Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sugli aspetti percettivi e circadiani

C. Burattini, F. Gugliermetti, F. Ferlazzo, L. Piccardi
A. M. Giannini, F. Bisegna

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA
D I A E E - Area Fisica Tecnica

Report RdS/2013/109

ANALISI DELLE CARATTERISTICHE LUMINOSE DI NUOVE SORGENTI DI ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE E VALUTAZIONE DEI LORO EFFETTI SUGLI ASPETTI PERCETTIVI E CIRCADIANI

C. Burattini, F. Gugliermetti, F. Ferlazzo, A. M. Giannini, F. Bisegna (SAPIENZA Università di Roma)
L. Piccardi (Università dell'Aquila)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012
Area: Razionalizzazione risparmio nell'uso dell'energia elettrica
Progetto: Risparmio di energia elettrica nel settori: civile, Industria e servizi
Obiettivo: Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione – Materiali e componenti utilizzati per l'emissione e la trasmissione della luce
Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sugli aspetti percettivi e circadiani*"

Responsabile scientifico ENEA: Ornella li Rosi

Responsabile scientifico Sapienza Università di Roma: Fabio Bisegna

Indice

SOMMARIO 4
1 INTRODUZIONE 5
2 STATO DELL'ARTE 7
3 MATERIALI E METODI 8
3.1 PARTECIPANTI 8
3.2 AMBIENTE SPERIMENTALE 10
3.3 COMPITI COGNITIVI 14
3.4 PROCEDURA 19
4 RISULTATI 20
4.1 TEST DI ASSOCIAZIONE SIMBOLI-NUMERI 20
4.2 TEST DI ROTAZIONI MENTALI (ROT) 20
4.3 TEST DI TASK SWITCHING 21
4.4 IL NASA-TASK LOAD INDEX (TLX) 22
4.5 RILIEVI AMBIENTALI 23
5 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI 25
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 27

Sommario

L'analisi degli effetti dell'illuminazione naturale e artificiale sull'uomo è un argomento oggetto di studio del Dipartimento DIAEE da diversi anni con l'obiettivo di analizzare l'interrelazione tra l'illuminazione e le reazioni umane sotto il duplice aspetto psicologico e fisiologico.
In questo anno di attività, lo studio è stato svolto con l'intento di indagare gli effetti delle nuove sorgenti luminose a LED, in particolare di quelle il cui spettro è ricco di lunghezze d'onda corte (blu), rispetto alle prestazioni cognitive degli esseri umani. Le valutazioni sono state fatte avvalendosi dei risultati ottenuti in due differenti compiti cognitivi, Cambio di Compito Volontario e Visualizzazione delle Rotazioni, in cui vengono testate le funzioni esecutive e le abilità visuo-spaziali dei soggetti partecipanti, finora scarsamente indagate, ma essenziali nella vita quotidiana.

1 Introduzione

L'analisi degli effetti dell'illuminazione naturale e artificiale sull'uomo è un argomento oggetto di studio del Dipartimento DIAEE da diversi anni e una recente attività, portata avanti con la collaborazione di Enea, si è occupata di analizzare l'interrelazione tra l'illuminazione e le reazioni umane sotto il duplice aspetto psicologico e fisiologico. Nel precedente anno di attività (2011/12) [1] è stata indagata l'influenza di differenti scenari luminosi sugli esseri umani mediante due differenti test sperimentali: un primo test, svolto all'interno di una cabina sperimentale illuminata con la sola luce artificiale, era mirato a scoprire l'esistenza di una possibile relazione tra le variazioni dei dati psicofisiologici e i cambiamenti quantitativi nei livelli di illuminamento; il secondo test è stato effettuato in ambiente reale, nel quale è stata realizzato un controllo della luce naturale, e ha indagato l'eventuale influenza della sorgente luminosa sulle reazioni emotive dei soggetti. I risultati di questa ricerca trovano importanti applicazioni in campo medico per la cura di alcune patologie dell'umore.

Nella visione tradizionale un buon progetto illuminotecnico deve contemporaneamente soddisfare le necessità legate a una buona visione e le esigenze economiche e ambientali di risparmio energetico: una illuminazione di qualità realizza una visione confortevole, capace di garantire la sicurezza e la salute, migliorare il benessere e le prestazioni umane, esaltare le caratteristiche di uno spazio, privilegiando la soluzione energeticamente efficiente.

Il quadro generale si è arricchito a seguito della nuova strada aperta nel 2001 dalle ricerche parallele di Brainard et al. [2] e Thapan, Arendt, & Skene [3], riguardanti gli effetti non visivi della luce sull'organismo umano. La scoperta nella retina umana delle cellule gangliari intrinsecamente fotosensibili (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells, ipRGCs), una nuova classe di fotorecettori differenti rispetto ai coni e bastoncelli, implicati nella regolazione dei ritmi circadiani umani in funzione delle 24 ore del ciclo giornaliero di luce/buio, ha dato un nuovo impulso alla ricerca nel campo dell'illuminazione [4,5]. I principali aspetti studiati dai gruppi di ricerca internazionale, composti da esperti in differenti materie, sono il ruolo dello spettro delle sorgenti luminose, il rapporto tra i periodi di luce e buio, la sensibilità relativa alle differenti parti dello spettro visivo e più in generale l'effetto dell'esposizione alla luce sulla salute umana [6,7,8,9,10,11].

Questi studi hanno evidenziato come il ritmo circadiano coinvolga molti processi fisiologici e psicologici, come la temperatura corporea, il battito cardiaco, la produzione di cortisolo, l'allerta e la vigilanza, i quali presentano una funzione ciclica del periodo di 24 ore [12,13,14,15,16]. L'alterazione di questi ritmi dovuta a lavoro notturno, disturbi del sonno o viaggi intercontinentali genera uno stato di malessere che si esprime con sintomi quali sonnolenza diurna, insonnia, problemi gastro-intestinali, lievi forme di depressione e irritabilità, che possono assumere una forma cronica nei lavoratori con turni (molto variabili) [17]; alcuni studi hanno inoltre ipotizzato l'esistenza di una relazione tra l'esposizione alla luce durante le ore notturne, la conseguente distruzione dei ritmi circadiani e l'insorgere del tumore al seno nelle donne [18,19,20,21,22].

Gli effetti della luce sull'essere umano, in particolare della luce con uno spettro ricco di lunghezze d'onda corte (luce blu), non si limitano all'azione sui ritmi circadiani: le indagini sugli effetti non visivi della luce sui processi cognitivi e sulla regolazione dell'umore hanno mostrato come l'esposizione alla luce blu abbia effetti positivi, oltre che sui ritmi circadiani, anche sull'allerta, la vigilanza portando anche a un incremento della produttività lavorativa in termini di migliore performance cognitiva [23]. Risultati interessanti provenienti da studi di neuroimmagine indicano che le differenti lunghezze d'onda, il tempo e l'intensità dell'esposizione luminosa possono influenzare l'attività cerebrale di alcune aree corticali e sotto-corticali (sistema limbico, corteccia

dorso-laterale prefrontale, solco intraparietale e lobulo parietale superiore; locus coeruleus, ippocampo, amigdala) durante lo svolgimento di compiti cognitivi[23]. In particolare, effetti non visivi della luce sulla regolazione del tono dell'umore e sulla memoria a lungo termine sono confermati dall'attivazione dell'amigdala e dell'ippocampo durante l'esecuzione di compiti che coinvolgono queste strutture [24,25]. Sembra inoltre che l'illuminazione influenzi alcuni processi cognitivi che non sono collegati con il sistema visivo, come la comunicazione e la conversazione [26]. Da una rassegna sistematica [27] emerge che generalmente le attività cognitive risultano migliori in condizioni di illuminazione simili a quelle prodotte dalla luce naturale; tuttavia i risultati sperimentali smentiscono il verificarsi di effetti di lungo periodo dovuti a differenti tipologie di illuminazione di un'aula scolastica sulla memoria e l'attenzione degli alunni [28]. Studi successivi non hanno riscontrato effetti sulle prestazioni degli individui legati al differente tipo di sorgente luminosa [29]; similmente, l'assenza di effetti sulla memoria e sulla comprensione dei lavoratori, sono stati osservati utilizzando differenti scenari luminosi in un ufficio e osservando la presenza di cambiamenti nelle prestazioni dei lavoratori [30].

È stato ipotizzato che le discrepanze nei risultati ottenuti da questi studi possano dipendere dalla mancanza di modelli teorici di base e da una metodologia non rigorosa [31]: la sfida futura sarà quindi inquadrare le ipotesi all'interno di quadri teorici validati e controllare le variabili sperimentali avvalendosi di competenze multiple.

Inoltre è di primaria importanza lo studio, ancora allo stato embrionale, dei possibili effetti negativi della luce artificiale sulla salute umana, soprattutto nella prospettiva di un sempre più ampio uso di sorgenti di luce innovative: il recente sviluppo e diffusione di differenti classi di sistemi illuminanti impone di intraprendere analisi stringenti e accurate su tutti i possibili effetti che tali sorgenti possano avere sulla salute e sulle prestazioni umane, in considerazione del fatto che tale problema non è stato finora adeguatamente affrontato dalla letteratura tecnica.

Tutt'oggi gli effetti dell'esposizione alla luce blu sulle abilità visuo-spaziali e sulle funzioni esecutive sono ancora parzialmente inesplorate, benché gli studi di neuroimmagine documentino come la luce induca dell'attività cerebrale sia nella corteccia prefrontale che nei lobi parietali, strutture largamente responsabili delle prestazioni nei suddetti processi [32]. Ad esempio, i comportamenti intenzionali sono possibili grazie all'abilità del soggetto di stabilire associazioni transitorie tra le rappresentazioni mentali (compito assegnato) dello stimolo e le risposte relative a un obiettivo specifico. La capacità di sapersi adattare alla modifica del compito consente un'efficace esecuzione delle attività umane giorno per giorno, ma è anche associata a un costo prestazionale: più precisamente l'esecuzione di un dato compito richiede un costo maggiore quando esso è preceduto da un compito di differente natura (costo di cambiamento), e ritornare a un compito eseguito recentemente è più difficoltoso rispetto al ritornare a uno già eseguito precedentemente. È importante notare come sia elevate abilità spaziali sia buone capacità di inibire comportamenti o azioni (come ad esempio schiacciare un tasto) risultino necessarie per svolgere alcune attività lavorative (ad es. pilota, chirurgo, agente di sicurezza, operatore nelle centrali nucleari) molte delle quali sono organizzate con turni di lavoro. Poiché le nuove sorgenti luminose potrebbero essere adottate soprattutto in tali contesti lavorativi, l'assenza di indagini scientifiche rispetto all'effetto di queste lampade sulle abilità spaziali e sulle funzioni esecutive umane può rappresentare una forte limitazione sulla conoscenza degli effetti a breve e a lungo termine. Precisamente con questa finalità il lavoro mette a confronto l'esecuzione di compiti da parte dei partecipanti svolti con due differenti tipologie di illuminazione: una realizzata con le tipiche lampade alogene ad incandescenza, l'altra con le innovative sorgenti LED. E' stata inoltre valutata attraverso test di autovalutazione se i partecipanti hanno riscontrato nelle due situazioni luminose

differenti richieste mentali, fisiche e temporali, nonché differenze nei livelli di performance, sforzo e frustrazione durante l'esecuzione dei compiti.

2 Stato dell'arte

Le ricerche condotte finora riguardanti gli effetti della luce sugli esseri umani hanno indagato principalmente l'influenza dello stimolo luminoso somministrato nelle ore notturne, per valutare la risposta in termini di soppressione o stimolazione della produzione di melatonina e la conseguente influenza sui ritmi circadiani umani. La ricerca in questo ambito è progredita al punto che gli studiosi stanno mettendo a punto sia una funzione capace di descrivere l'efficacia della radiazione luminosa nella soppressione della melatonina [33], sia un fattore di attivazione circadiana tramite il quale ottenere delle grandezze circadiane che, al pari di quelle fotometriche, siano in grado di quantificare l'effetto sul ciclo circadiano a partire dalle grandezze radiometriche [10, 34].

Parallelamente all'indagine sugli effetti della radiazione luminosa a livello circadiano, si è iniziato a indagare l'effetto che la luce esercita sull'attività celebrale e sulla risposta dell'individuo nell'esecuzione di compiti cognitivi. Uno studio condotto in questo senso ha indagato gli effetti di un differente scenario luminoso sui ritmi ultradiani, la cui asimmetria nella fase e nella frequenza è indice dell'attivazione celebrale [35]. Confrontando l'esposizione di 15 minuti a un'illuminazione brillante (4000 lux) rispetto a condizioni di illuminazione ordinaria (300 lux), è stato riscontrato un incremento della velocità nell'esecuzione di compiti spaziali nella prima condizione luminosa; inoltre rilevando che i compiti spaziali vengono eseguiti più rapidamente quando vengono presentati nel campo visivo sinistro, mentre i compiti verbali e logici quando appaiono nel campo visivo destro, è stato dimostrato che l'esposizione luminosa influenza l'attività celebrale in emisferi differenti a seconda del compito eseguito e che l'emisfero destro è più sensibile alla luce di quello sinistro.

Oltre ai tradizionali studi riguardanti gli effetti dell'esposizione alla luce nelle ore notturne, gli studi più recenti hanno iniziato ad analizzare le implicazioni non visive della luce durante le ore diurne, in quanto non è chiaro fino a che punto i risultati ottenuti nelle prime sperimentazioni in condizioni di deprivazione di sonno possano essere estesi alla vita quotidiana in assenza di situazioni anomale [36].Lo studio sugli effetti di un diverso livello di illuminamento in una normale giornata lavorativa all'interno di un ufficio ha dimostrato come un illuminamento di 1000 lux aumenti il livello di allerta, la frequenza cardiaca e l'attività del sistema simpatico, nonché l'attenzione nell'esecuzione di compiti; in particolare l'influenza della luce sulle prestazioni è maggiormente pronunciata al mattino e dopo un'ora dall'inizio dell'attività cognitiva [37].

Risultati simili sono stati ottenuti con un'esposizione quotidiana a un'illuminazione intensa e brillante (5300K) della durata di un'ora somministrata al mattino nella Stazione di Ricerca Halley in Antartide durante la stagione invernale, in cui il sole non supera l'orizzonte e l'illuminazione artificiale fornisce al massimo 800 lux : oltre a registrare cambiamenti nella fase circadiana e nel periodo di sonno, è stato riscontrato un miglioramento nelle prestazioni dei soggetti sia nei test riguardanti la velocità/accuratezza delle risposte sia in quelli riguardanti la memoria e l'attenzione [38].

Relativamente all'orario in cui l'esposizione alla radiazione luminosa risulta maggiormente efficace nell'influenzare i ritmi fisiologici e l'esecuzione dei compiti cognitivi, è stato recentemente evidenziato come non esista una condizione giornaliera oggettiva, ma l'efficacia dello stimolo

luminoso sia legata all'orario interno di ciascun individuo [39], ovvero a seconda del cronotipo ciascuno è maggiormente influenzabile dall'esposizione alla luce al mattino o nel pomeriggio [40].
Oltre all'efficacia delle sorgenti molto brillanti, vari studi sono stati condotti per studiare la sensibilità dell'essere umano a stimoli luminosi di differente lunghezza d'onda e/o a sorgenti con diversa Temperatura di Colore. La sperimentazione su soggetti affetti da SAD (Seasonal Affective Disorder - Disturbo Affettivo Stagionale) di trattamenti luminosi con stesso livello di illuminamento all'occhio (9000 lux) ma differente temperatura di colore (5000 K e 17000 K) ha indicato, in contrasto con studi precedenti, che le due condizioni luminose hanno la stessa capacità di diminuire lo stato depressivo dei pazienti e inoltre che un trattamento con la sorgente fredda della durata di 20 minuti è egualmente efficace di uno di 30 minuti con la stessa sorgente [41]. La possibile spiegazione data dagli autori rispetto a questa mancanza di effetto è che la massima risposta al trattamento luminoso è raggiunta molto velocemente e dunque un'esposizione maggiormente prolungata non ha effetto.
Al contrario, in uno studio sul trattamento dei disturbi di cui sono affetti i lavoratori notturni, la somministrazione della radiazione luminosa blu-verde (≈ 500 nm) durante la notte combinata con l'utilizzo di occhiali schermanti le stesse lunghezze d'onda durante il giorno sembra confermare la letteratura precedente nella capacità della luce ricca di radiazione blu di influenzare i parametri fisiologici e le capacità cognitive: i risultati segnalano nei partecipanti un incremento dello stato di vigilanza, una diminuzione negli errori e uno spostamento di fase nella secrezione di melatonina [42].
Indagini più strettamente legate alle capacità cognitive sono state condotte da J. Y. Park et al. (2013) che hanno studiato l'effetto di quattro scenari luminosi, differenti per temperatura di colore (3000 K e 7100 K) e illuminamento (150 lux e 700 lux), sull'attività celebrale [43]. In questo studio, l'analisi dei dati raccolti attraverso elettroencefalogramma durante lo svolgimento di test cognitivi ha rivelato un effetto sull'attività celebrale in termini di sforzo mentale legato alla differenza di illuminamento ma non rispetto alla variazione nella temperatura di colore della sorgente; ciò non si è però riverberato in un cambiamento, né in positivo né in negativo, nella prestazione. Al contrario, con l'utilizzo di uno scenario luminoso dedicato alla concentrazione (1060 lux e 5800 K), in un'aula scolastica sono stati registrati meno errori, una lettura più veloce e un livello di comprensione maggiore, rispetto a una classe con un'illuminazione definita convenzionale (300 lux e 4000 K) [44].
All'interno di questo scenario sperimentale, in cui è necessario approfondire con ulteriori studi lo scenario luminoso ottimale per facilitare la prestazione in compiti cognitivi, si inserisce l'attività di ricerca portata avanti dalla nostra equipe.

3 Materiali e metodi

3.1 Partecipanti

All'attività sperimentale hanno partecipato 44 studenti universitari (22 maschi, 22 femmine), di cui 16 laureati e 28 non laureati; l'età media delle donne era di 25,6 anni (D.S. = 3,87) e degli uomini era di 25,31 anni (D.S. = 4,85). Tutti i soggetti erano sani. Nessun partecipante aveva difetti di vista o laddove presenti utilizzavano lenti correttive. La composizione dei partecipanti è eterogenea, in quanto i soggetti, essendo stati reclutati nelle facoltà di Psicologia, Architettura e Ingegneria dell'Università "Sapienza" tra studenti e dottorandi dei corsi tenuti dagli autori, hanno formazione

differente; inoltre, essendo stati messi al corrente dell'oggetto di studio solamente alla fine del test, non hanno avuto informazioni che potessero avere alcuna influenza sul corretto svolgimento dell'esperimento.
La scelta dei soggetti è fondamentale per ottenere dei dati che diano responsi veritieri e non falsati in modo da produrre risultati attendibili sull'oggetto di studio: a questo scopo i ricercatori devono avvalersi di una selezione preliminare dei partecipanti, solitamente effettuata attraverso un'intervista telefonica o tramite contatto diretto, durante la quale ai volontari vengono poste domande su argomenti specifici, differenti a seconda del tipo di compiti da eseguire. Poiché nei test aventi a oggetto indagini di natura psicologica o riguardanti perfomance cognitive, come quello oggetto di questa ricerca, sono cause di esclusione l'uso di farmaci, lo svolgimento di lavoro notturno nell'ultimo anno, aver compiuto voli transmeridiani negli ultimi due mesi, sono stati scartati i volontari che presentavano tali caratteristiche.
I soggetti partecipanti al test hanno poi compilato un questionario di anamnesi, dichiarando di non essere consumatori abituali di alcol o droghe, di non avere mai avuto eventi lesivi di natura celebrale (traumi cranici, epilessia, attacchi ischemici ecc.), di non aver mai sofferto di disturbi psichiatrici (depressione, attacchi di panico, schizofrenia, disturbi della condotta alimentare ecc.), di non soffrire di diabete e di non assumere farmaci o psicofarmaci; inoltre ciascuno era stato precedentemente avvisato di non assumere, almeno nelle due ore precedenti l'esecuzione del test, caffè o alcolici, in quanto ciò avrebbe compromesso la prestazione (Tabella 1).

Tabella 1. Effetti sull'organismo umano della nicotina, caffeina, alcol e farmaci

	CAFFEINA	ALCOL	FARMACI
DOSE UNITARIA	americano: 71-220mg espresso: 60-100mg tazza di the: 32-42mg	birra a 4° (330ml): 10,5g bicchiere di vino a 12° (125ml): 12g superalcolico a 40° (40ml): 12,8g	6 categorie di psicotropi: antidepressivi, stimolanti, antipsicotici, stabilizzatori dell'umore, ansiolitici, depressivi (ipnotici, sedativi, anestetici), ognuno dei quali agisce su un neurotrasmettitore o neuroricettore del cervello
ASSORBIMENTO	dopo 45 minuti, metà vita media: 4,9 ore	dopo 30 minuti, metà vita media: 4 ore	dipende dal farmaco
EFFETTI SUL SISTEMA NERVOSO CENTRALE	stimolante	depressivo, inibisce l'attività dei neuroni, agendo come un sedativo	alterano la neurochimica e quindi il funzionamento del cervello
EFFETTI SU SIMPATICO E PARASIMPATICO	stimolante del simpatico	stimolante del parasimpatico	hanno forti effetti sul sistema simpatico e parasimpatico
EFFETTI SUL METABOLISMO	stimolante	depressivo	dipendono dal farmaco
EFFETTI SULLE PERFORMANCE	aumento dell'allerta e della lucidità del pensiero, maggiore attenzione e coordinazione fisica. A lungo andare peggiora l'apprendimento ippocampo dipendente e la memoria	in dosi moderate può attivare alcune aree del cervello (corteccia, ippocampo e nucleo accombente; a dosi maggiori compromette il pensiero e l'apprendimento motorio, dando problemi di equilibrio e di vista.	inducono mutamenti temporanei nella percezione, nella cognizione e nel comportamento
EFFETTI SULL'UMORE	può causare ansia e nervosismo	migliora l'umore	inducono mutamenti nell'umore
EFFETTI SUL RITMO SONNO / VEGLIA	inibisce l'adenosina, neurotrasmettitore coinvolto nel controllo del ciclo sonno-veglia e il cui accumulo porta sonnolenza. Per influire sul ritmo sonno veglia la dose deve essere <200mg	aumenta la componente alfa dell'EEG, legata alla fase di veglia rilassata	dipendono dal farmaco
NOTE	vasodilatatore	vasodilatatore	i contraccettivi orali hanno effetti ancora non studiati

Prima dell'inizio del test ciascun soggetto ha firmato il consenso informato, nel quale veniva dichiarato che lo studio a cui era in procinto di partecipare era stato approvato dalla commissione

etica del Dipartimento di Psicologia dell'Università Sapienza di Roma, ed era conforme con la Dichiarazione di Helsinki.

3.2 Ambiente sperimentale

Al fine di condurre un'attività di ricerca sulla risposta umana, a livello cognitivo e circadiano, a differenti condizioni luminose e ambientali, nel laboratorio di Illuminotecnica, situato all'interno del Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica dell'Università Sapienza di Roma, è stato disegnata e realizzata una cabina sperimentale, con struttura in alluminio e pannelli di cartongesso, di dimensioni 3,6 x 2,4 m e altezza 3 m (vedi figura 1). In particolare, il soffitto è fatto di pannelli rimuovibili in cartongesso di colore grigio e dimensioni 0,6 x 0,6 m, che possono essere facilmente sostituiti con plafoniere delle stesse dimensioni, il pavimento di mattonelle opache color verde scuro, mentre le pareti e la porta d'ingresso sono state rivestite con cartoncino nero, per evitare effetti indesiderati di riflessione luminosa; la cabina è priva di finestre, dunque la sperimentazione non è influenzata dall'apporto della luce naturale.

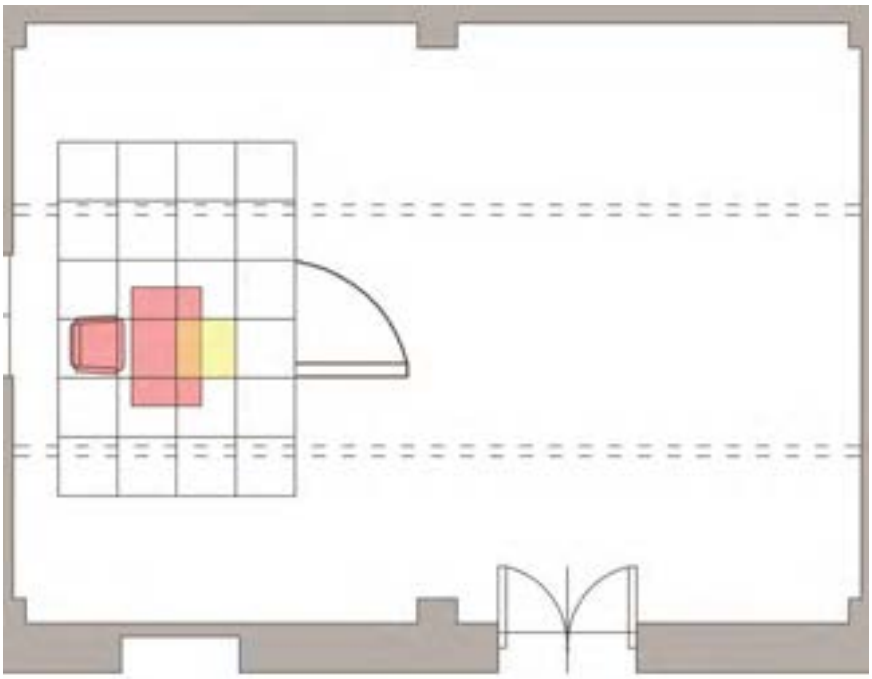

Figura 1. Progetto della cabina sperimentale e sua localizzazione all'interno del laboratorio di Illuminotecnica all'interno del Dipartimento DIAEE

La cabina è stata arredata con un tavolo da lavoro rivestito di materiale grigio opaco con una sedia e una postazione computer costituita da un tower sistemato sotto il piano del tavolo, un monitor da 18 pollici posto a circa 70 cm dall'operatore, una tastiera e un mouse posizionati nel centro del tavolo. Inoltre all'interno della cabina sono stati posizionati un termo-igrometro (DeltaOHM HD9216) per la misura della temperatura e della percentuale di umidità relativa dell'aria ad 1 metro da terra e una termo-camera (FLIR ThermaCAM B4), posizionata sul soffitto della cabina, per la misura della temperatura superficiale dei corpi, che sono stati utilizzati per il monitoraggio delle condizioni ambientali durante lo svolgimento dei test.

Nella sperimentazione sono state utilizzate due tipologie differenti di sorgenti luminose: nella condizione sperimentale vengono utilizzate le innovative sorgenti LED, i cui effetti sulla salute umana sono ancora sotto indagine, caratterizzate da una potenza totale di 43 W, un flusso luminoso di 3492 lm, una temperatura di colore di 4000 K e una resa cromatica 80; mentre nella

condizione di controllo sono in funzione le tradizionali lampade alogene da 53 W, che emettono un flusso luminoso di 850 lm con una temperatura di colore di 2800 K e una resa cromatica 100. (Tabella 2 e Tabella 3).

Tabella 2. Progetto di illuminazione nelle diverse fasi sperimentali

Tipologia	ALOGENA	LED
Potenza	53 W	36 x 1,2 W
Flusso luminoso	850 lm	3492 lm
Temperatura di colore	2800 K	4000 K
Indice di Resa Cromatica	100	80

Tabella 3. Progetto di illuminazione nelle diverse fasi sperimentali

	Sessione Base	Pausa	Sessione Test
GRUPPO SPERIMENTALE	lampade alogene	sorgente LED	sorgente LED
GRUPPO DI CONTROLLO	lampade alogene	lampade alogene	lampade alogene

Tutte le lampade sono posizionate sul soffitto, di fronte alla parte centrale del tavolo da lavoro, in modo da non creare abbagliamento o riflessioni sul monitor. Il LED, composto da 36 elementi da 1,2 W disposti su quattro file e contenuto in un apparecchio da incasso, occupa esattamente lo spazio di un pannello di cartongesso, mentre sei lampade alogene da 53 W sono disposte in modo equidistante tra loro lungo due lati del LED. L'ambiente sperimentale e la posizione delle sorgenti luminose sono mostrati in figura 2.

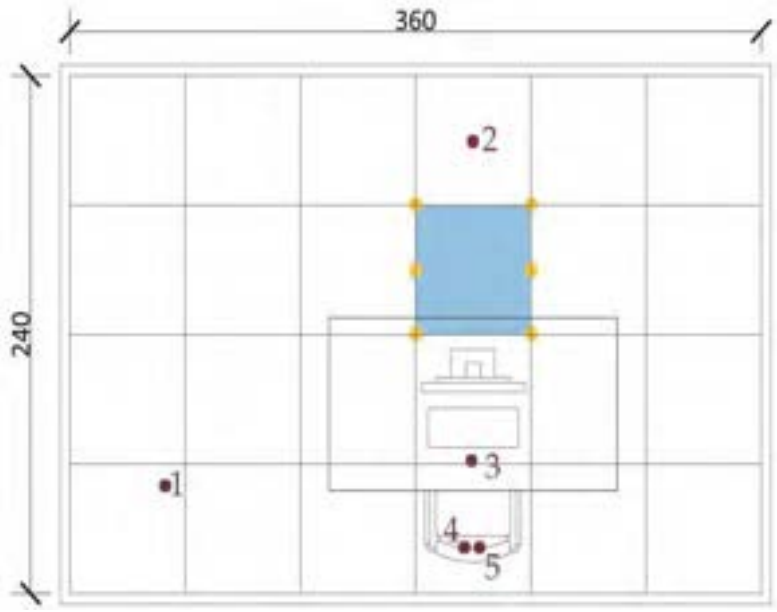

Figura 2. Posizione delle sorgenti all'interno della cabina sperimentale (alogene in giallo, LED in azzurro) e misure effettuate: termoigrometro (1), termocamera (2), illuminamento sul piano di lavoro (3), videoluminanzometro (4), illuminamento all'occhio (5)

L'ambiente luminoso, sia nella condizione sperimentale che in quella di controllo, è stato scrupolosamente controllato attraverso misurazioni di tipo fotometrico al fine di garantire il rispetto degli standard voluti dalla normativa UNI EN 12464-1 ed evitare situazioni di discomfort.
L'illuminamento all'altezza del piano di lavoro è stato misurato con un luxmetro lungo una griglia di punti distanti 0,2 m, ottenendo in entrambi gli scenari luminosi unEmed di circa 150 lux, e quali livelli di uniformità Emin/Emax = 0.8 e Emed/Emax = 0.9 con la sorgente LED, Emin/Emax = 0.7 e Emed/Emax = 0.8 con le lampade alogene (vedi figura 3).
È stato inoltre controllato l'illuminamento verticale a livello dell'occhio rilevando valori di circa 100 lux con le sorgenti alogene e circa 90 lux con il LED.

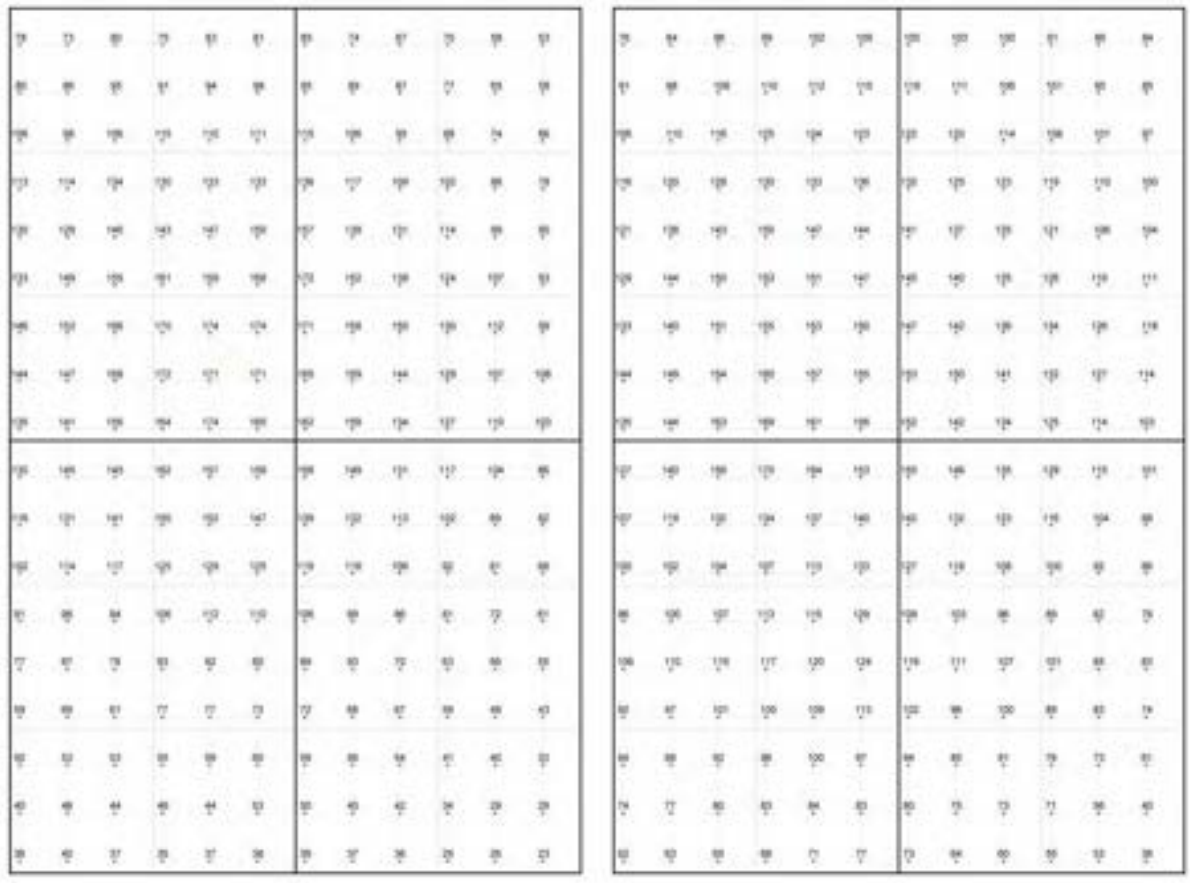

Figura 3. Valori di Illuminamento all'interno della cabina sperimentale misurati all'altezza del piano di lavoro, con sorgenti LED (sinistra) e con lampade alogene (destra)

La luminanza è stata misurata con un videoluminanzometro Techno Team LMK montato su una camera digitale reflex Canon EOS 550D che ha restituito immagini in falsi colori della distribuzione nell'intero campo visivo del soggetto (vedi figura 4 e figura 5).

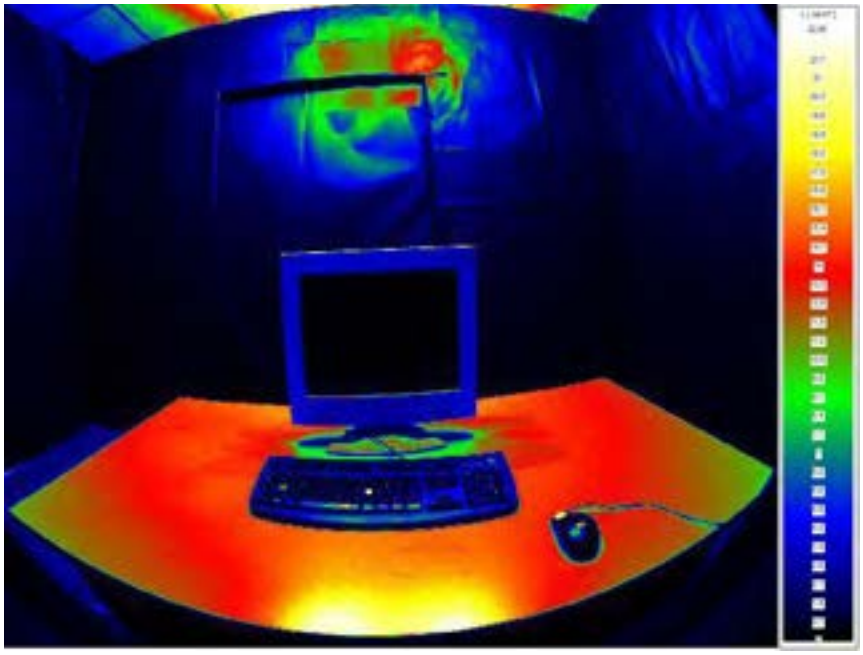

Figura 4. Distribuzione della luminanza in falsi colori con sorgenti alogene

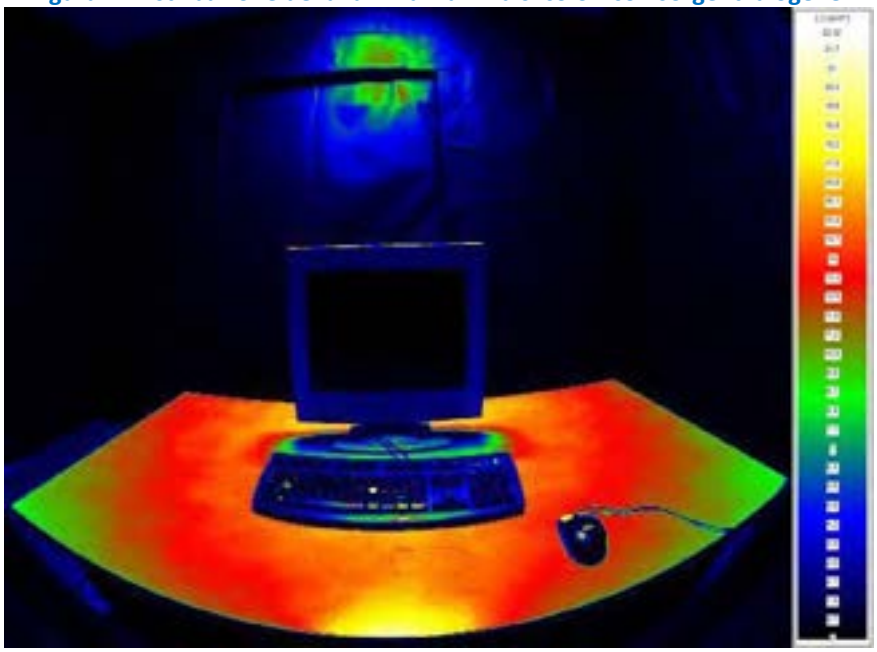

Figura 5. Distribuzione della luminanza in falsi colori con sorgenti LED

È stato inoltre misurato lo spettro delle sorgenti con uno spettrotadiometro JETI, Specbos 1211UV, con la finalità di controllare la loro distribuzione spettrale e in particolare la componente blu della sorgente LED. Come si può notare confrontando le figure 6 e 7 lo spettro della lampada alogena ha un andamento crescente che presenta una piccola percentuale di emissione nelle lunghezze d'onda corte (blu) e una grande percentuale nelle lunghezza d'onda lunghe (rosso), mentre il LED presenta due picchi, uno nel blu tra 400 e 450 nm e uno nel giallo-arancio tra 580 e 630 nm, con un'emissione contenuta nel rosso oltre i 680 nm. Questa diversità nella distribuzione spettrale comporta differenze nella natura della luce emessa, i cui effetti sull'uomo sono ad oggi sotto indagine.

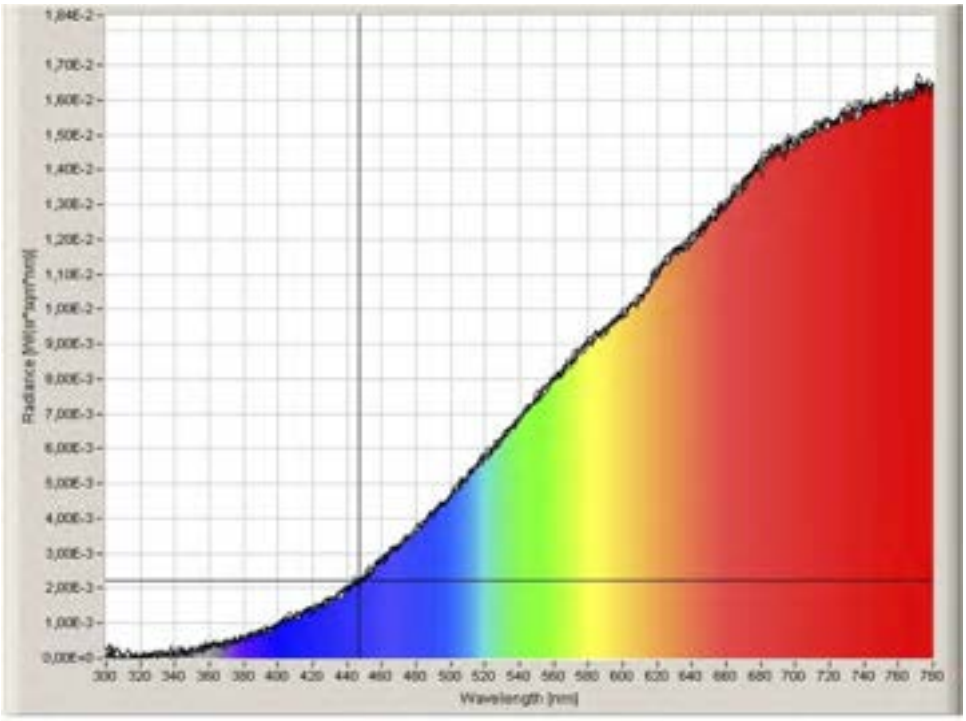

Figura 6. Distribuzione spettrale delle sorgenti alogene

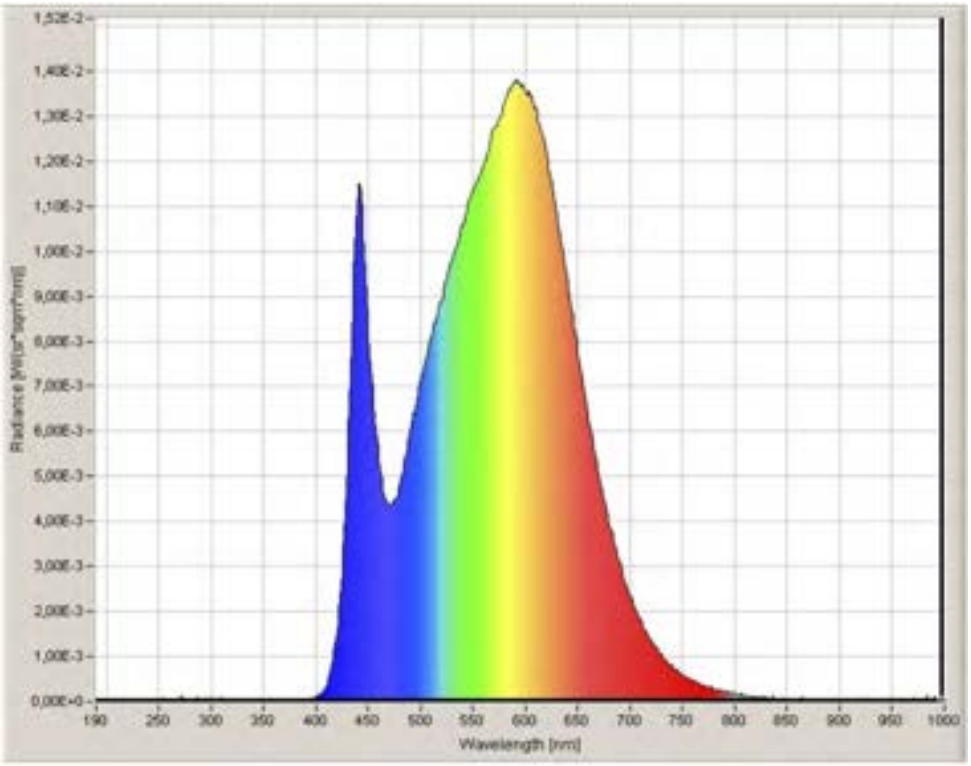

Figura 7. Distribuzione spettrale delle sorgenti LED

3.3 Compiti cognitivi

I soggetti, sia nel gruppo sperimentale che in quello di controllo, hanno eseguito i seguenti compiti, anche se non nello stesso ordine.

- Il test di Associazione Simboli-Numeri è un sub-test della WAIS-R [45] che è stato somministrato ai partecipanti per controllare che i due gruppi, sperimentale e di controllo, non presentassero differenze in termini di velocità di elaborazione di dati. Esso si presenta in formato cartaceo come una sorta di cifrario, con caselle doppie posizionate in cima al foglio, all'interno delle quali sono rappresentate 9 paia di simboli-numeri, e al di sotto di esse quattro righe con doppie caselle nelle quali sono scritti soltanto i numeri (Figura 8). I soggetti devono compilare quante più caselle riescono, entro un tempo limite di 90 secondi, associando i simboli ai numeri corrispondenti; in un secondo momento viene contato il numero di associazioni corrette.

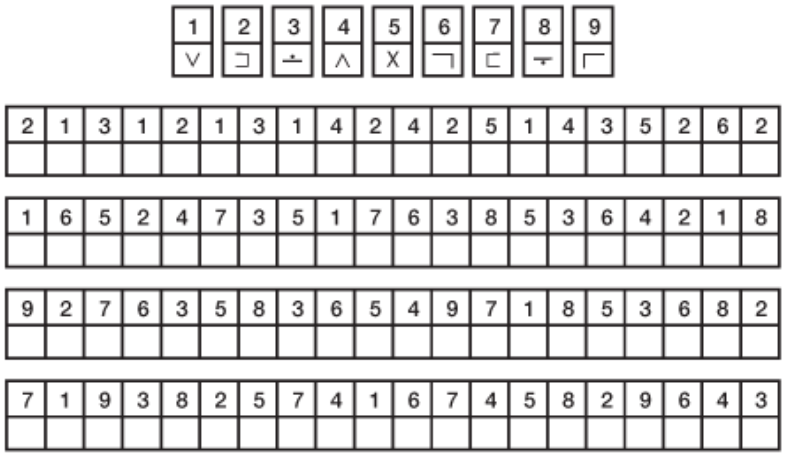

Figura 8. Esempio di test di Associazione Simboli-Numeri

- Il test di Rotazione Mentale (ROT) è un sub-test della batteria di test di visualizzazione spaziale Purdue [46], di cui è stata utilizzata la versione computerizzata realizzata appositamente (SuperLab Pro version 4.0 - Cedrus Corporation, San Pedro, CA). Sul monitor del computer si susseguono una serie di schermate, in ciascuna delle quali compaiono due solidi irregolari, il target e un solido da confrontare mentalmente con esso; a seconda della schermata, i solidi da confrontare possono essere differenti o uguali al target anche se vengono presentati ruotati su uno degli assi. Ai partecipanti viene chiesto di confrontare mentalmente il target con il solido ruotato e di decidere se sono lo stesso solido o no: per eseguire questo compito essi devono usare i due tasti del mouse, sui quali sono evidenziate le parole SI o NO, cercando di rispondere il più velocemente e accuratamente possibile (vedi figura 9). La schermata successiva compare a seguito della risposta oppure dopo un tempo di 500 ms se il soggetto non risponde.
Il mouse è posizionato orizzontalmente di fronte al soggetto in corrispondenza del suo asse di simmetria, mentre la mano non usata per rispondere è poggiata aperta sul tavolo; inoltre i partecipanti vengono istruiti a non compiere movimenti col corpo per aiutarsi nella risposta durante la sessione.
Il software che gestisce la sequenza delle schermate permette anche di memorizzare l'esattezza delle risposte e il tempo impiegato per darle con una precisione di 1 ms.

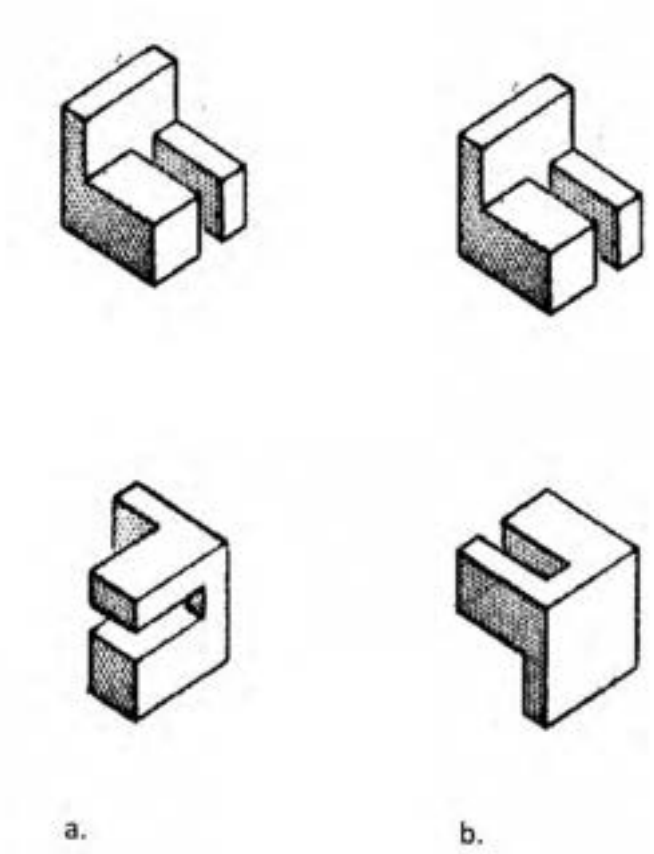

Figura 9. Test di Visualizzazione delle Rotazioni: esempio di solidi uguali (a), esempio di solidi differenti (b)

Nel paradigma di Task Switching (Cambio di Compito Volontario) [47] ai partecipanti viene somministrata una sessione composta di 340 prove, presentate loro sul monitor del computer in schermate successive. In ciascuna schermata viene visualizzata una figura geometrica con dentro un numero colorato e al soggetto viene chiesto di eseguire uno dei seguenti compiti a seconda della figura geometrica che compare sullo schermo: in caso di quadrato, giudicare se il numero al suo interno è pari o dispari, in caso di rombo, indicare se il numero è maggiore o minore di 5 (il 5 non appare mai) o, in caso di cerchio, ricordarsi il colore del numero, per poi decidere in seguito, quando a schermo compare solo un numero colorato senza figura geometrica se il colore di questo secondo numero (B') è uguale o diverso dal colore del numero (B) contenuto nella circonferenza (vedi figura 10).
I soggetti partecipanti rispondono cliccando i tasti "A" o "L" della tastiera con il dito indice destro o sinistro: useranno la lettera "A" con l'indice sinistro se la risposta è numero dispari, minore di 5 o colore diverso, e la lettera "L" con l'indice destro quando la risposta è numero pari, maggiore di 5 o colore uguale.

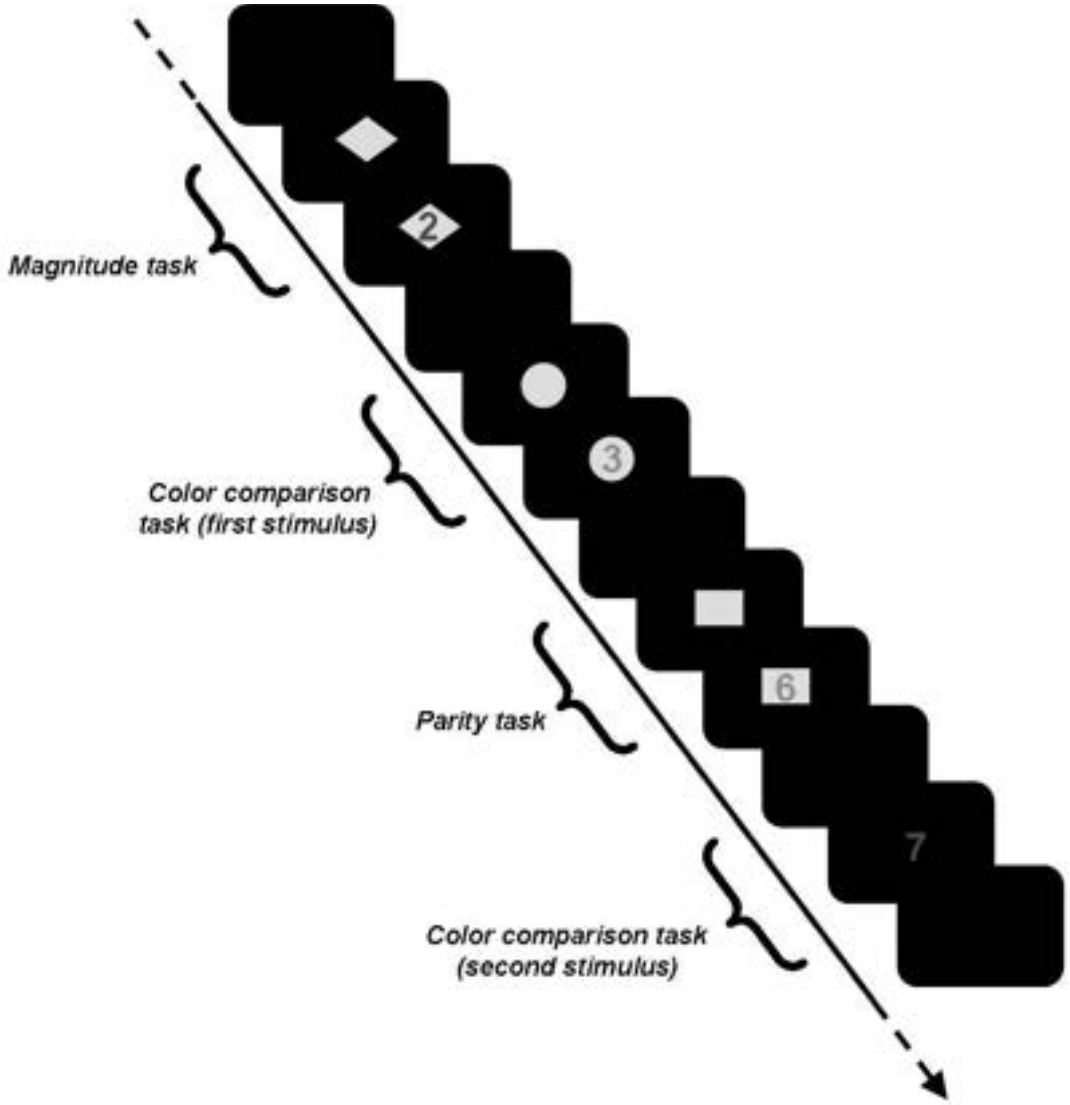

Figura 10. Test di Commutazione del Compito

Tutte le figure geometriche, indici del compito da eseguire, compaiono al centro dello schermo in grigio su fondo nero, sotto un angolo visivo approssimativamente di 7° di larghezza e 7° di altezza, inizialmente senza numero. Dopo 1000 ms sulla figura geometrica grigia appare un numero compreso tra 1 e 9 (tranne il 5) che può essere colorato in rosso o verde con eguale probabilità.
Nei due compiti pari/dispari e maggiore/minore, sia la figura che il numero rimangono sullo schermo finché non è data una risposta o non sono trascorsi 3000 ms, mentre nel compito di confronto del colore il primo stimolo (B), cioè il numero colorato nella circonferenza, rimane sullo schermo per 1000 ms e il secondo stimolo (B'), ovvero il numero su sfondo nero, rimane sullo schermo finché non è data una risposta o non sono trascorsi 3000 ms. Una volta data la risposta o trascorso il tempo di permanenza dello stimolo, lo schermo rimane nero per 700 ms, trascorsi i quali compare una nuova figura geometrica grigia, indice del nuovo compito da eseguire; soltanto nel caso del confronto di colore, il secondo stimolo (B'), appare sullo schermo nero senza essere preceduto da alcuna figura geometrica grigia, perché l'indice del compito da eseguire è lo stimolo B, comparso in precedenza. Lo stimolo B' non compare mai di seguito allo stimolo B, ma uno o più compiti sono frapposti tra di essi, in funzione della sequenza in cui i compiti vengono presentati.
Le prove da eseguire sono presentate secondo 3 sequenze, ordinate in modo casuale, secondo serie alternate, serie non alternate e serie ripetitive. Nelle serie non alternate, vengono proposte

le tre differenti prove secondo la sequenza C-B-A-B', ad esempio: pari/dispari-memorizzazione del colore-maggiore/minore-confronto del colore, oppure maggiore/minore-memorizzazione del colore-pari/dispari-confronto del colore; nelle serie alternate lo stesso compito viene proposto nella prima e nell'ultima prova secondo la sequenza A-B-A-B', ad esempio: pari/dispari-memorizzazione del colore-pari/dispari-confronto del colore; nelle serie ripetitive lo stesso compito è proposto in tre prove consecutive secondo la sequenza A-A-A, ad esempio pari/dispari-pari/dispari-pari/dispari oppure maggiore/minore-maggiore/minore-maggiore/minore. Ai partecipanti sono state presentate 34 serie alternate, 34 serie non alternate e 17 serie ripetitive secondo un ordine casuale in modo che i soggetti non si rendessero conto dell'ordinamento seriale delle prove.
Presentare le prove secondo le serie serve per valutare la "Backward Inhibition" (inibizione all'indietro) e il "Switch Cost" (costo di cambiamento), due meccanismi mentali connessi all'esecuzione di compiti cognitivi: la "Backward Inhibition" viene calcolata in termini di differenza tra i tempi medi di reazione tra la sequenza A-B-A della serie alternata e la sequenza C-B-A della serie non alternata, mentre il "Switch Cost" viene calcolato come differenza tra i tempi di reazione della terza prova tra la serie ripetitiva A-A-A e la serie non alternata C-B-A. Il software che gestisce la sequenza delle schermate permette anche di memorizzare l'esattezza delle risposte e il tempo impiegato per darle con una precisione di 1 ms.
- Il NASA-TLX (NASA-Task Load Index) è fornito ai partecipanti in formato cartaceo e consiste di un questionario composto da sei domande a cui si risponde attraverso scale bipolari. Al soggetto viene chiesto di autovalutare la sua prestazione considerando sei diversi aspetti: Richiesta Mentale, Richiesta Fisica, Richiesta Temporale, Prestazione, Sforzo e Frustrazione; una descrizione delle sei domande è data da Harte Staveland [48]. La risposta va data compilando per ciascuna domanda una scala likert a dieci punti, ai cui estremi sono i due opposti buona-scadente in riferimento alla prestazione e bassa-alta negli altri casi (Figura 11).

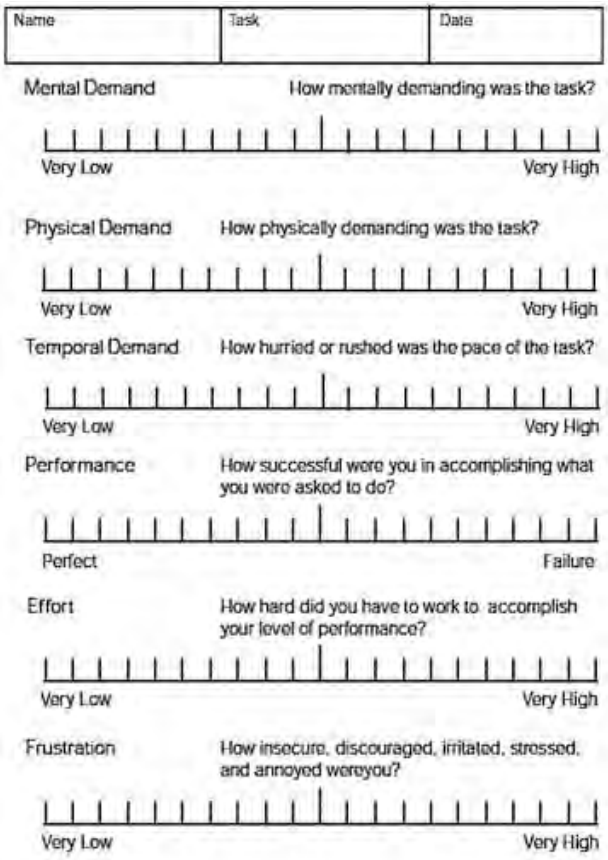

Figura 11. Esempio di NASA-TLX

Il questionario viene fatto compilare ai partecipanti alla fine di ciascuna delle due sessioni sperimentali di cui è composto questo studio e poi viene analizzato in un secondo momento per valutare le risposte in ordine al tasso su ogni scala e al tasso medio.

3.4 Procedura

Prima di iniziare il test ai partecipanti è stata spiegata la procedura generale dell'esperimento ed è stato fatto loro leggere e firmare il consenso informato; successivamente ciascuno di loro è stato assegnato in modo casuale al gruppo sperimentale o al gruppo di controllo, in modo che in ciascun gruppo ci fosse un numero uguale di maschi e femmine. Per entrambi i gruppi la prova è stata suddivisa in due sessioni (di base e test) durante ciascuna delle quali i soggetti eseguivano le prove sperimentali, il test di Rotazione Mentale (ROT) e Task Switching, presentati in quest'ordine o in ordine inverso allo stesso numero di soggetti; tra le due sessioni intercorrevano 20 minuti di pausa durante i quali ai partecipanti è stato chiesto di compilare il questionario NASA-TLX, il test di Associazione Simboli-Numeri e il questionario di anamnesi (Tabella 4).

Tabella 4. Procedura sperimentale: compiti eseguiti durante le varie fasi con le relative tipologie di illuminazione

	Sessione Base		Pausa	Sessione Test	
Prove	PROVA 1	PROVA 2	NASA-TLX ASSOCIAZIONE SIMBOLI-NUMERI ANAMNESI	PROVA 1	PROVA 2
Gruppo sperimentale	SORGENTI ALOGENE	SORGENTI ALOGENE	SORGENTI ALOGENE	SORGENTI ALOGENE	SORGENTI ALOGENE
Gruppo di controllo	SORGENTI ALOGENE	SORGENTI ALOGENE	SORGENTI LED	SORGENTI LED	SORGENTI LED

Il gruppo di controllo ha eseguito sia la sessione di base che la sessione di test, nonché la pausa, con l'illuminazione delle sole lampade alogene, mentre il gruppo sperimentale ha eseguito la sola sessione di base con le sorgenti alogene: all'inizio della pausa è stato modificato lo scenario luminoso con l'accensione della sorgente LED e lo spegnimento delle lampade alogene, sfruttando così i 20 minuti di pausa come tempo di adattamento alla nuova illuminazione. Al fine di valutare gli effetti delle nuove sorgenti LED sulle capacità cognitive, il gruppo sperimentale ha poi eseguito la sessione di test con l'illuminazione di queste lampade. L'intero esperimento ha una durata minima di circa 90 minuti, variabile in funzione del tempo impiegato dal singolo soggetto a dare le risposte nelle singole prove.
Durante lo svolgimento dell'intero esperimento sono stati rilevati i dati ambientali, con la finalità di monitorare il cambiamento delle condizioni all'interno della cabina sperimentale durante l'esecuzione delle prove: all'inizio e alla fine dell'esperimento, al termine di ogni singolo test e al termine della pausa, sono state prese le misure di temperatura e umidità relativa dell'aria, mentre durante lo svolgimento dei test e alla fine dell'esperimento sono state eseguite misure termografiche per misurare la temperatura superficiale del soggetto.

4 Risultati

4.1 Test di Associazione Simboli-Numeri

I punteggi ottenuti al test di Associazione Simboli-Numeri sono stati analizzati attraverso un'ANOVA per controllare che il gruppo sperimentale e il gruppo di controllo non differissero nel numero di item correttamente associati nel lasso di tempo previsto dal test. Dall'analisi non sono emerse differenze significative nel numero di risposte corrette date dai componenti dei due gruppi ($F_{1,36}$=0,01; p=0,91).

4.2 Test di Rotazioni Mentali (ROT)

Per ogni partecipante è stata calcolata la media del Tempo di Risposta (TR), considerando soltanto le prove in cui è stata data una risposta corretta con un tempo di risposta compreso all'interno dell'intervallo di 2 deviazioni standard sopra e sotto la media.
Sia la velocità (TR) che l'accuratezza sono state analizzate in un disegno ANOVA considerando il Gruppo (sperimentale vs controllo) e la sessione (base, test) come fattori (Tabella 5). Per quanto concerne la velocità i risultati hanno evidenziato un effetto marginalmente significativo legato alla

Sessione ($F_{1,36}$=3,95; p=0,05) dovuto al fatto che i partecipanti erano più veloci nella sessione test che nella sessione base; non sono invece stati rilevati effetti significativi legati al Gruppo ($F_{1,36}$=0,15; p=0,70) e all'interazione Gruppo x Sessione ($F_{1,36}$=0,23; p=0,64). Anche se l'interazione Gruppo x Sessione non era significativa, è bene notare che i valori di TR dei soggetti del gruppo sperimentale erano migliori, rispetto a quelli del gruppo di controllo, nella sessione test messa a confronto con la sessione base: la mancanza di un effetto significativo è probabilmente dovuto alla grande variabilità nei tempi di risposta.
I risultati sull'accuratezza non mostrano differenze significative tra i Gruppi ($F_{1,36}$=0,21; p=0,65), ma vi sono differenze per la Sessione ($F_{1,36}$=11,14; p=0,00) e per l'interazione Gruppo x Sessione ($F_{1,36}$=5,21; p=0,03). Un'analisi dei post hoc (Test di Duncan) ha evidenziato che i partecipanti sono più accurati durante la sessione test. L'interazione Gruppo x Sessione mette in evidenza che solo i partecipanti del gruppo sperimentale migliorano la loro accuratezza nella sessione sperimentale (Test di Duncan: p=0,00), mentre l'accuratezza del gruppo di controllo non varia tra la base e la sessione test (p=0,46).

Tabella 5. Test di Rotazioni Mentali: tempi di risposta (ms) ed accuratezza nei gruppi sperimentale e di controllo nelle sessioni base e test

		TEMPO DI RISPOSTA (ms)	ACCURATEZZA
GRUPPO SPERIMENTALE	base	9175.01	33.20
	test	7572.03	37.35
GRUPPODI CONTROLLO	base	9266.77	35.72
	test	8283.40	36.50

4.3 Test di Task Switching

I partecipanti hanno eseguito il Task Switching commettendo meno del 5% di errori nella terza risposta di ogni sequenza, evidenziando così una buona performance.
Abbiamo eseguito delle analisi sugli effetti della Backward Inhibition (differenza tra i tempi di reazione alle serie alternate e alle serie non alternate) e dello Switch Cost (differenza tra i tempi di reazione alle serie ripetitive e alle serie non alternate) considerando solo le prove in cui i partecipanti hanno risposto correttamente con un tempo di reazione compreso all'interno dell'intervallo di 2 deviazioni standard sopra e sotto la media.
Sia la Backward Inhibition che lo Switch Cost sono stati analizzati mediante un'ANOVA Gruppo (sperimentale, controllo) per Sessione (base, test) (Tabella 6). I risultati dell'analisi sulla Backward Inhibition hanno mostrato un'interazione significativa Gruppo x Sessione ($F_{1,36}$=6,36; p=0,016), ma non sono emersi effetti principali per la Sessione ($F_{1,36}$=2,9; p=0,09) o per il Gruppo ($F_{1,36}$=3,4; p=0,07), come mostrato in figura 12.

Tabella 6. Test di Task Switching: tempi di risposta (ms) dello Switch Cost e della Backward Inhibition nei gruppi sperimentale e di controllo nelle sessioni base e test

		SWITCH COST (ms)	BACKWARD INHIBITION(ms)
GRUPPO SPERIMENTALE	base	4.93	21.28
	test	19.14	-17.53
GRUPPODI CONTROLLO	base	3.68	20.62
	test	20.92	28.14

La scomposizione dell'interazione Gruppo x Sessione condotta mediante confronti pianificati ha mostrato che per i soggetti appartenenti al gruppo di controllo non si riscontrano differenze significative negli effetti della Backward Inhibition tra la sessione base e la sessione test (F<1), mentre per i soggetti partecipanti del gruppo sperimentale sono stati registrati effetti della Backward Inhibition sostanzialmente minori (quasi nulli) durante la sessione test rispetto alla sessione di base ($F_{1,36}$=9,42; p=0,004; Eta2 parziale =0,21).
L'analisi dello Switch Cost non ha mostrato significativi effetti del Gruppo o della Sessione (F<1 in entrambi i casi) né una interazione significativa tra Gruppo e Fase ($F_{1,36}$=1,45; p=0,24).

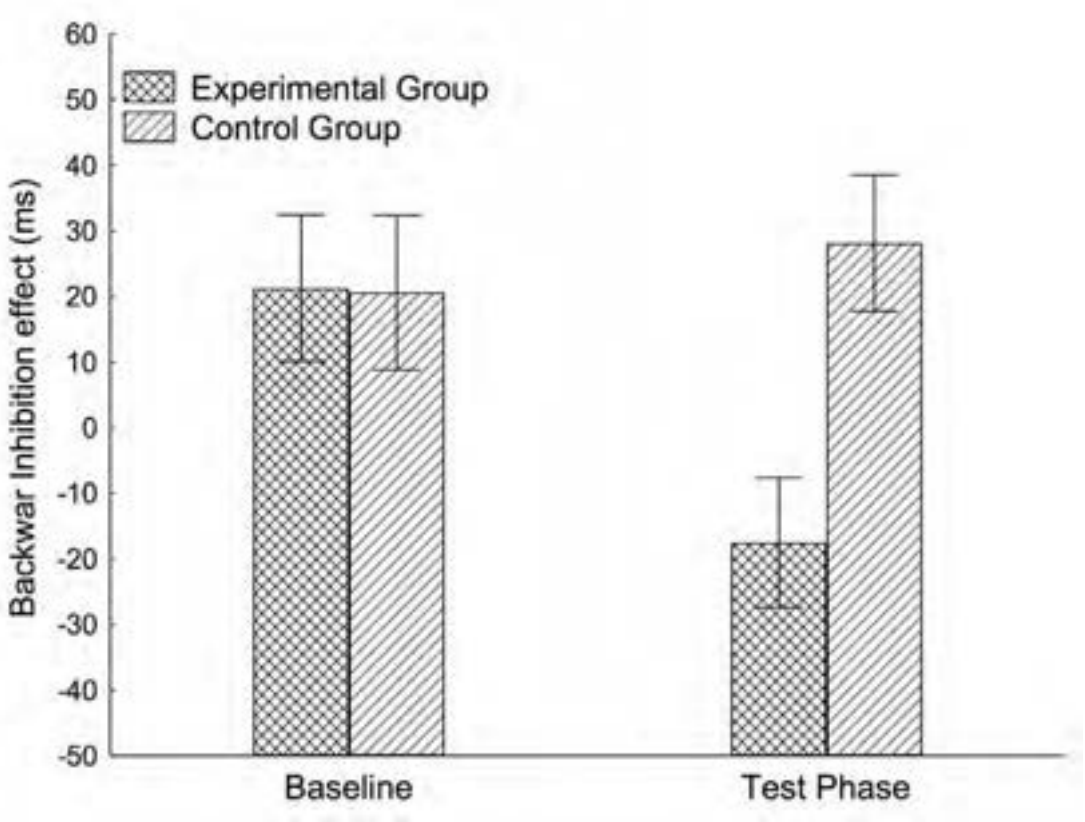

Figura 12. Confronto della Backward Inhibition tra gruppo sperimentale e gruppo di controllo

4.4 Il NASA-Task Load Index (TLX)

Sia il punteggio globale che i punteggi delle singole domande del NASA TLX sono stati analizzati mediante un disegno ANOVA Gruppo (sperimentale e controllo) per Sessione (base e test). Per quanto riguarda il punteggio globale l'analisi non ha evidenziato effetti significativi per la Sessione ($F_{1,36}$=4,10; p=0,05), per il Gruppo ($F_{1,36}$=0,03; p=0,85) e per l'interazione Gruppo x Sessione ($F_{1,36}$=1,96; p=0,17).
Analizzando i singoli punteggi attribuiti alle singole domande del NASA-TLX si evidenzia un effetto principale della Sessione solo per la Richiesta Mentale, la Richiesta Fisica e la Richiesta Temporale (rispettivamente: $F_{1,36}$=8,68; p=0,005; Eta2 parziale=0,19 - $F_{1,36}$=15,48; p=0,0003; Eta2 parziale =0,30 - $F_{1,36}$=8,20; p=0,007; Eta2 parziale =0,18). Tutti i partecipanti hanno giudicato le richieste Mentale e Temporale inferiori nella sessione test che nella sessione base, mentre la richiesta Fisica è stata ritenuta maggiore durante la sessione test che nella sessione base; al contrario, i giudizi sulla Prestazione, sullo Sforzo e sulla Frustrazione non variano tra sessione di base e sessione test

(p>0,05 in tutti i casi). L'analisi dei punteggi non evidenzia alcun effetto principale del Gruppo o di interazione Gruppo per Sessione in nessuna delle sei domande del NASA TLX (p>.05 in tutti i casi).

4.5 Rilievi ambientali

Le misurazioni della temperatura dell'aria effettuate all'interno della cabina sperimentale mostrano, come prevedibile, un cambiamento dei valori con il procedere dell'esperimento; l'andamento derivante dall'analisi dei valori medi delle sette misurazioni effettuate varia tra i due gruppi (vedi figura 13): nel caso del gruppo sperimentale le temperature crescono durante la sessione base (T1=22,9 °C; T2=24 °C) per raggiungere un picco (T3=24,4 °C) alla fine della seconda prova per poi scendere gradualmente durante la pausa (T4=23,8 °C) e stabilizzarsi nel corso della sessione test (T5=23,6 °C; T6=23,4 °C; T7=23,5 °C), mentre nel caso del gruppo di controllo, i valori di temperatura seguono lo stesso andamento del gruppo sperimentale nella sessione base (T1=24,6 °C; T2=25,5 °C; T3=25,9 °C), ma poi continuano a crescere gradualmente sia nel corso della pausa (T4=26,1 °C) che durante la sessione test (T5=26,2 °C; T6=26,2 °C; T7=26,3 °C).

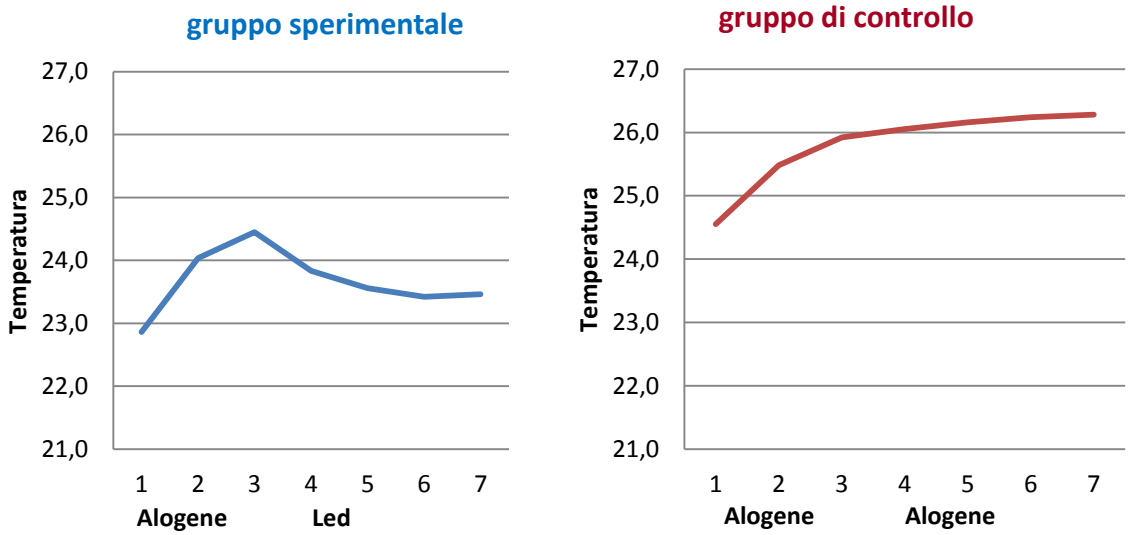

Figura 13. Temperatura dell'aria durante lo svolgimento dell'esperimento

Anche le misurazioni di umidità relativa (%) mostrano un cambiamento dei valori con il procedere dell'esperimento e, anche in questo caso, l'andamento derivante dall'analisi dei valori medi delle sette misurazioni effettuate varia tra i due gruppi (vedi figura 14): nel caso del gruppo sperimentale i valori di umidità relativa misurati crescono lentamente nel corso delle due prove base (UR1=29,1%; UR2=29,2%; UR3=29,3%), subiscono un repentino aumento durante i 20 minuti di pausa (UR4=30,5%), per poi stabilizzarsi nel corso di tutta la sessione test (UR5=30,7%; UR6=30,7%; UR7=30,6%;); mentre nel caso del gruppo di controllo la percentuale di umidità relativa presente all'interno della cabina diminuisce molto gradualmente durante il corso dell'intero esperimento, sia nella sessione base (UR1=37,4%; UR2=36,9%; UR3=36,7%) che nella sessione test (UR5=36,3%; UR6=36,2%; UR7=36,1%;), ma anche durante la pausa (UR4=36,4%).

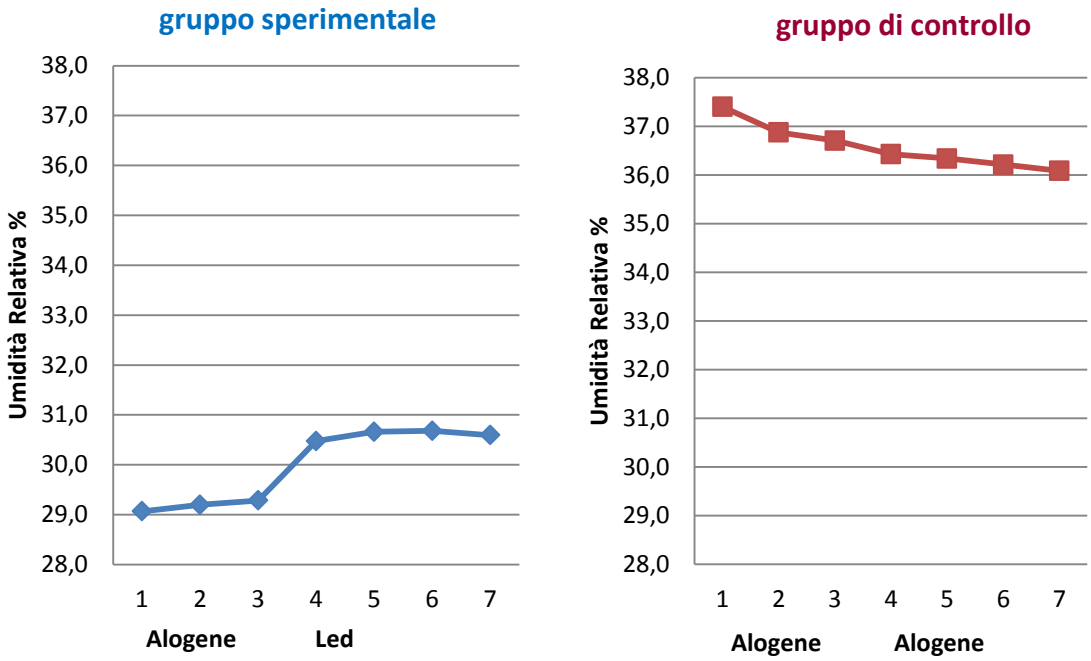

Figura 14. Umidità relativa durante lo svolgimento dell'esperimento

Sul soggetto sono state effettuate misure di termografia durante lo svolgimento di ciascuna prova e alla fine dell'intero esperimento per rilevare il cambiamento di temperatura superficiale della persona durante lo svolgimento del test. Le immagini termografiche (figure 15 e 16) mostrano un cambiamento della temperatura in più punti del corpo, che non sembra essere legato alle variazioni dei due parametri ambientali, temperatura e umidità relativa dell'aria. Ulteriori misure andranno effettuate per comprendere se la differenza di spettro luminoso implichi un differente impegno dei soggetti, e se la variazione di temperatura corporea sia influenzata, e in quale misura, dall'impegno e dall'effetto di stanchezza che sopraggiunge negli individui col procedere dell'esperimento.

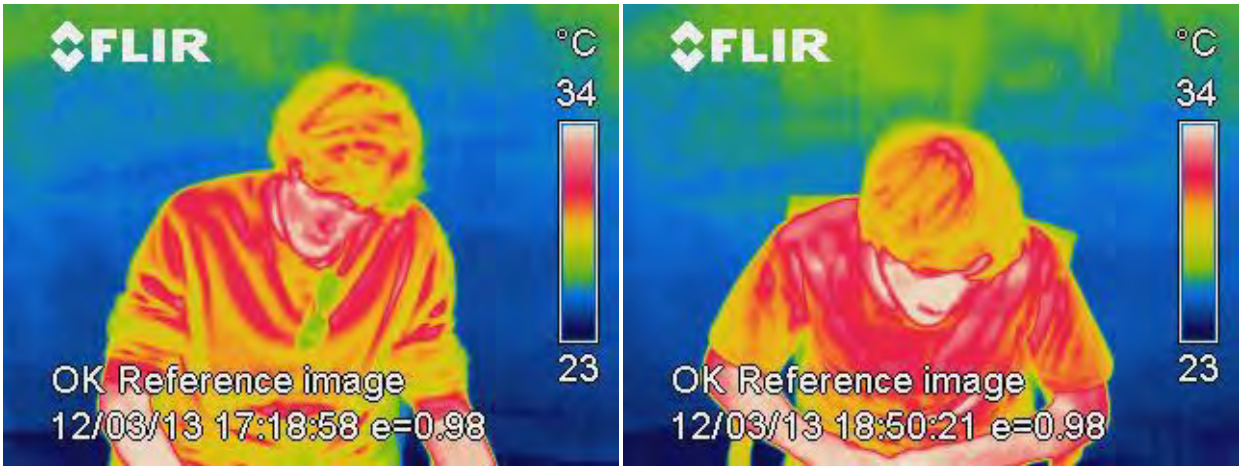

Figura 15. Immagini termografiche di un soggetto del gruppo di controllo durante lo svolgimento della prima prova (sinistra) e alla fine dell'esperimento (destra)

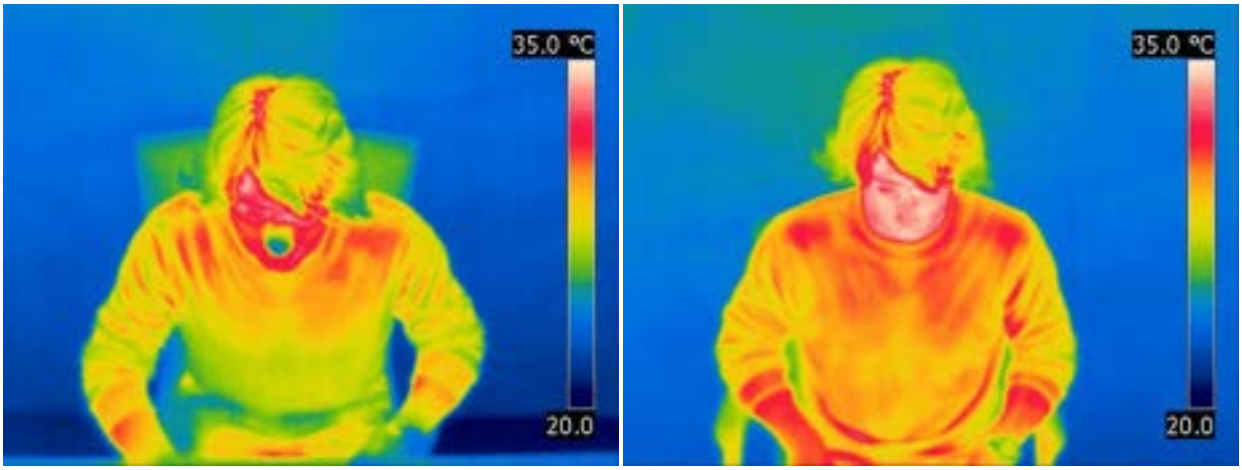

Figura 16. Immagini termografiche di un soggetto del gruppo sperimentale durante lo svolgimento della prima prova (sinistra) e alla fine dell'esperimento (destra)

5 Discussione e conclusioni

L'obiettivo del lavoro esposto è quello di investigare se le sorgenti luminose con una elevata componente spettrale nelle lunghezze d'onda del blu influenzino in qualche modo le funzioni cognitive negli individui sani. Lo studio è stato portato avanti in un ambiente appositamente disegnato per tale scopo e pienamente controllato dal punto di vista luminoso. Il monitoraggio ambientale effettuato durante lo svolgimento dell'intero esperimento, mediante rilievi di temperatura e di umidità relativa dell'aria, mostra che i parametri ambienti si modificano con andature differenti nei due gruppi (sperimentale e di controllo), facendo intuire un effetto indiretto differente delle due sorgenti sulla qualità dell'aria della cabina, effetto a tutt'oggi ancora da esaminare, valutare ed approfondire, anche in relazione alle risposte ottenute dalle misure termografiche eseguite.

Ulteriori esperienze sperimentali sono inoltre necessarie per stabilire se un'elevata percentuale di radiazione blu nello spettro di una sorgente abbia la capacità di influenzare il livello di sforzo cognitivo necessario per eseguire un determinato compito cognitivo.

Dai risultati si evince che l'esposizione alla radiazione blu incide sulle prestazioni umane, nell'esecuzione di compiti complessi riguardanti le funzioni esecutive e le capacità visuo-spaziali. Infatti, quando i partecipanti hanno dovuto decidere se due oggetti visti secondo differenti prospettive (ruotati lungo un asse) fossero uguali o diversi (test di Rotazione Mentale), sono stati significativamente più accurati, fornendo un maggior numero di risposte corrette, dopo 20 minuti di esposizione a una illuminazione contenente una elevata percentuale di radiazione blu piuttosto che nelle normali condizioni di luce di sorgenti alogene. La dimostrazione di ciò risiede nel fatto che i soggetti appartenenti al gruppo di controllo, che hanno eseguito lo stesso compito cognitivo per due volte con lampade alogene, non hanno mostrato gli stessi risultati: quindi il miglioramento riscontrato nel gruppo sperimentale non è dovuto all'effetto di apprendimento per ripetizione dello stesso compito.

Mentre il fatto che entrambi i gruppi, sia sperimentale che di controllo, siano stati più veloci durante la sessione test rispetto alla sessione base è sicuramente dovuto a un effetto di apprendimento; i partecipanti del gruppo sperimentale hanno comunque mostrato un miglioramento nella velocità delle proprie reazioni maggiore rispetto ai soggetti del gruppo di controllo: probabilmente l'assenza di un effetto consistente sui tempi di risposta è imputabile alla elevata variabilità dei dati raccolti.

Anche nel Task Switching le prestazioni sono influenzate dall'esposizione a un'illuminazione con forte concentrazione di radiazione blu. Il gruppo sperimentale infatti presenta una riduzione nell'effetto della Backward Inhibition durante la sessione test rispetto alla sessione base, mentre i soggetti appartenenti al gruppo di controllo non mostrano differenze tra le due sessioni. La Backward Inhibition è un processo inibitorio delle funzioni esecutive ed è considerato uno dei meccanismi che riduce l'interferenza tra le molteplici rappresentazioni mentali dei compiti e per questo risulta facilitata l'esecuzione di un nuovo compito. Il dato più interessante che emerge in questo studio è che la riduzione di efficacia della Backward Inhibition non sia associata a un aumento dello Switch Cost: precedenti studi [49] sull'effetto dello stress cronico sulle funzioni esecutive hanno riscontrato che, durante 520 giorni di isolamento e reclusione, la Backward Inhibition diminuisce e lo Switch Cost aumenta, confermando la relazione inversa tra i due meccanismi. Mentre, i risultati del presente lavoro indicano che l'esposizione a un'elevata percentuale di radiazione blu aumenta la capacità del sistema cognitivo di elaborare la rappresentazione di molteplici attività, che rimangono attive (ossia non inibite) simultaneamente senza interferire con il compito successivo. Va notato che l'effetto di esposizione a un'illuminazione con elevata composizione spettrale nel blu, benché di dimensioni moderate, potrebbe avere rilevanti conseguenze pratiche, come quella di aumentare il livello di attenzione e facilitare l'esecuzione di alcuni compiti in professioni, come il chirurgo o il pilota, in cui un piccolo errore può comportare situazioni di rischio.

In questo studio, l'effetto dell'esposizione a una illuminazione con elevata composizione di lunghezze d'onda corte sulle funzioni esecutive e sulle abilità visuo-spaziali non può essere spiegato facendo ricorso a differenze tra i due gruppi nella velocità di elaborazione o nella generale riduzione di impegno mentale associato ai compiti cognitivi, in quanto i soggetti del gruppo sperimentale e del gruppo di controllo non hanno mostrato differenze nell'esecuzione del test di Associazione Simboli-Numeri; inoltre lo sforzo mentale complessivo e l'impegno richiesto secondo ciascuno dei sei indicatori, misurati col questionario NASA TLX, risulta ridotto nella sessione test rispetto alla sessione base in entrambi i due gruppi.

La letteratura interessata ai cosiddetti effetti non-visivi della luce è in aumento, ma non c'è ancora un ampio consenso sulla natura, l'affidabilità e la portata di questi effetti [23]: sono ancora in discussione alcuni aspetti metodologici, inclusi i parametri legati allo stimolo luminoso (lunghezza d'onda, tempo di esposizione ecc.), nonché alcune questioni teoriche. Ad esempio, non è ancora chiaro se gli effetti sopra descritti sui processi cognitivi, come la memoria a lungo termine, devono essere considerati come conseguenza diretta o indiretta legata a un più generale aumento dell'eccitazione, dell'impegno mentale, dell'umore ecc.

Per distinguere gli effetti non-visivi della luce che hanno un'influenza diretta sulla cognizione dagli effetti indiretti, in questo lavoro l'attenzione è stata focalizzata su un aspetto delle funzioni esecutive e su un aspetto delle abilità visuo-spaziali, poiché studi di neuroimmagine hanno riscontrato che l'esposizione alla luce blu influenza l'attività di un numero di aree celebrali collegate con queste due funzioni cognitive (ad es. corteccia prefrontale, corteccia parietale e strutture sottocorticali come il locus coeruleus) e per la loro importanza in ambiti professionali in cui si affrontino situazioni di emergenza e in cui i lavoratori sono generalmente organizzati in turni.

I risultati emersi dal presente studio indicano che l'esposizione a un'illuminazione con uno spettro a elevata composizione spettrale nel blu, come le sorgenti a LED, migliora le prestazioni riducendo gli errori e permettendo multiple rappresentazioni mentali: più nello specifico, con questa tipologia di luce, le persone sembrano commettere un minor numero di errori e appaiono capaci di eseguire più compiti contemporaneamente.

Attualmente né la natura di questi miglioramenti né la durata di tali effetti positivi è ancora chiara: ulteriori studi dovranno determinare per quanto tempo persistono gli effetti di questo tipo di illuminazione. Ad ogni modo, le nuove sorgenti LED possono essere adoperate in contesti lavorativi e in situazioni di criticità che richiedono rapide fasi decisive.

6 Riferimenti bibliografici

1 M. Barbalace, F. Gugliermetti, F. Bisegna, " Studio per la valutazione degli effetti della luce sugli esseri umani", ENEA (2012).

2 G.C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, et al., "Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor", The Journal of Neuroscience n. 21 (2001), pp. 6405-6412.

3 K. Thapan, J. Arendt, D. J. Skene, "An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans", The Journal of Physiology n. 35 (2001), pp. 261-267.

4 Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), "Ocular lighting effects on human physiology and behaviour" (2004) Wien, Austria CIE, p. 158.

5 J. A. Veitch, "Lighting for well-being: a revolution in lighting?", Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on Lighting and Health, Sept. 7-8, Ottawa, Ontario, (2006), pp. 56-61.

6 M. Rea, M. Figueiro, J. D. Bullough, "Circadian Photobiology: an emerging framework for lighting practice and research", Lighting Research and Technology n. 34 (2002), pp. 177-190.

7 C. Pechacek, M. Andersen, S. Lockley, "Preliminary method for prospective analysis of the circadian efficacy of (Day)Light with applications to healthcare architecture", Leukos n. 5 (2008), pp. 1-25.

8 W. J. M. van Bommel, "Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work", Applied Ergonomics n. 37(2006), pp. 461-466.

9 P.R. Boyce, "The impact of light in buildings on human health", Indoor Built Environment n. 19(2010), pp. 8-20.

10 L. Bellia, F. Bisegna, G. Spada, "Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions", Building and Environment n. 46 (2011), pp. 1984-1992.

11 L. Bellia, F. Bisegna, "From radiometry to circadian photometry: A theoretical approach", Building and Environment n. 62 (2013), pp. 63-68.

12 A. Daurat, A. Aguirre, J. Foret, P. Gonnet, A. Keromes, O. Benoit, "Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-h constant routine", Physiology and Behavior n. 53(1993), pp. 929-936.

13 I. Knez, C. Kers, "Effects of indoor lighting, gender, and age on mood and cognitive performance", Environment and Behavior n. 32 (2000), pp. 817-831.

14 A. J. Lewy, "Circadian misalignment in mood disturbances", Current Psychiatry Reports n. 11 (2009), 459-465.

15 P. C. Zee, C. A. Goldstein, "Treatment of shift work disorder and jet lag", Current treatment options in Neurology, 12 (2010), pp. 396-411.

16 D. C. Holzman, "What's in a color? The unique human health effects of blue light" Environmental Health Perspectives n. 118 (2010), pp. A22-A27.

17 H. J. Burgess, K. M. Sharkey, C. I. Eastman, “Bright light, dark and melatonin can promote circadian adaptation in night shift workers”, Sleep Medicine Review n. 6 (2002), pp. 407-420.
18 S. M. Hill, D. E. Blask, “Effects of the pineal hormone melatonin on the proliferation and morphological characteristics of human breast cancer cells (MCF-7) in culture”, Cancer Research 48 (1988), pp. 6121-6126.
19 G. C. Brainard, R. Kavet, L. I. Kheifets, “The relationship between electromagnetic field and light exposures to melatonin and breast cancer risk: A review of the relevant literature”, Journal of Pineal Research n. 26 (1999), pp. 65-100.
20 J. Hansen, ”Increased breast cancer risk among women who work predominantly at night” Epidemiology n. 12 (2001), pp. 74-77.
21 R. G. Stevens, “Working against our endogenous circadian clock: breast cancer and electric lighting in the modern world”, Mutation Research n. 679 (2009), pp. 6-8.
22 M. Alpert, E. Carome, V. Kubulins, R. Hansler, “Nighttime use of special spectacles or light bulbs that block blue light may reduce the risk of cancer”, Medical Hypotheses n. 73 (2009), pp. 324-325.
23 G. Vandewalle, P. Maquet, D.J. Dijk, "Light as a modulator of cognitive brain function", Trends in Cognitive Sciencesn. 13 (2009), pp. 429–438.
24 G. Vandewalle, E. Balteau, C. Phillips, C. Degueldre, V. Moreau,V. Sterpenich, G. Albouy, A. Darsaud, M. Desseilles, T. T. Dang-Vu, P. Peigneux, A. Luxen, D-J. Dijk, P. Maquet, "Daytime light exposure dynamically enhances brain responses", Current Biology, n. 16 (2006), pp. 1616–1621.
25 G. Vandewalle, S. Gais, M. Schabus, E. Balteau, J. Carrier, A. Darsaud, V. Sterpenich, G. Albouy, D. J. Dijk, P. Maquet, "Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure", Cerebral Cortex, n. 17 (2007), pp. 2788–2795.
26J. A. Veitch, S. M. Kaye, "Illumination effects on conversational sound levels and job-candidate evaluation", Journal of Environmental Psychology n. 8 (1988), pp. 223-233.
27 J. A. Veitch, S. L. McColl, "A critical examination of perceptual and cognitive effects attributed to full-spectrum fluorescent lighting", Ergonomics n. 44(2001), pp. 255- 279.
28 R. V. Ferguson, P. A. Munson, "The effects of artificial illumination on the behaviour of elementary school children", Final report to Extramural Research Programs Directorate Health Services and Promotions Branch Health and Welfare Canada (University of Victoria, School of Child Care, Victoria, B.C., Canada), (1987).
29 P. F. Boray, R. Gifford, L. Rosenblood, "Effects of warm white, cool white, and full-spectrum fluorescent lighting on simple cognitive performance, mood, and ratings of others", Journal of Environmental Psychology n. 9 (1989), pp. 297-308.
30 P. R. Boyce, M. S. Rea, "A field evaluation of full-spectrum, polarized lighting", Journal of the Illuminating Engineering Society, n. 23(2) (1994), pp. 86-107.
31 D. Forbes, I. Culum, A. R. Lischka, D. G. Morgan, S. Peacock, J. Forbes, S. Forbes, "Light therapy for managing cognitive, sleep, functional, behavioural, or psychiatric disturbances in dementia (Review)", The Cochrane Library n. 4 (2009), pp. 1-77.
32 G. Vandewalle, P. Maquet, D. J. Dijk, "Light as a modulator of cognitive brain function", Trends in Cognitive Sciences n. 13 (2009), pp. 429–438.
33. C. Stoll, "Melanopic lux applied to PLACAR-data", Effect of light on human beings, 6 June 2013 Berlino, Beuth 2013, p. 21.
34 D. Lang, "Overview of the work of NA 058-00-27 AA (FNL27)", ", Effect of light on human beings, 6 June 2013 Berlino, Beuth 2013, pp. 1-7.

35 I. Iskra-Golec, L. Smith, "Bright light effects on ultradian rhythms in performance on hemisphere-specific tasks", Applied Ergonomics n. 42 (2011), pp. 256-260.
36 Y. deKort, "Wide awake, but in the dark - Daytime light exposure for day-active people", Effect of light on human beings, 6 June 2013 Berlino, Beuth 2013, p. 39.
37 K. C. H. J. Smolders, Y. A. W. de Kort, P. J. M. Cluitmans, "A higher illuminance induces alertness even during office hour: Findings on subjective measures, task performance and hart rate measures", Physiology and Behavior n. 107 (2012), pp. 7-16.
38 R. W. Corbett, B. Middleton, J. Arendt, "An hour of bright light in the early morning improves performance and advances sleep and circadian phase during Antartic winter", Neuroscience Letters n. 525 (2012), pp. 146-151.
39 T. Kantermann, S. Forstner, M. Halle, L. Schlangen, T. Roenneberg, A. Schmidt-Trucksäss, Effect of light on human beings, 6 June 2013 Berlino, Beuth 2013, pp. 45-58.
40 C. Vetter, "Examining chronotype dependent light exposure in day workers" Effect of light on human beings, 6 June 2013 Berlino, Beuth 2013, pp. 41-43.
41 M. C. M. Gordijin, D. 't Mannetje, Y. Meesters, "The effects of blue-enriched light treatment compared to standard light treatment in seasonal affective disorder" Journal of Affective Disorders n. 136 (2012), pp. 72-80.
42 A. Sasseville, M. Hébert, "Using blue-green light at night and blue-blockers during the day to improves adaptation to night work: A pilot study", Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry n. 34 (2010), pp. 1236-1242.
43 J. Y. Park, B. Min, Y. Jung, H. Pak, Y. Jeong, E. Kim, "Illumination influences working memory: an EEG study", Neuroscience (2013), articolo in fase di pubblicazione.
44 C. Barkmann, N. Wessolowski, M. Schulte-Markwort, " Applicability and efficacy of variable light in schools", Physiology & Behavior n. 105 (2012), pp. 621-627.
45 D. Wechsler, "Manual for the Adult Intelligence Scale-Revised", (1981), Psychological Corporation, New York.
46 R. Guay, "Purdue Spatial Visualization Tests", Purdue Research Foundation (1977), West Lafayette, IN.
47 S. Sdoia, F. Ferlazzo, "Stimulus-Related Inhibition of Task Set During Task Switching", Experimental Psychology n. 55(2008), pp. 322–327.
48 S. Hart, L. Staveland, "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research", Human mental workload (1988), pp. 139-183, P. Hancock & N. Meshkati Editions, Amsterdam.
49 B. vanBaarsen, F. Ferlazzo, D. Ferravante, J. Smit, M. Van Duijn, J. Van DerPligt, "The effects of extreme isolation on loneliness and cognitive control processes: Analyses of the LODGEAD data obtained during the Mars105 and the Mars520 studies", 62nd International Astronautical Congress IAC, Cape Town, South Africa 3-7 October, 2011, pp. 25-27.