, suggerisce che quando si svolge un'attività stressante per prima, il tempo di riposo tra le due attività non è sufficiente per tornare ai livelli basali dell'ampiezza elettrodermica. Valutando l'EDA in funzione del tempo l'analisi mostra un effetto somma, come mostrato anche dallo studio di Mingardi et al. (2020).

- **ATTIVITA' PUPILLOMETRICA: Diametro della pupilla**

I valori della deviazione standard del Diametro della pupilla (4,6405 per la condizione Push, 3,3321 per la condizione Pull) possono suggerire variabilità all'interno del campione.

Nonostante il test di Wilcoxon dimostri come la differenza tra Push e Pull sia statisticamente significativa ($p=0,0001$), vi sono delle considerazioni ulteriori da fare su questo indicatore. L'esperimento prevedeva che la condizione Pull fosse composta da 5 task consecutivi, ognuno da 2 minuti e 34 secondi, mentre la condizione Push composta da un unico task della durata di 12 minuti e 50 secondi. Il passaggio da un task all'altro nella condizione Pull

ha richiesto dei tempi di setup nell'ordine di un minuto circa, impedendo che fossero effettivamente consecutivi e senza interruzioni. A causa di ciò il partecipante era soggetto a dei momenti di pausa all'interno dello svolgimento dell'esperimento per la condizione Pull. Nonostante non siano stati inclusi i dati del diametro della pupilla durante quelle pause brevi nella nostra analisi, è necessario sottolineare come all'inizio di ogni task il diametro della pupilla tornava ad una condizione basale (McLaughlin et al. 2024), diminuendo inevitabilmente, a differenza del task Push dove il partecipante veniva coinvolto per un periodo senza interruzioni. A seguito di questa analisi si può ipotizzare come le due condizioni siano a confronto disomogenee.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto del settore manifatturiero, guidato dai principi dell'Industria 4.0 e 5.0. La continua ricerca di efficienza ed efficacia nei contesti produttivi può portare all'applicazione di misure che possono incidere negativamente sulla salute mentale dei lavoratori, rendendo necessario uno studio approfondito su quali sono i principali aspetti che causano lo stress lavoro-correlato.

In tale contesto, questa tesi ha avuto l'obiettivo di confrontare quale condizione produttiva tra Push e Pull fosse la più stressante e di valutare la presenza di eustress, distress e la coesistenza tra eustress e distress.

Tutti gli indicatori fisiologici statisticamente significativi, ad eccezione del diametro pupillare, hanno riportato che i partecipanti hanno percepito un carico di stress fisiologico maggiore nella condizione Pull rispetto alla condizione Push.

Si ritiene che il motivo per cui il diametro pupillare non abbia seguito questo trend sia attribuibile ai limiti e agli artefatti generati dai continui cambi di setup durante l'esecuzione della condizione Pull.

I questionari PSS-10 e RAW NASA-TLX non hanno restituito nessuna correlazione statisticamente significativa con i segnali fisiologici, né alcuna differenza statisticamente significativa tra le risposte nella condizione Push e la condizione Pull: dunque non si sono rivelati adeguati alla risposta della prima research question.

Per quanto riguarda la valutazione e la classificazione degli stati di stress, il questionario VEDAS non ha restituito nessuna correlazione statisticamente significativa tra i vari stati di

stress e i segnali fisiologici: di conseguenza, si è rilevato che il questionario VEDAS non è adeguato all’indagine relativa alla seconda research question.

LIMITI DELLO STUDIO E DIREZIONI DI RICERCA FUTURI

I principali limiti del presente studio riguardano la struttura del protocollo sperimentale. La maggior parte degli indicatori fisiologici presenta un’elevata sensibilità al movimento: dunque è necessario che, affinché le condizioni produttive siano quanto più omogenee possibili, si mantenga una coerenza nei movimenti che il partecipante deve effettuare.

Inoltre, il protocollo sperimentale ha previsto che nella condizione Push venisse ripetuta la costruzione di un unico modellino, mentre nella condizione Pull venissero costruiti cinque diversi modellini. La condizione Pull ha comportato quindi dei tempi di settaggio tra un modellino ed un altro, per permettere di cambiare le cassettoni con i pezzi utili per il modellino seguente, mentre la condizione Push non ha richiesto questi tempi. Dunque la condizione Push si è svolta in modo continuativo, mentre la condizione Pull ha previsto delle brevi interruzioni. Quest’ultimo aspetto ha influenzato i segnali fisiologici registrati, come quello relativo al diametro della pupilla, che impiega poco tempo a tornare alla loro condizione basale, causando dunque un confronto non omogeneo. Risulta quindi necessario riprogettare la struttura temporale della condizione Pull, per garantire una continuità ininterrotta di esecuzione paragonabile a quella del task Push.

Inoltre, il protocollo attuale ha previsto una pausa di cinque minuti tra una condizione e la successiva: questo tempo non è sempre sufficiente affinché tutti i parametri fisiologici tornino al loro valore basale. Gli studi futuri dovrebbero dunque considerare di prolungare la durata della pausa tra una condizione e la successiva.

Infine, si raccomanda di coinvolgere un campione più ampio nelle campagne sperimentali future, che sia maggiormente rappresentativo della popolazione e del contesto su cui si basa questo studio.

Il questionario VEDAS non si è rivelato efficace per rispondere alla seconda research question, a causa del numero di domande esiguo che non hanno permesso di analizzare in maniera significativa la presenza dei vari stati di stress. È necessario dunque espandere e diversificare gli indicatori.

BIBLIOGRAFIA

Almalchy M.T. , Ciobanu V. e Popescu N., "Noise Removal from ECG Signal Based on Filtering Techniques", 2019. *22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*. [DOI: 10.1109]

Awada M., Becerik-Gerber B., Lucas G., Roll S. e Liu R., "A New Perspective on Stress Detection: An Automated Approach for Detecting Eustress and Distress", 2024. *IEEE Transactions on Affective Computing*. [DOI: 10.1109]

Barbieri R., Matten E., Alabi A., Brown E., "A point-process model of human heartbeat intervals: new definitions of heart rate and heart rate variability", 2005. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*.
<https://doi.org/10.1152/ajpheart.00482.2003>

Bergstrom, J.R., Schall, A.J., "Eye tracking in user experience design", 2014.

Braithwaite J., Watson D., Jones R., "A Guide for Analysing Electrodermal Activity (EDA) & Skin Conductance Responses (SCRs) for Psychological Experiments", 2015.

Breque M., De Nul L., Petridis A., "Industry 5—Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry", 2021. *Directorate-General for Research and Innovation*.

Brugnara A., Zarbo C., Tarvainen M.P., Marchettini P., Adorni R., Compare A., "Heart rate variability during acute psychosocial stress: A randomized cross-over trial of verbal and non-verbal laboratory stressors", 2018. *Int J Psychophysiol* doi: 10.1016/j.ijpsycho.2018.02.016.

Brunzini A., Peruzzini M., Grandi F., Khamaisi R., Pellicciari M., "A Preliminary Experimental Study on the Workers' Workload Assessment to Design Industrial Products and Processes", 2021. <https://doi.org/10.3390/app112412066>

Chenarboo F. J., Hekmatshoar R., Fallahi M., "The influence of physical and mental workload on the safe behavior of employees in the automobile industry", 2022. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11034>.

Ciccarelli M., Papetti A., Germani M., "A review of work-related stress detection, assessment, and analysis on-field", 2023. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.152>.

Dombrowski U., Wullbrandt J., Reimer A., "Lean Stress Sensitization in Learning Factories", 2017. *Procedia Manufacturing*. [DOI:10.1016]

Ferreira D., Ferreira S., Mateus C., Barbosa-Rocha N., Coelho L., A.Rodrigues M., "Advancing the understanding of pupil size variation in occupational safety and health: A systematic review and evaluation of open-source methodologies", 2024.

Freivalds A., Niebel B., "Niebel's Methods, Standards, & Work Design", 2014.

Gawron, V.J. "Human Performance, Workload and Situational Awareness Measures Handbook", 2008. doi: 10.1201/9781420064506.

Gervasi R., Capponi M., Mastrogiacomo L., Franceschini F., "Eye-tracking support for analyzing human factors in human-robot collaboration during repetitive long-duration assembly processes", 2024. *Prod. Eng. Res. Devel.* <https://doi.org/10.1007/s11740-024-01294-y>

Gustavo Tafet, "Lo stress: com'è e come ci colpisce", 2018. *Volume 23 di Neuroscienze & psicologia*

Hart S. G., Staveland L. E. "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research", 1988. *Advances in Psychology*. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

Hassan Z. B., Sarif N. H., "Ergonomic problems and stress among workers in a manufacturing company.", 2015. International Journal of Knowledge Management Studies.

Hernando A., Lazaro J., Arza A., Garzon J., Gil E. e Laguna P. "Changes in respiration during emotional stress", 2015 . *Computing in Cardiology Conference (CinC)*. [DOI: 10.1109]

Immanuel S., Teferra M.N., Baumert M., Bidargaddi N. , "Heart Rate Variability for Evaluating Psychological Stress Changes in Healthy Adults: A Scoping Review", 2023. *Neuropsychobiology*. doi: 10.1159/000530376.

Jarinto K., "Eustress: A Key to Improving Job Satisfaction and Health Among Thai Managers Comparing US, Japanese, and Thai Companies Using SEM Analysis", 2010. [DOI: 10.2129]

Järvelin-Pasanen S., Sinikallio S., Tarvainen M.P., "Heart rate variability and occupational stress-systematic review", 2018. doi: 10.2486/indhealth.2017-0190

Karasek Jr., R. A. "Job Demands, Job Decision Latitude, and Mental Strain: Implications for Job Redesign", 1979. *Administrative Science Quarterly*. [DOI: 10.2307]

Kempfle J., Van Laerhoven K., "Breathing In-Depth: A Parametrization Study on RGB-D Respiration Extraction Methods", 2021. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2021.757277>

Laborde S., Mosley E., Thayer J.F., "Heart Rate Variability and Cardiac Vagal Tone in Psychophysiological Research – Recommendations for Experiment Planning, Data Analysis, and Data Reporting", 2017. *Sec. Quantitative Psychology and Measurement*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00213>

Leiner D., Fahr A., Fruh H., "EDA Positive Change: A Simple Algorithm for Electrodermal Activity to Measure General Audience Arousal During Media Exposure", 2012. DOI:10.1080/19312458.2012.732627

Lucchese A., Padovano A., Facchini F., "Comprehensive Systematic Literature Review on Cognitive Workload: Trends on Methods, Technologies and Case Studies", 2025. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1049/cim2.70025>.

Marinescu A.C., Sharples S., Ritchie A.C., Sánchez López T., McDowell M., Morvan H.P., "Physiological Parameter Response to Variation of Mental Workload", 2018. <https://doi.org/10.1177/0018720817733101>

McColl D., Hong A., Hatakeyama N. et al. "A Survey of Autonomous Human Affect Detection Methods for Social Robots Engaged in Natural HRI", 2016. [DOI:10,1007]

McLaughlin DJ, Zink ME, Gaunt L, Reilly J, Sommers MS, Van Engen KJ, Peelle JE, "Give me a break! Unavoidable fatigue effects in cognitive pupillometry", 2023. *Psychophysiology*. [DOI: 10.1111]

Meijer A., Arts L., Gomez R., Van den Broek E., "Electrodermal activity: A continuous monitor of well-being", 2023. *Journal of Smart Cities and Society*. DOI 10.3233/SCS-230021

Messineo L, Tosto C., "Evaluation of the psychometric properties of the Italian version of the 10-item perceived stress scale in a sample of teachers", 2024. doi: 10.3389/fpsyg.2023.1330789

Mingardi M, Pluchino P, Bacchin D, Rossato C, Gamberini L. "Assessment of Implicit and Explicit Measures of Mental Workload in Working Situations: Implications for Industry 4.0", 2020. *Applied Sciences*. [DOI:10.3390]

Ogorodnikova O., "Methodology of safety for a human robot interaction designing stage", 2008. *Conference on Human System Interactions*. [DOI: 10.1109]

Paganin G., Simbula S., "New Technologies in the Workplace: Can Personal and Organizational Variables Affect the Employees' Intention to Use a Work-Stress Management App?", 2021. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [DOI: 10.3390]

Parga J., Tiznado-Aitken I., Jamal S., Farber S., Yu A., Higgins C., "Perceived accessibility and self-rated health: Examining subjective well-being in the suburbs of Scarborough, Canada", 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104261>.

Rezaei N., Vaezi S. A., Camelio J. A., "Decoding the silent language: A framework for advanced visual emotion recognition to enhance worker well-being on IIoT-enabled manufacturing", 2024. *Manufacturing Letters*.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.162>.

Rodriguez D., Buyens d., Van Landeghem H., Lasió V., "Impact of Lean Production on Perceived Job Autonomy and Job Satisfaction: An Experimental Study", 2015. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. [DOI:10.1002]

Sacha J., "Why should one normalize heart rate variability with respect to average heart rate", 2013. *Front Physiol*. [DOI:10.3389]

Sacha M.D., "Interaction between Heart Rate and Heart Rate Variability", 2014. Annals of non invasive electrocardiology. <https://doi.org/10.1111/anec.12148>

Sharma M., Sharma M., "A Brief Introduction and Review on Galvanic Skin Response", 2016. *International Journal of Medical Research Professionals*. DOI: 10.21276/ijmrp.2016.2.6.003

Subramanian S., Barbieri R., Brown E., "Point process temporal structure characterizes electrodermal activity", 2020.

Supreet K., Anuj C., "Effect of change in body position on resting electrocardiogram in young healthy adults.", 2016. *Nigerian Journal of Cardiology*. [DOI: 10.4103]

Uttam R. Bagal, "Respiratory Sound Analysis using MATLAB", 2012.

Vikoler, T., Dániel, K., & Traut-Mattausch, E., “The Di-Eu-Stress State Scale (DESS Scale): Development and Validation of a Scale Measuring State Distress and Eustress”, 2024. *European Journal of Psychological Assessment*. [DOI: 10.1027]

Wang L., Gao R., Váncza J., Krüger J., Wang X. V., Makris S., Chryssolouris G. “Symbiotic human-robot collaborative assembly”, 2019. *CIRP Annals*.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>.

Xinyue Ma, Monfared R., Grant R., Yee Mey Goh, “Determining Cognitive Workload Using Physiological Measurements: Pupillometry and Heart-Rate Variability”, 2010.
<https://doi.org/10.3390/s24062010>

Zhong N., Li M., Wu Y., Lu S., “The impact of different forms of statistical information on reading efficiency, effect, and mental workload: An eye-tracking study”, 2011. *International Conference on Complex Medical Engineering*.
<https://doi.org/10.1109/ICCME.2011.5876712>

APPENDICE A

Questionario PSS-10

Le prossime domande contenute in queste scale riguardano i Suoi sentimenti e pensieri durante l'ultimo mese. Per ogni domanda, Le viene chiesto di indicare la sua risposta indicando la frequenza con cui si è sentito o ha pensato in un certo modo.

0=MAI, 1=QUASI MAI, 2=A VOLTE, 3=ABBASTANZA SPESO, 4=MOLTO SPESO

1.Nell'ultimo mese, con che frequenza si è sentito fuori di sé poiché è avvenuto qualcosa di inaspettato?

- 2.Nell'ultimo mese, con che frequenza ha avuto la sensazione di non essere in grado di avere controllo sulle cose importanti della tua vita?
- 3.Nell'ultimo mese, con che frequenza si è sentito nervoso e/o stressato?
- 4.Nell'ultimo mese, con che frequenza si è sentito fiducioso della sua capacità di gestire i suoi problemi personali?
- 5.Nell'ultimo mese, con che frequenza ha avuto la sensazione che le cose andassero come diceva lei?
6. Nell'ultimo mese, con che frequenza ha avuto la sensazione di non riuscire a star dietro a tutte le cose che doveva fare?
7. Nell'ultimo mese, con che frequenza ha avvertito di essere in grado di controllare ciò che la irrita nella sua vita?
- 8.Nell'ultimo mese, con che frequenza ha sentito di padroneggiare la situazione?
- 9.Nell'ultimo mese, con che frequenza è stato arrabbiato per cose che erano fuori dal suo controllo?
- 10.Nell'ultimo mese, con che frequenza ha avuto la sensazione che le difficoltà si stavano accumulando a un punto tale per cui non poteva superarle?

APPENDICE B

Questionario RAW NASA-TLX

Il questionario NASA-TLX serve a valutare il carico di lavoro percepito. Ti verranno presentate sei dimensioni (Impegno mentale, fisico, temporale, performance, sforzo e frustrazione), che dovrai valutare indicando l'intensità percepita su una scala da 0 (Molto basso) a 20 (Molto alto).

- 1.**Impegno mentale.** Qual è il livello di impegno mentale richiesto dall'attività?
- 2.**Impegno fisico.** Qual è il livello di impegno fisico richiesto dall'attività?
- 3.**Impegno temporale.** Quanto è stato frettoloso o affrettato il ritmo dell'attività?

4. Performance. Quale livello di successo avete raggiunto nel realizzare ciò che vi era stato chiesto?

5. Sforzo. Quanto sforzo avete dovuto compiere per raggiungere questo livello di performance?

6. Frustrazione. Quale livello di insicurezza, scoraggiamento, irritazione, stress e noia avete provato?

APPENDICE C

Script Matlab per l'elaborazione del segnale ECG

```
clear; clc; close all;
```

```
%% lettura file
```

```
Soggetto = readmatrix('.txt'); ECG = Soggetto(:,3) * 0.1250;
```

```
%% Parametri di campionamento
```

```
fs = 250;
```

```
T = 1/fs;
```

```
t1 = (0:length(ECG)-1)/fs;
```

```
% pulizia nan / inf
```

```

ECG = ECG(:); % vettore colonna

idx_invalid = ~isfinite(ECG);

if any(idx_invalid)

    t = (1:length(ECG))';

    ECG(idx_invalid) = interp1(t(idx_invalid), ECG(idx_invalid), t(idx_invalid),'linear',
    'extrap');

End

```

%% Divisione dei segnali (Baseline-Task1-Task2)

```

baseline_start = round(3000);

baseline_end = round(78000);

push_start = round(107750);

push_end = round(300250);

pull1_start = round(392000);

pull1_end = round(421000);

pull2_start = round(434250);

pull2_end = round(465750);

pull3_start = round(480750);

pull3_end = round(508250);

pull4_start = round(519500);

pull4_end = round(547250);

pull5_start = round(566250);

pull5_end = round(592500);

```

% Estrazione dei segmenti

```

ECG_baseline = ECG(baseline_start:baseline_end);

```

```

ECG_push = ECG(push_start:push_end);

ECG_pull1 = ECG(pull1_start:pull1_end);

ECG_pull2 = ECG(pull2_start:pull2_end);

ECG_pull3 = ECG(pull3_start:pull3_end);

ECG_pull4 = ECG(pull4_start:pull4_end);

ECG_pull5 = ECG(pull5_start:pull5_end);

```

% Unione di tutti i pull in un unico vettore

```

ECG_pull = [ECG_pull1; ECG_pull2; ECG_pull3; ECG_pull4; ECG_pull5];

t_baseline = (0:length(ECG_baseline)-1)/fs;

t_push = (0:length(ECG_push)-1)/fs;

t_pull = (0:length(ECG_pull)-1)/fs;

window = 15; % durata finestra in secondi

start_t = 0; % inizio finestra

```

%% Analisi in Frequenza per vedere la banda dei segnali

% Parametri

```

win_len = 2048; %

lunghezza finestra nfft = 2048;

window_func = hamming(win_len);

```

% pwelch senza overlap

```

[pxx_baseline, f_baseline] = pwelch(ECG_baseline-mean(ECG_baseline), window_func,
0, nfft, fs);

[pxx_push, f_push] = pwelch(ECG_push-mean(ECG_push), window_func, 0, nfft, fs);

[pxx_pull, f_pull] = pwelch(ECG_pull-mean(ECG_pull), window_func, 0, nfft, fs);

```

```
%% filtraggio
```

```
% Filtro passa-alto Butterworth
```

```
ft = 5; order = 7; Wn = ft/(fs/2);  
[b,a] = butter(order, Wn, 'high');  
ECG_baseline_filt = filtfilt(b, a, ECG_baseline);  
ECG_push_norm = filtfilt(b, a, ECG_push);  
ECG_pull_norm = filtfilt(b, a, ECG_pull);
```

```
% Filtro passa-basso Butterworth
```

```
ft = 40; order = 5; Wn = ft/(fs/2);  
[b,a] = butter(order, Wn, 'low');  
ECG_baseline_filt = filtfilt(b, a, ECG_baseline_filt);  
ECG_push_norm = filtfilt(b, a, ECG_push_norm);  
ECG_pull_norm = filtfilt(b, a, ECG_pull_norm);
```

```
%% Estrazione picchi R
```

```
thresh_baseline = mean(ECG_baseline_filt) + 2 * std(ECG_baseline_filt);  
thresh_push = mean(ECG_push_norm) + 1 * std(ECG_push_norm);  
thresh_pull = mean(ECG_pull_norm) + 0.5 * std(ECG_pull_norm);
```

```
% Trova picchi R per ECGT1
```

```
[pk_baseline,locs_baseline]=findpeaks(ECG_baseline_filt,'MinPeakHeight',  
thresh_baseline, 'MinPeakDistance', 0.4fs);  
[pk_push,locs_push]=findpeaks(ECG_push_norm,'MinPeakHeight',thresh_push,  
'MinPeakDistance', 0.4fs);
```

```
[pk_pull,locs_pull]=findpeaks(ECG_pull_norm,'MinPeakHeight',thresh_pull,'MinPeakDistance', 0.4*fs);
```

```
% Asse temporale per ogni segmento
```

```
t_baseline = (0:length(ECG_baseline_filt)-1)/fs;
```

```
t_push = (0:length(ECG_push_norm)-1)/fs;
```

```
t_pull = (0:length(ECG_pull_norm)-1)/fs;
```

```
[pk_baseline, locs_baseline] = detect_r_peaks_robust(ECG_baseline_filt, fs);
```

```
[pk_push, locs_push] = detect_r_peaks_robust(ECG_push_norm, fs);
```

```
[pk_pull, locs_pull] = detect_r_peaks_robust(ECG_pull_norm, fs);
```

```
%% Calcolo serie RR con esclusione anomalie
```

```
% --- Baseline 1 ---
```

```
RR_baseline_sec_RAW = diff(locs_baseline) / fs;
```

```
RR_baseline_ms_RAW = RR_baseline_sec_RAW * 1000;
```

```
valid_idx_baseline = RR_baseline_ms_RAW >= 300 & RR_baseline_ms_RAW <= 2000;
```

```
RR_baseline_ms_RAW = RR_baseline_ms_RAW(valid_idx_baseline);
```

```
RR_baseline_sec_RAW = RR_baseline_sec_RAW(valid_idx_baseline);
```

```
RR_baseline_sec = RR_baseline_ms_RAW / 1000;
```

```
t_RR_baseline = 1:length(RR_baseline_ms_RAW);
```

```
% --- Task 1 ---
```

```
RR_push_sec_RAW = diff(locs_push) / fs;
```

```
RR_push_ms_RAW = RR_push_sec_RAW * 1000;
```

```
valid_idx_push = RR_push_ms_RAW >= 300 & RR_push_ms_RAW <= 2000;
```

```
RR_push_ms_RAW = RR_push_ms_RAW(valid_idx_push);
```

```
RR_push_sec_RAW = RR_push_sec_RAW(valid_idx_push);
```

```

RR_push_sec = RR_push_ms_RAW / 1000;
t_RR_push = 1:length(RR_push_ms_RAW);
% --- Task 2 ---
RR_pull_sec_RAW = diff(locs_pull) / fs;
RR_pull_ms_RAW = RR_pull_sec_RAW * 1000;
valid_idx_pull = RR_pull_ms_RAW >= 300 & RR_pull_ms_RAW <= 2000;
RR_pull_ms_RAW = RR_pull_ms_RAW(valid_idx_pull);
RR_pull_sec_RAW = RR_pull_sec_RAW(valid_idx_pull);
RR_pull_sec = RR_pull_ms_RAW / 1000;
t_RR_pull = 1:length(RR_pull_ms_RAW);

```

%% Parametri generali per stima spettrale del segnale

```

RR_NFFT = 512;    fs_rr = 1;      N_max = 30;
RR_sec_all = {RR_baseline_sec, RR_push_sec, RR_pull_sec};
segmenti = {'Baseline 1', 'Task 1', 'Task 2'};
PSD_all = cell(1,3); f_all = cell(1,3);
for k = 1:3
    RR = RR_sec_all{k} - mean(RR_sec_all{k});

```

% Stima ordine AR con Burg

```

e = zeros(1,N_max);
for p = 2:N_max
    [~, e(p)] = arburg(RR,p);
end
e_asint = 1.05 * e(N_max);
ind = find(e < e_asint);
if ~isempty(ind)

```

```

ind(1) = [];
order = min(ind);

Else

    order = N_max; % fallback

end

% PSD Burg

[PSD_all{k}, f_all{k}] = pburg(RR, order, NFFT, fs_rr);

end

```

APPENDICE D

Script Matlab per l'elaborazione del segnale EDA

```
clear; close all; clc;
```

% 1. LETTURA E PRE-PROCESSING EDA

```
Edoardo = readmatrix('Edoardo.txt');

EDA = Soggetto(:,1) * 0.0031;
```

% 2. PULIZIA NaN / INF

```
EDA = EDA(:); % vettore colonna

idx_invalid = ~isfinite(EDA);
```

```
if any(idx_invalid)
```

```
    t = (1:length(EDA))';
```

```
    EDA(idx_invalid) = interp1(t(~idx_invalid), EDA(~idx_invalid), t(idx_invalid), 'linear',
    'extrap');
```

```
end
```

```

fs = 250; % Hz

T = 1/fs;

time_eda = (0:length(EDA)-1)' / fs;

eda_matrix_Soggetto = [time_eda, EDA];

writematrix(eda_matrix_Soggetto, 'eda_matrix_Soggetto.txt');

```

```
fs_ledalab = 25;
```

% 3. CARICAMENTO RISULTATI LEDALAB

```
% --> Assumiamo che 'analysis' sia già caricato dal file .mat esportato da Ledalab
```

```
% load('Ledalab_results.mat');
```

```
if isfield(analysis, 'tonicData') && isfield(analysis, 'phasicData')
```

```
    EDA_tonic = analysis.tonicData(:);
```

```
    EDA_phasic = analysis.phasicData(:);
```

```
else
```

```
    error('Variabili tonicData o phasicData mancanti in analysis.');
```

```
end
```

```
nSamples = length(EDA_tonic);
```

```
time_eda = (0:nSamples-1)' / fs_ledalab;
```

% 4. DEFINIZIONE SEGMENTI

```
baseline_start = round(2500/10);
```

```
baseline_end = round(77500/10);
```

```

push_start = round(106000/10);
push_end = round(298500/10);

pull1_start = round(381000/10);
pull1_end = round(419000/10);

pull2_start = round(441250/10);
pull2_end = round(483750/10);

pull3_start = round(506750/10);
pull3_end = round(548500/10);

pull4_start = round(576000/10);
pull4_end = round(618500/10);

pull5_start = round(640000/10);
pull5_end = round(680750/10);

```

% 5. CALCOLO SCR (PHASIC)

```

scr_onset = analysis.onset(:);
scr_amp = analysis.amp(:);
scr_threshold = 0.01;
valid_scr = scr_amp >= scr_threshold;
scr_onset = scr_onset(valid_scr);
scr_amp = scr_amp(valid_scr);
countSCR = @(t_start, t_end) sum(scr_onset >= t_start & scr_onset <= t_end);
meanAmpSCR = @(t_start, t_end) mean(scr_amp(scr_onset >= t_start & scr_onset <= t_end));

```

% --- BASELINE ---

```

baseline_scr_count = countSCR(baseline_start/fs_ledalab, baseline_end/fs_ledalab);
baseline_scr_amp = meanAmpSCR(baseline_start/fs_ledalab, baseline_end/fs_ledalab);

```

```

if isnan(baseline_scr_amp), baseline_scr_amp = 0; end

% --- PUSH ---

push_scr_count = countSCR(push_start/fs_ledalab, push_end/fs_ledalab);
push_scr_amp = meanAmpSCR(push_start/fs_ledalab, push_end/fs_ledalab);
if isnan(push_scr_amp), push_scr_amp = 0; end

% --- PULL (somma 5 segmenti) ---

pull_scr_count = 0;
pull_scr_amp_all = [];
pull_segments = [pull1_start pull1_end; pull2_start pull2_end; pull3_start pull3_end;
pull4_start pull4_end; pull5_start pull5_end];
for i = 1:size(pull_segments,1)

t0 = pull_segments(i,1)/fs_ledalab;
t1 = pull_segments(i,2)/fs_ledalab;
pull_scr_count = pull_scr_count + countSCR(t0,t1);
pull_scr_amp_all = [pull_scr_amp_all; scr_amp(scr_onset>=t0 & scr_onset<=t1)];
end

pull_scr_amp = mean(pull_scr_amp_all);
if isnan(pull_scr_amp), pull_scr_amp = 0; end

```

% 6. CALCOLO FREQUENZA (Hz) E NORMALIZZAZIONE

```

baseline_duration = (baseline_end - baseline_start) / fs_ledalab;
push_duration = (push_end - push_start) / fs_ledalab;
pull_duration = ((pull1_end - pull1_start)+(pull2_end - pull2_start)+(pull3_end -
pull3_start)+ ...
(pull4_end - pull4_start)+(pull5_end - pull5_start)) / fs_ledalab;

```

```
baseline_scr_freq_Hz = baseline_scr_count / baseline_duration;
```

```

push_scr_freq_Hz = push_scr_count / push_duration;
pull_scr_freq_Hz = pull_scr_count / pull_duration;

SCR_Freq_Norm = [1; log(push_scr_freq_Hz + eps) - log(baseline_scr_freq_Hz + eps);
log(pull_scr_freq_Hz + eps) - log(baseline_scr_freq_Hz + eps)];
SCR_Amp_Norm = [1; log(push_scr_amp + eps) - log(baseline_scr_amp + eps);
log(pull_scr_amp + eps) - log(baseline_scr_amp + eps)];

```

% 7. RISULTATI E OUTPUT

```

Condizione = {'Baseline'; 'Push'; 'Pull'};

SCR_Freq_RAW_Hz = [baseline_scr_freq_Hz; push_scr_freq_Hz; pull_scr_freq_Hz];
SCR_Amp_RAW_uS = [baseline_scr_amp; push_scr_amp; pull_scr_amp];

SCR_results = table(Condizione, ...
SCR_Freq_RAW_Hz, SCR_Amp_RAW_uS, ...
SCR_Freq_Norm, SCR_Amp_Norm);

```

% 8. SALVATAGGIO RISULTATI

```

results = struct();
results.scr.onset = scr_onset;
results.scr.amp = scr_amp;
results.table = SCR_results;

```

APPENDICE E

Script Matlab per l'elaborazione del segnale respiratorio

```
clear; clc; close all
```

```
% Carica il segnale respiratorio grezzo
Soggetto = readmatrix('Soggetto.txt');

Resp = Soggetto(:,1) * 0.0125; % Conversione in ampiezza reale

fs = 250; % Frequenza di campionamento [Hz]
fc = 20; % Frequenza di taglio passa-basso [Hz]
order = 4; % Ordine del filtro Butterworth
```

% Indici di segmentazione (in campioni)

```
baseline_start = 1;
baseline_end = 75000;
push_start = 90000;
push_end = 282500;
pull1_start = 355000;
pull1_end = 397500;
pull2_start = 409000;
pull2_end = 451500;
pull3_start = 468000;
pull3_end = 510500;
pull4_start = 527250;
pull4_end = 569750;
pull5_start = 583000;
pull5_end = 619250;
```

% 2. PULIZIA NaN / INF

```
Resp = Resp(:); % vettore colonna
```

```

idx_invalid = ~isfinite(Resp);

if any(idx_invalid)
    t = (1:length(Resp))';
    Resp(idx_invalid) = interp1(t(~idx_invalid), Resp(~idx_invalid), t(idx_invalid), 'linear',
    'extrap');
end

```

% 3. FILTRAGGIO PASSA-BASSO

```

Wn = fc / (fs/2);
[b,a] = butter(order, Wn, 'low');
Resp_filt = filtfilt(b,a,Resp);

```

% 4. RIMOZIONE SALTI (ISTERESI)

```

thr_jump = 5 * std(diff(Resp_filt));
jumps = find(abs(diff(Resp_filt)) > thr_jump);

Resp_corr = Resp_filt;
for j = 1:length(jumps)
    idx = jumps(j)+1;
    if idx <= length(Resp_corr)
        Resp_corr(idx:end) = Resp_corr(idx:end) - (Resp_corr(idx) - Resp_corr(idx-1));
    end
end

```

% 5. SEGMENTAZIONE TEMPORALE

```

Resp_baseline = Resp_corr(baseline_start:baseline_end);

```

```

Resp_push = Resp_corr(push_start:push_end);
Resp_pull1 = Resp_corr(pull1_start:pull1_end);
Resp_pull2 = Resp_corr(pull2_start:pull2_end);
Resp_pull3 = Resp_corr(pull3_start:pull3_end);
Resp_pull4 = Resp_corr(pull4_start:pull4_end);
Resp_pull5 = Resp_corr(pull5_start:pull5_end);

```

% Unione di tutti i pull in un unico vettore

```
Resp_pull = [Resp_pull1; Resp_pull2; Resp_pull3; Resp_pull4; Resp_pull5];
```

% 6. ESTRAZIONE FREQUENZA RESPIRATORIA E AMPIEZZA

```

[RR_baseline, Amp_baseline] = Respiration_rate_and_amplitude(Resp_baseline, fs);
[RR_push, Amp_push]      = Respiration_rate_and_amplitude(Resp_push, fs);
[RR_pull, Amp_pull]      = Respiration_rate_and_amplitude(Resp_pull, fs);

```

% 7. NORMALIZZAZIONE

```

RR_push_norm = RR_push / RR_baseline;
RR_pull_norm = RR_pull / RR_baseline;
Amp_push_norm = Amp_push / Amp_baseline;
Amp_pull_norm = Amp_pull / Amp_baseline;

```

% FUNZIONE LOCALE

```
function [RR, Amp] = Respiration_rate_and_amplitude(signal, fs)
```

% Trova i picchi inspiratori (massimi locali)

```
[pk, ~] = findpeaks(signal, 'MinPeakDistance', round(fs*1.5));
```

% Frequenza respiratoria (respiri/minuto)

```
dur_sec = length(signal)/fs;  
RR = (length(pk) / dur_sec) * 60;  
  
% Ampiezza media (rispetto al valore medio del segnale)  
Amp = mean(pk) - mean(signal);  
end
```