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 sulla vigilanza ed attenzione

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

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

Report RdS/PAR2013/067

ANALISI DELLE CARATTERISTICHE LUMINOSE DI NUOVE SORGENTI DI ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE E VALUTAZIONE DEI LORO EFFETTI SULLA VIGILANZA ED ATTENZIONE

C. Burattini, F. Gugliermetti, F. Bisegna (Università La Sapienza, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento DIAEE)

F. Ferlazzo, L. Piccardi, A. M. Giannini (Università La Sapienza, Facoltà di Psicologia)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2013
Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia
Progetto: C.1. Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi
Obiettivo: c. Sviluppo dei prodotti efficienti per l'illuminazione – c.1 Progettazione e sperimentazione di installazioni a LED
Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Università degli Studi di Milano, dipartimento di Informatica, per una attività di ricerca dal titolo: "Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sulla vigilanza ed attenzione"

Responsabile scientifico ENEA: Ornella Li Rosi

Responsabile scientifico Sapienza: Prof. Fabio Bisegna

Si ringrazia ASSIL (Associazione Nazionale Produttori Illuminazione) per l'interesse verso la ricerca svolta dal Dipartimento DIAEE e per il supporto dato attraverso due dei suoi associati, 3F Filippi e iGuzzini, con i quali è in essere un accordo di collaborazione per la fornitura delle lampade destinate all'attività sperimentale.

Indice

ANALISI DELLE CARATTERISTICHE LUMINOSE DI NUOVE SORGENTI DI ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE E VALUTAZIONE DEI LORO EFFETTI SULLA VIGILANZA ED ATTENZIONE 1

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 5

2 LA VIGILANZA 6

3 PARTECIPANTI 8

4 MATERIALI E METODI 9

5 RISULTATI 13

6 DISCUSSIONE 17

7 CONCLUSIONI 18

8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 19

9 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI 20

Sommario

Lo studio si inserisce all'interno delle ricerche svolte dal mondo scientifico internazionale sul ruolo che la luce svolge sull'essere umano a livello fisiologico e psicologico. Il lavoro è una prosecuzione ed un approfondimento dell'indagine svolta l'anno precedente riguardante gli effetti non-visivi dell'illuminazione sulle funzioni cognitive umane: i risultati positivi ottenuti sulle funzioni esecutive hanno portato ad investigare se uno spettro luminoso ricco di lunghezze d'onda corte abbia un effetto sull'attenzione, influenzando la vigilanza dell'individuo. Due test di vigilanza, uno con compiti visivi ed uno con compiti acustici, sono stati eseguiti da 40 soggetti all'interno di un box sperimentale con due scenari luminosi dalla differente composizione spettrale. La condizione luminosa sperimentale utilizza una piastra LED con uno spettro che presenta due picchi, uno nella regione del blu ed uno nel giallo, mentre nella condizione di controllo sono utilizzate 6 lampade alogene che emettono uno spettro con valori minimi nelle lunghezze d'onda corte del campo del visibile e valori elevati per lunghezze d'onda lunghe.

I risultati mostrano un effetto differente delle due sorgenti sulle performance dei partecipanti dovuto alla diversa composizione spettrale. Mentre con le sorgenti alogene si riscontra un naturale decremento di vigilanza sia acustica che visiva, dovuto ad un incremento dei tempi di reazione durante le prove, la sorgente LED influenza positivamente le prestazioni dei soggetti, aumentando la vigilanza visiva ed incrementando i tempi di reazione della vigilanza acustica.

Il confronto dei risultati ottenuti con quelli presentati nello studio svolto lo scorso anno sembrerebbe indicare che lo spettro luminoso del LED influenzi le funzioni attentive di tipo visivo; tuttavia, ulteriori studi sono necessari per determinare l'esistenza un effetto significativo sulle funzioni uditive.

1 Introduzione

Il ruolo della luce all'interno della fenomenologia della visione è l'argomento alla base della scienza illuminotecnica, tutt'oggi oggetto di indagine privilegiato nella maggioranza degli studi.
Da diversi anni il mondo scientifico si interessa al ruolo che la luce svolge sull'essere umano a livello fisiologico e psicologico [1]. La stimolazione luminosa agisce, oltre che sul sistema visivo, sul sistema circadiano, una complessa rete di organi interconnessi e presieduti dal Nucleo Soprachiasmatico (SNC), deputata alla regolazione di numerose funzioni fisiologiche [2]. Grazie alla presenza della luce solare il corpo umano viene regolato da cicli della durata di circa 24 ore; oltre al sonno e alla veglia, hanno un ciclo circadiano funzioni fisiologiche come la temperatura corporea, il battito cardiaco, la trasduzione genetica, la secrezione ormonale, l'allerta e processi cognitivi come l'attenzione, la memoria, la vigilanza e le funzioni esecutive [3, 4].
La luce, recepita da un gruppo di cellule gangliari (cellule gangliari intrinsecamente fotosensitive, ipRGC) presenti nella retina, giunge come segnale elettrico al SNC situato nell'ipotalamo che, come conseguenza, attiva i processi diurni e disattiva i processi notturni attraverso la secrezione e l'inibizione di alcuni ormoni [5]. Particolarmente importante per il sistema circadiano è la melatonina, un ormone sintetizzato dalla ghiandola pineale, la cui concentrazione nel sangue è massima durante la notte e minima di giorno perché la sua secrezione viene inibita dal SNC in risposta al segnale luminoso dopo pochi minuti [6].
La luce sembrerebbe essere il principale fattore ambientale ad influenzare il sistema circadiano e la risposta dell'organismo dipende dalle caratteristiche della radiazione incidente sulla retina: il sistema circadiano reagisce più lentamente rispetto al sistema visivo, iniziando l'azione di attivazione fisiologica dopo qualche minuto dall'inizio della stimolazione luminosa; la reazione dell'organismo aumenta all'aumentare dell'intensità, ma anche una stimolazione di bassa intensità protratta per lungo tempo è in grado di causare l'inibizione della secrezione di melatonina. È stato inoltre largamente dimostrato che la luce con una elevata composizione spettrale di lunghezze d'onda corte, definita luce blu, sia maggiormente efficace nell'inibire la secrezione di melatonina rispetto ad una sorgente con uno spettro neutro, mentre la radiazione rossa ha un effetto quasi nullo sul sistema circadiano. La ragione di questa differente capacità spettrale risiede nella funzione di sensibilità circadiana (C$_l$) [7, 8, 9] che, secondo i risultati di due studi paralleli ed indipendenti [10, 11], si concentra nella regione blu dello spettro (446-477 nm) ed ha un picco a 460 nm. L'andamento di tale funzione dipende dai fotorecettori coinvolti nella trasduzione del segnale luminoso dalla retina al SNC: oltre alle cellule gangliari intrinsecamente fotosensitive, i principali fotorecettori circadiani, recenti ricerche sembrano dimostrare che anche i bastoncelli ed i coni S svolgano un ruolo, benché secondario, nella recezione del segnale luminoso non solo visivo ma anche non-visivo [12]. L'andamento della funzione Cl dipenderebbe dunque oltre che dalla melanopsina, il fotopigmento contenuto nelle ipRGC che ha un picco di sensibilità 480 nm, dal cianolabe e dalla rodopsina, i fotopigmenti contenuti in coni S e bastoncelli, con picco di sensibilità rispettivamente a circa 420 nm e 500 nm. Inoltre, essendo le cellule ipRGC disposte nella parte latero-nasale della retina, la radiazione utile alla stimolazione circadiana sembrerebbe essere quella proveniente dall'alto, escludendo così un effetto dovuto alle lampade posizionate al livello degli occhi o al pavimento [13].
La ricerca scientifica si è occupata principalmente di elaborare un sistema fotometrico circadiano che porti alla definizione di unità di misura analoghe a quelle della fotometria classica [14,15], di disturbi del sonno derivanti da irregolarità del ciclo circadiano ed in particolare delle conseguenze sui lavoratori notturni [16], o dell'utilizzo della luce come cura contro malattie quali la depressione, la SAD [17] e l'Alzheimer [18]. Alcuni studi sono stati condotti al fine di valutare l'effetto della stimolazione luminosa su parametri fisiologici che hanno un ritmo circadiano, come il battito cardiaco, la pressione sanguigna o la concentrazione ormonale nel sangue. Ancora pochi lavori hanno trovato interesse nello studio dell'influenza della luce sulla mente umana, ed in particolare su quei processi che risiedono in zone del cervello interessate dall'azione del SNC come le funzioni cognitive [19]. 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 connesse con il sistema cognitivo, quali il sistema

limbico, la corteccia dorso-laterale prefrontale, il solco intraparietale e il lobulo parietale superiore, il locus coeruleus, l'ippocampo e l'amigdala [20].
Precedenti studi svolti dal Dipartimento DIAEE in collaborazione con ENEA, hanno indagato gli effetti di differenti sorgenti luminose sull'essere umano su funzioni psicologiche, fisiologiche e mentali.
Nell'anno 2012 l'attività ha avuto come oggetto lo studio dell'influenza di differenti sorgenti luminose sulle reazioni psicofisiologiche di soggetti sottoposti ad un test di risposta emotiva. Ai soggetti partecipanti sono state mostrate su un monitor 3 serie di immagini, positive, neutre e negative, con quattro differenti condizioni luminose: buio, luce artificiale, luce artificiale e naturale, luce naturale. Il monitoraggio dei parametri fisiologici di resistenza galvanica cutanea (GRS) tonica e fasica, e il battito cardiaco hanno evidenziato una variazione consistente delle reazioni emotive dei soggetti al variare dello scenario luminoso piuttosto che alla tipologia di immagini [21].
L'attività sperimentale svolta nel 2013 si è occupata di valutare l'influenza della differente composizione spettrale delle sorgenti artificiali sulle performance cognitive. I soggetti partecipanti hanno eseguito due test visivi, rotazioni mentali e cambio di compito volontario, con 2 scenari luminosi: le tradizionali lampade alogene, con elevata percentuale di radiazione nelle lunghezze d'onda rosse, e le sorgenti LED, che presentano un picco di emissione nella regione del blu. I risultati hanno evidenziato un incremento delle performance nella condizione di illuminazione LED, sia per quanto riguarda l'accuratezza delle risposte nel compito di rotazioni mentali, sia per ciò che riguarda i meccanismi inibitori nel test di cambio del compito volontario. In particolare, con la sorgente LED, sembrerebbe possibile eseguire più rappresentazioni mentali senza interferenza e senza costo temporale di esecuzione [22].
Lo studio svolto durante l'anno 2014 è al contempo la prosecuzione e l'approfondimento dell'attività sperimentale svolta l'anno precedente: gli effetti positivi riscontrati con l'illuminazione LED su alcune funzioni cognitive umane hanno portato ad indagare se lo spettro delle sorgenti LED abbia un effetto generale sull'attenzione, aumentando la vigilanza dell'individuo. In questa ricerca sono stati indagati sia compiti di tipo visivo, come già lo scorso anno, sia compiti acustici, con la finalità di capire se l'effetto dello spettro luminoso sia limitato ad una modalità sensoriale, o se invece l'informazione luminosa, pur mediata dalla funzione visiva, abbia un'influenza generalizzata di attivazione cerebrale, riscontrabile nello svolgimento di compiti attentivi, qualunque sia l'organo coinvolto nell'esecuzione del compito.
Lo studio ha risvolti applicativi di grande importanza in numerosi settori, a partire dalle scuole e dagli ambienti lavorativi: i risultati di questo studio riguardano in particolare alcune categorie professionali come gli addetti alla sorveglianza, il cui compito è quello di prestare attenzione al verificarsi di eventi improbabili ed inattesi, o i controllori del traffico aereo e marittimo, che eseguono compiti ripetitivi e monotoni, ma anche i chirurghi che compiono interventi che richiedono costante attenzione anche per lunghi periodi, e gli operai nelle industrie quotidianamente a contatto con macchinari che possono diventare pericolosi in caso di disattenzione. Una categoria particolare è quella dei lavoratori notturni, per i quali l'individuazione di una illuminazione idonea deve tener conto tanto degli effetti sulle prestazioni lavorative, quanto quelli sulla salute. Infatti, uno spettro luminoso con elevata emissione nelle lunghezze d'onda corte, è sì in grado di facilitare lo svolgimento delle mansioni durante le ore notturne, quando lo stato di attivazione fisiologico dell'essere umano è inferiore a quello diurno e dunque la risposta agli stimoli è più lenta, ma al contempo influenza anche il ritmo circadiano, generando uno sfasamento delle funzioni fisiologiche, con potenziali effetti anche gravi sulla salute.

2 La vigilanza

Vigilanza è un termine ambiguo, usato anche nel linguaggio comune con vari significati, che nel mondo scientifico assume una differente valenza in funzione dello specifico ambito di studio. Se nel linguaggio comune vigilanza è usato per indicare il controllo al fine di evitare pericoli o come sinonimo di allerta, per i neurofisiologi essa corrisponde ad un livello di attivazione mentale all'interno del range coma profondo-eccitazione maniacale, mentre per gli psicologi è associata ai vari gradi del livello di veglia in funzione della

prontezza a rispondere ad uno stimolo. Sempre in psicologia è considerata un aspetto dell'attenzione, ed in questa accezione può essere definita come la capacità di monitorare nel tempo eventi che accadono raramente; la vigilanza deve essere distinta dall'attenzione sostenuta, che corrisponde alla capacità di mantenere l'attenzione su un compito per lungo tempo [23].
Da un punto di vista anatomico, l'area celebrale responsabile dello stato di vigilanza è il sistema fronto-parietale destro [24]. Un ruolo importante viene svolto dalla norepinefrina (NE), un neurotrasmettitore rilasciato dal Locus Coeruleus (LC) responsabile dell'attivazione talamica e corticale [25]. La regolazione del LC è dovuta al SNC, che in conseguenza dello stimolo luminoso fa variare l'attività neuronale secondo il ritmo circadiano. La secrezione di NE aumenta durante l'attività fasica, direttamente connessa con lo stato di veglia, allerta e attenzione, decresce durante il sonno e viene considerevolmente ridotta nella fase REM, quando prevale l'attività tonica. Durante la veglia un accresciuto livello di NE permette di incrementare l'elaborazione corticale della stimolazione sensoriale esterna, mentre durante il sonno si ha comunque attività corticale (sogni) ma un basso livello di elaborazione degli stimoli ambientali [26].
Il livello di vigilanza è un indice di prestazione generale del compito di attenzione, che è quantificato dalla percentuale di eventi rilevati rispetto ai falsi allarmi; esso è influenzato dal livello di *arousal* durante il compito, cioè dall'attivazione soggettiva prodotta dagli stimoli ambientali: un ambiente monotono tende a diminuire il livello di *arousal* ed anche la performance di vigilanza, mentre un ambiente vario, la presenza di una persona o una pausa mantengono alto l'*arousal*, supportando lo svolgimento del compito.
La vigilanza tende a diminuire durante lo svolgimento del compito con il passare del tempo; il decremento si manifesta in una diminuzione della velocità con cui il soggetto si accorge dell'evento, rilevata come aumento del tempo di reazione, e con un aumento del numero di errori, dovuti sia ad assenza di risposta al segnale che a risposte ai falsi allarmi [27].
Il decremento nelle performance di vigilanza è influenzato sia dalle caratteristiche del compito, sia dall'adattamento del soggetto al compito.
La modalità sensoriale di presentazione del compito ha influenza sia sull'accuratezza che sui tempi di reazione, in quanto l'essere umano è maggiormente sensibile agli stimoli acustici rispetto a quelli visivi o tattili; dunque nei compiti acustici si registrano decrementi minori della vigilanza. La velocità di presentazione del compito è proporzionale al decremento di vigilanza perché quando gli eventi vengono presentati rapidamente si ha una diminuzione nella velocità e nell'esattezza della risposta rispetto ai compiti in cui gli eventi vengono presentati lentamente. La prestazione è inoltre influenzata dalla complessità del compito: compiti che richiedono una elaborazione complessa o che richiedono un impegno di memoria tendono a peggiorare la prestazione di vigilanza.
Dal punto di vista soggettivo, tanto la sensibilità nella rilevazione del segnale, quanto il criterio decisionale utilizzato, influenzano la performance di vigilanza. Solitamente il calo di sensibilità è riscontrabile nei compiti particolarmente impegnativi e con segnali difficilmente percepibili, ma la sensibilità aumenta se il soggetto si concentra su un punto fissato [28].
Sembra che il decremento di vigilanza sia associato spesso ad un cambio nel criterio di risposta piuttosto che ad una diminuzione nella sensibilità: nell'esecuzione del compito, il soggetto ha un'aspettativa di comparsa del segnale dopo un certo periodo di tempo, trascorso il quale, se questo non è stato rilevato, il soggetto cambia criterio di risposta con uno più stringente, che riesca a rilevare il segnale con maggiore accuratezza [29]. È stato dimostrato che la prestazione decade rapidamente con un elevato ritmo di presentazione e bassa frequenza degli stimoli, mentre non subisce variazioni significative nel tempo quando il ritmo di presentazione del segnale e la frequenza degli stimoli da individuare sono elevati.
Sono state formulate più ipotesi per spiegare la difficoltà che l'essere umano ha nel monitorare per lungo tempo l'accadimento di eventi poco frequenti. Secondo una prima teoria, ciò sarebbe dovuto ai meccanismi inibitori che tendono ad estinguere le risposte quando un evento è ripetitivo, ma questa spiegazione non trova riscontro nella curva che descrive il decremento delle prestazioni, la quale, pur avendo un trend discendente, è caratterizzata da picchi e valli.
La teoria dell'aspettativa ritiene che i segnali a bassa probabilità richiedano un maggiore impegno nell'elaborazione e per questo eventi con alta frequenza di accadimento sono elaborati più rapidamente di quelli con una bassa frequenza. Inoltre, poiché il nostro sistema cognitivo tende a privilegiare stimoli nuovi

e non ancora elaborati, il decremento di vigilanza può essere attribuito allo spostamento dell'attenzione quando si eseguono compiti ripetitivi con bassa frequenza di accadimento.
I paradigmi sperimentali per indagare la vigilanza si possono classificare in due tipologie. I compiti di vigilanza tradizionale richiedono al soggetto di monitorare per un lungo periodo degli stimoli presentati in modo ripetitivo e di individuare un evento raro ed imprevedibile; questi paradigmi hanno una durata che può variare da 20 minuti a diverse ore perché il decremento di vigilanza solitamente compare dopo circa 15 minuti, anche se è stato dimostrato che nel caso di segnale poco percepibile il declino prestazionale si presenta già dopo 5 minuti.
I compiti di nuova tradizione sono strutturati in modo simile ma l'evento da individuare è preceduto da un segnale di allarme; i tempi di reazione si modificano in funzione del tempo più o meno lungo che intercorre tra il segnale e l'evento, ed il decremento di vigilanza è valutato confrontando i tempi di reazione tra gli eventi preceduti dal segnale e quelli che non lo sono. Essendo valutata la vigilanza mantenuta tra il segnale e l'evento, questi paradigmi hanno generalmente una durata inferiore rispetto a quelli tradizionali.
La vigilanza è altresì valutata mediante la variazione dell'attività cerebrale stimata per mezzo dell'elettroencefalografia (EEG); gli studi che hanno indagato l'interrelazione tra EEG e la vigilanza indicano che le attività alfa, theta e delta sono i migliori indicatori dei cambiamenti prestazionali in compiti di vigilanza: il ritmo alfa, registrato nella zona occipitale e parietale, è caratteristico della condizione di veglia ma a riposo mentale, il ritmo theta si presenta nella fase di addormentamento quando il soggetto è nello stato di dormiveglia, e il ritmo delta compare nella prima fase del sonno (non REM). Al decremento di vigilanza corrisponde un aumento dell'attività teta e delta e una diminuzione dell'attività alfa [30].

3 Partecipanti

In uno studio sperimentale in cui si esamina l'effetto di una data variabile (in questo lavoro: la radiazione luminosa) su un campione (esseri umani), la selezione dei partecipanti deve essere fatta in modo accurato affinché si ottengano dei risultati attendibili. In generale, per qualsiasi tipologia di studio scientifico, la popolazione che costituisce il campione deve essere omogenea, in modo da ridurre il più possibile le variabili che possano influenzare i risultati, e allo stesso tempo rappresentativa per poter generalizzare i risultati ottenuti ad un numero esteso di individui; inoltre in ogni studio si dovranno adottare criteri di esclusione specifici, in funzione delle caratteristiche specifiche del tipo di indagine.
Allo studio oggetto del presente lavoro hanno partecipato studenti universitari iscritti alle facoltà di Ingegneria ed Architettura dell'Università "Sapienza" di Roma: questo campione è sufficientemente omogeneo perché i soggetti hanno mediamente lo stesso livello di istruzione, una formazione culturale simile, ed essendo abituati allo studio, svolgono abitualmente compiti cognitivi, ed è perciò possibile escludere deficit di attenzione.
Il campione è stato scelto con un'età compresa tra i 18 ed i 35 anni per avere uniformità nell'effetto della composizione spettrale delle sorgenti sulla retina; è stato dimostrato che il cristallino subisce variazioni con il procedere degli anni, ed in particolare che, con l'invecchiamento, tende ad inspessirsi e ad ingiallire [31]. L'ingiallimento del cristallino ne altera la trasmittanza, modificando lo spettro luminoso che giunge sulla retina, in particolare filtrando le lunghezze d'onda corte e dunque limitando la stimolazione della luce blu sui fotorecettori; la scelta di un campione composto da soggetti giovani permette di evitare la distorsione dovuta a tale fenomeno.
All'esperimento hanno partecipato soggetti che hanno avuto un sonno regolare nella notte precedente lo svolgimento del test, stimato attraverso un diario del sonno fatto compilare entro 15 minuti dal risveglio: il questionario presenta una serie di domande che chiedono di indicare quante ore il soggetto ha dormito, quante volte e per quanto tempo il soggetto si è svegliato e se il sonno sia stato o meno disturbato. La finalità del questionario è stabilire sia la quantità che la qualità del sonno dei soggetti, perché è stato dimostrato come un inadeguato livello di sonno causi un alterazione dei ritmi fisiologici giornalieri ed influenzi negativamente le prestazioni cognitive ed il livello di attenzione. In particolare, la privazione di sonno ha effetti negativi sulla vigilanza, che si manifestano in un allungamento dei tempi di risposta ed in

un aumento degli errori di omissione, dovuti probabilmente ad episodi di "micro-sonno" della durata di pochi secondi [32]. Solamente soggetti con una durata totale del sonno notturno superiore a 6,5 ore hanno preso parte all'esperimento.
I soggetti hanno compilato un questionario di anamnesi nel quale era chiesto loro di indicare l'eventuale consumo di alcol e droghe, l'assunzione di farmaci, precedenti eventi lesivi di natura celebrale e disturbi psichiatrici: sono stati esclusi dallo studio tutti coloro che abbiano subito lesioni cerebrali di rilevante entità, che presentino problemi psichiatrici, passati o presenti, che siano consumatori abituali di droghe, che abbiano dipendenza da alcol, o che assumano psicofarmaci. Inoltre ai soggetti è stato chiesto di non assumere caffeina e nicotina nelle due ore precedenti il test.
Ciascuna delle sostanze considerate agisce infatti sul metabolismo e sul sistema nervoso centrale, alterando anche le prestazioni cognitive. Gli psicofarmaci (antidepressivi, stimolanti, antipsicotici, stabilizzatori dell'umore, ansiolitici, depressivi) alterano l'attività neuronale inibendo o stimolando a vari livelli la funzionalità dei neurotrasmettitori o dei neurorecettori, causando mutamenti nell'umore, nella percezione, nella cognizione e nel comportamento. L'alcol agisce come un sedativo, inibendo l'attività neuronale e stimolando il parasimpatico: la sua assunzione in dosi moderate attiva alcune aree del cervello come l'ippocampo, mentre in quantità elevata ha effetti negativi sul pensiero e sull'apprendimento. La caffeina e la nicotina sono stimolanti sia dell'attività simpatica, favorendo il rilascio di sostanze eccitanti, sia del metabolismo, producendo l'aumento del battito cardiaco, della pressione e della respirazione. L'assunzione di caffeina incrementa il livello di allerta ed attenzione, mentre la nicotina favorisce la concentrazione, ma, in entrambi i casi, i loro effetti non sono prolungati e possono essere considerati sufficientemente attenuati dopo due ore.

4 Materiali e metodi

Lo studio è stato svolto con l'intento di esaminare se due diverse sorgenti luminose abbiano differente influenza sulla vigilanza ed in particolare se, con l'illuminazione LED, le prestazioni dei soggetti siano migliori rispetto a quelle che si ottengono con l'illuminazione alogena.
L'attività di ricerca si è svolta all'interno di un ambiente sperimentale situato nel Laboratorio di illuminotecnica del Dipartimento DIAEE; esso consiste in un box in cartongesso di dimensioni 3,6x2,4 m ed alto 3 m, appositamente realizzato per lo studio delle sorgenti artificiali. A tal fine, il box è privo di finestre per evitare l'ingresso di luce naturale, e le pareti interne sono state rivestite di materiale nero per ridurre al minimo la riflessione luminosa. Per la conduzione dell'esperimento, l'interno del box è stato arredato con una scrivania, una sedia, un computer con monitor di 17' e delle casse audio (Figura 1).

Figura 1 – Immagine dell'ambiente sperimentale

L'illuminazione artificiale utilizzata è di tipo diretto, con le lampade montate al soffitto, di fronte al partecipante, e sul retro del monitor, direzionate verso il basso. L'esperimento è stato condotto con due tipologie luminose: una piastra LED (0,6x0,6 m) alloggiata nel controsoffitto, composta da 36 LED singoli disposti su tre file con vetro diffondente, e 6 lampade alogene sospese al soffitto senza alcun apparecchio; le caratteristiche luminose sono indicate nella Tabella 1.

Tabella 1 – Dati tecnici delle sorgenti utilizzate

		ALOGENE	LED
Flusso luminoso	lm	6x850	3492
Potenza	W	6x53	43
Temperatura di colore	K	2800	4000
Resa cromatica		100	90

Le due sorgenti sono state scelte per il loro differente spettro di emissione: le lampade alogene emettono con uno spettro che presenta valori minimi nelle lunghezze d'onda corte del campo del visibile e cresce in modo continuo per raggiungere valori elevati per lunghezze d'onda lunghe e massimi nell'infrarosso; differentemente, il LED emette solamente nel visibile, con uno spettro che presenta due picchi, uno nella regione del blu ed uno nel giallo.
Per stimare correttamente la differente percentuale di emissione luminosa ad ogni singola lunghezza d'onda, lo spettro di emissione delle sorgenti utilizzate nell'attività sperimentale è stato misurato per mezzo di uno spettroradiometro (JETI Specbos 1211UV). La misura dei due spettri è riportata in uno stesso grafico in figura 2.

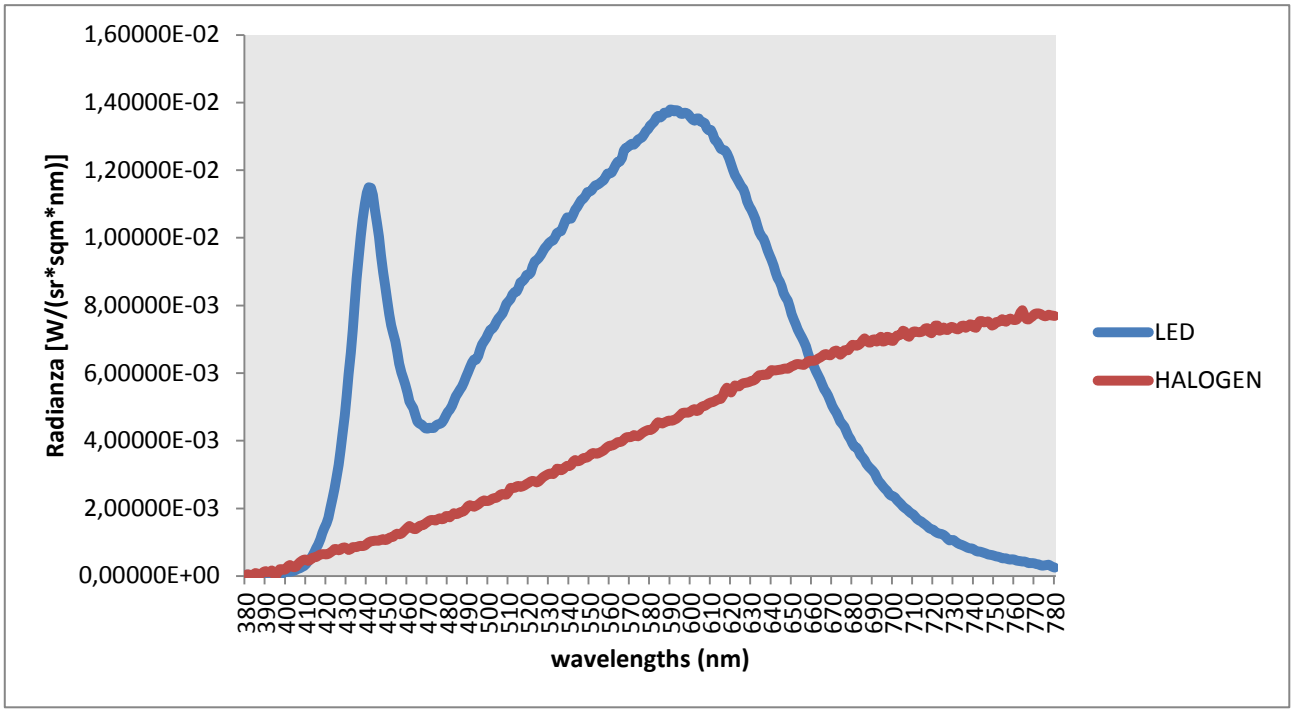

Figura 2 – Spettro di emissione delle due sorgenti nel campo del visibile

Inoltre, è stata stimata l'informazione luminosa che raggiunge l'occhio dei soggetti partecipanti, misurando radianza, irradianza, illuminamento e luminanza verticali, con lo spettroradiometro posizionato in corrispondenza della sedia a 1,2 m da terra e rivolto verso il monitor. I valori rilevati sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Valori delle grandezze fotometriche a livello dell'occhio

		ALOGENE	LED
Irradianza	[W/sqm]	6,559E-01	2,762E-01
Illuminamento	[lx]	1,002E+02	8,725E+01
Radianza	[W/(sr*sqm)]	1,169E+00	9,903E-01
Luminanza	[cd/sqm]	3,119E-01	3,450E-03

Gli effetti delle sorgenti luminose sulla vigilanza sono stati valutati eseguendo un esperimento nel quale erano presenti sia compiti di vigilanza visiva che compiti di vigilanza acustica. All'attività sperimentale hanno partecipato 40 soggetti, in egual numero di maschi e femmine, con età media rispettivamente di 24.62 (dev. st. 2.48) e 25.1 (dev. st. 2.47).
I soggetti sono stati suddivisi in modo casuale in due gruppi che hanno compiuto le stesse prove, ma con scenari luminosi differenti (Tab.3): il gruppo sperimentale (GS) ha eseguito una sessione base (SB), nella quale sono stati svolti compiti sia visivi che acustici, con l'illuminazione alogena, poi una pausa di 20 minuti senza svolgere compiti, all'inizio della quale è stata cambiata l'illuminazione da alogena a LED, seguita da una sessione test (ST) nella quale sono stati eseguiti nuovamente gli stessi compiti svolti nella sessione base con l'illuminazione LED.
Il gruppo di controllo (GC) ha svolto lo stesso protocollo continuando a mantenere l'illuminazione alogena anche dopo la sessione base, sia durante la pausa che durante la sessione sperimentale.

Tabella 3. Sorgenti luminose utilizzate nelle diverse fasi dell'esperimento

GRUPPO	SESSIONE BASE	PAUSA	SESSIONE TEST
sperimentale	alogena	LED	LED
controllo	alogena	alogena	alogena

In ogni sessione i partecipanti hanno eseguito due test, una prova di vigilanza visiva ed una prova di vigilanza acustica, entrambe effettuate al computer con un programma che ha presentato gli stimoli ed ha registrato i tempi di risposta dei soggetti.
Nel test di vigilanza visiva gli stimoli consistono in un quadrato rosso (RGB: 255,0,0) ed un quadrato verde (RGB 0,192,0), entrambi di lato 3 cm, presentati a monitor in sequenza alternata (Fig. 3); ogni stimolo è stato presentato per 500 ms, con un intervallo tra uno stimolo e l'altro sempre di 500 ms.

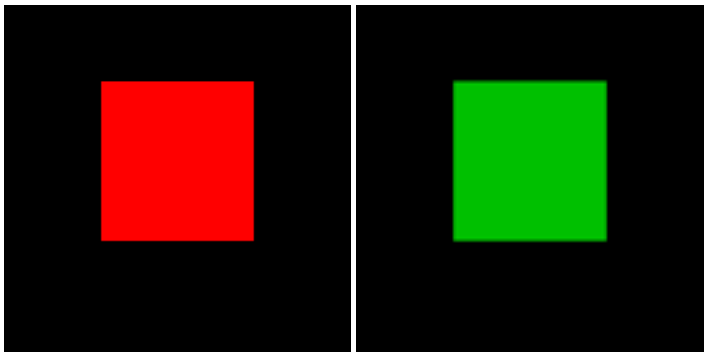

Figura 3 – Stimoli visivi: quadrato rosso e quadrato verde

Il soggetto doveva rispondere, cliccando il tasto sinistro del mouse il più velocemente possibile, quando gli veniva presentato lo stimolo bersaglio che consisteva nella ripetizione di un quadrato con lo stesso colore (rosso-rosso o verde-verde).
La prova è durata circa 14 minuti, durante i quali sono stati presentati a monitor 800 stimoli, dei quali 64 erano stimoli bersaglio; questi ultimi sono stati presentati in modo casuale, ma in modo che mediamente comparissero 11 stimoli bersaglio ogni 2 minuti.
Nel test di vigilanza acustica due diversi stimoli acustici chiaramente distinguibili dall'orecchio umano come suoni differenti, uno a 600 Hz ed uno ad 800 Hz, della stessa intensità (60 Db) venivano emessi da due casse poste ai lati del monitor, con una sequenza alternata (Fig. 4); ogni stimolo aveva la durata di 100 ms, mentre l'intervallo tra due stimoli consecutivi era di 500 ms. La struttura della prova, nella durata, numero di stimoli e sequenza, è identica alla prova di vigilanza visiva.

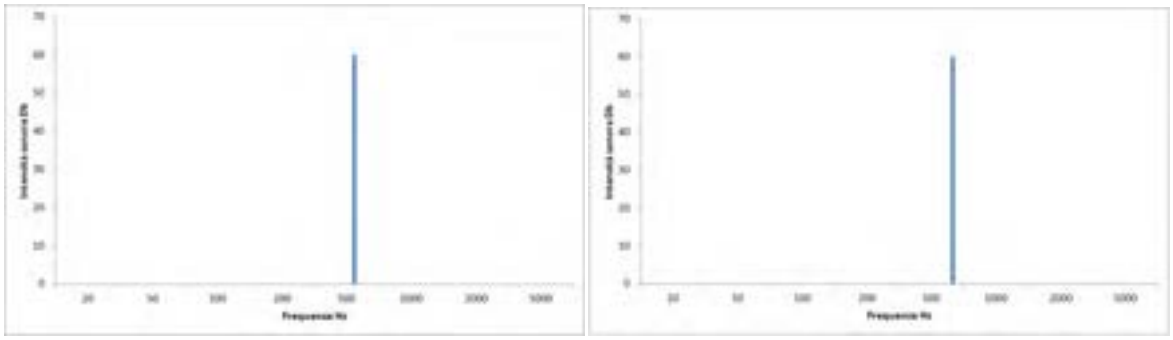

Figura 4 – Stimoli acustici: suono a 600 Hz (sinistra) e suono ad 800 Hz (destra)

Anche in questo test il soggetto doveva rispondere, cliccando il tasto sinistro del mouse il più velocemente possibile, quando gli veniva presentato lo stimolo bersaglio, che in questo caso consisteva nella ripetizione di un suono della stessa frequenza. Lo schermo del monitor è rimasto nero per tutta la durata del test.
Una metà dei soggetti, sia del GS che del GC, ha eseguito entrambi i test nella SB, svolgendo prima il test di vigilanza visiva e successivamente il test di vigilanza acustica, per poi ripetere entrambi i test con lo stesso ordine nella ST; l'altra metà dei soggetti ha eseguito sia nella SB che nella ST gli stessi compiti ma svolgendo prima il test di vigilanza acustica e poi il test di vigilanza visiva. In questo modo si è potuto escludere un effetto legato all'ordine di presentazione dei due test.

Tabella 4. Protocolli sperimentale con le prove di vigilanza acustica e visiva

SESSIONE BASE		PAUSA	SESSIONE TEST	
Test Acustico	Test Visivo	-	Test Acustico	Test Visivo
Test Visivo	Test Acustico	-	Test Visivo	Test Acustico

5 Risultati

Per stimare il decremento di vigilanza verificatosi durante l'esperimento, sono stati analizzati i tempi di risposta memorizzati dal computer durante lo svolgimento di ciascun test, partendo dal presupposto che nell'esecuzione di un compito di vigilanza normalmente i tempi di risposta aumentano con il trascorrere del tempo, perché la vigilanza del soggetto diminuisce e la risposta viene data più lentamente.
L'analisi dei dati memorizzati dal computer è stata effettuata prendendo in considerazione unicamente le risposte corrette, ossia conseguenti allo stimolo bersaglio, ed escludendo tutte le risposte date anche senza la comparsa del bersaglio. Sono inoltre state escluse le risposte con un tempo di reazione troppo lungo, superiore a 650 ms nel compito acustico ed a 800 ms nel compito visivo, perché al di sopra di tale soglia il soggetto è considerato distratto; il limite del test visivo è più alto di quello del test acustico perché i compiti visivi risultano più difficoltosi degli acustici, i soggetti impiegano un tempo maggiore ad elaborare lo stimolo ed i tempi di risposta sono più lenti.
Per ogni soggetto partecipante, sono stati elaborati separatamente i dati dei compiti visivi e di quelli acustici, nonché le prove della sessione base da quelle della sessione test. In ciascuna prova le risposte sono state suddivise in 7 intervalli di 2 minuti ciascuno, ed all'interno di ciascun intervallo è stata calcolata la media dei tempi di risposta; le prove sono state infatti programmate per avere una presentazione degli stimoli omogenea all'interno di ciascun intervallo (supra).
In Tabella 5 (test visivo) ed in Tabella 6 (test acustico) sono mostrati i valori medi dei risultati ottenuti dai partecipanti nei sette intervalli di ciascuna prova, suddivisi per sessione (base e test) e per gruppo (sperimentale e controllo); i valori medi sono rappresentativi dell'andamento medio delle performance dei soggetti in quanto le deviazioni standard, riportate tra parentesi, indicano una bassa variabilità, tenendo conto del fatto che i valori sono espressi in millisecondi e che il tempo di reazione fisiologico minimo è di 100 ms.
I dati sono stati analizzati in un disegno fattoriale misto di analisi della varianza Gruppo (sperimentale vs controllo) per Tempo (7 intervalli temporali), separatamente per le sessioni base e test, e separatamente per il test visivo e il test acustico. I risultati dell'analisi condotta sui tempi di reazione medi al test visivo nella SB hanno mostrato un effetto principale significativo del fattore tempo ($F_{6,216}=9.64$, $p<.001$) e nessun effetto principale del Gruppo né di interazione Gruppo x Tempo. I risultati dell'analisi condotta sui tempi di reazione medi al test visivo nella ST hanno invece mostrato un effetto di interazione significativo Gruppo per Tempo ($F_{6,216}=2.12$, $p<.05$), e nessun effetto principale significativo. La scomposizione dell'interazione ha mostrato che nel gruppo di controllo i tempi di reazione medi aumentavano linearmente

con il passare del tempo (F1,36=4.12, p<.05), mentre nel gruppo sperimentale l'incremento lineare dei tempi di reazione con il passare del tempo non è risultato significativo.

Tabella 5. Risultati del test visivo: valori dei tempi medi di risposta in millisecondi nei 7 intervalli di ciascuna prova

	Test visivo													
	SESSIONE BASE							SESSIONE TEST						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
GS	546 (80)	561 (59)	586 (99)	572 (71)	588 (87)	596 (74)	618 (85)	564 (81)	558 (84)	564 (82)	577 (82)	570 (74)	548 (81)	546 (73)
GC	499 (74)	524 (78)	545 (97)	560 (95)	566 (79)	599 (96)	574 (97)	528 (82)	574 (89)	553 (79)	559 (83)	563 (94)	572 (89)	573 (99)

Tabella 6. Risultati del test acustico: valori dei tempi medi di risposta in millisecondi nei 7 intervalli di ciascuna prova

	Test acustico													
	SESSIONE BASE							SESSIONE TEST						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
GS	364 (81)	383 (84)	398 (70)	384 (76)	397 (76)	356 (74)	377 (70)	341 (55)	344 (74)	354 (69)	364 (47)	349 (40)	356 (52)	380 (50)
GC	357 (67)	408 (82)	395 (94)	416 (76)	417 (108)	417 (101)	422 (102)	383 (83)	404 (85)	399 (75)	404 (97)	397 (82)	395 (96)	431 (118)

I risultati dell'analisi condotta sui tempi di reazione medi al test acustico nella SB hanno mostrato un effetto principale significativo del fattore tempo (F6,168=3.88, p<.01), un effetto di interazione significativo Gruppo per Tempo (F6,168=2.45, p<.05) e nessun effetto principale del Gruppo. La scomposizione dell'interazione ha mostrato che nel gruppo di controllo i tempi di reazione medi aumentavano linearmente con il passare del tempo (F1,28=8.25, p<.01), mentre nel gruppo sperimentale l'incremento lineare dei tempi di reazione con il passare del tempo non è risultato significativo. I risultati dell'analisi condotta sui tempi di reazione medi al test visivo nella ST hanno invece mostrato un effetto principale significativo del fattore Tempo (F6,168=3.06, p<.01) e nessun effetto principale del Gruppo né di interazione Gruppo per Tempo.

Il confronto degli andamenti dei tempi medi di risposta in funzione del tempo della prova suddiviso nei 7 intervalli, mostra quindi una differenza tra il test visivo (Fig. 5) ed il test acustico (Fig. 6).

Nel test visivo è stato registrato un decremento di vigilanza nella SB in entrambi i gruppi, indicato da un aumento dei tempi di risposta con il trascorrere dei minuti, mentre nella ST i tempi di risposta del GS diminuiscono e del GC aumentano; i risultati sembrerebbero indicare che vi sia un aumento della vigilanza durante la prova visiva svolta con illuminazione LED, mentre nelle prove svolte con le lampade alogene la vigilanza diminuisca con il procedere della prova.

Nel test acustico è stato riscontrato un decremento di vigilanza per entrambi i gruppi durante l'esecuzione del compito, sia nella SB che nella ST: l'andamento crescente di tutte le curve rappresentate nei due grafici di Figura 6 indica un aumento dei tempi medi di risposta in tutte le prove acustiche. I risultati del test acustico sembrerebbero indicare l'inesistenza di un effetto sulla vigilanza acustica dovuto alla differente illuminazione.

Analizzando nel dettaglio i tempi medi di reazione dei soggetti nella ST del test acustico, si può notare come questi siano inferiori nel GS (da 341 a 380 ms) rispetto al GC (da 383 a 431 ms), mentre la stessa cosa non avviene nella SB: il GS mostra un incremento dei tempi di risposta da 364 a 377 ms e il GC da 357 a 422. Lo stesso fenomeno non si riscontra nel test visivo, dove, al contrario, il GS nella prova test mostra un incremento di vigilanza, con diminuzione dei tempi di reazione con il procedere della prova, ma non tempi medi di reazione più veloci nei singoli intervalli rispetto al GC. Dunque la differente tipologia luminosa sembrerebbe avere un effetto strettamente sulla performance acustica ma non sulla vigilanza in compiti

acustici. Infatti , con il LED i soggetti mostrano tempi di risposta più rapidi nei singoli intervalli, ma nel corso dell'esperimento si registra un decremento di vigilanza, perché i tempi di risposta aumentano con il procedere della prova. Al contrario, l'illuminazione LED parrebbe influenzare la vigilanza in compiti visivi, nonostante l'assenza di un effetto sulla prestazione visiva.

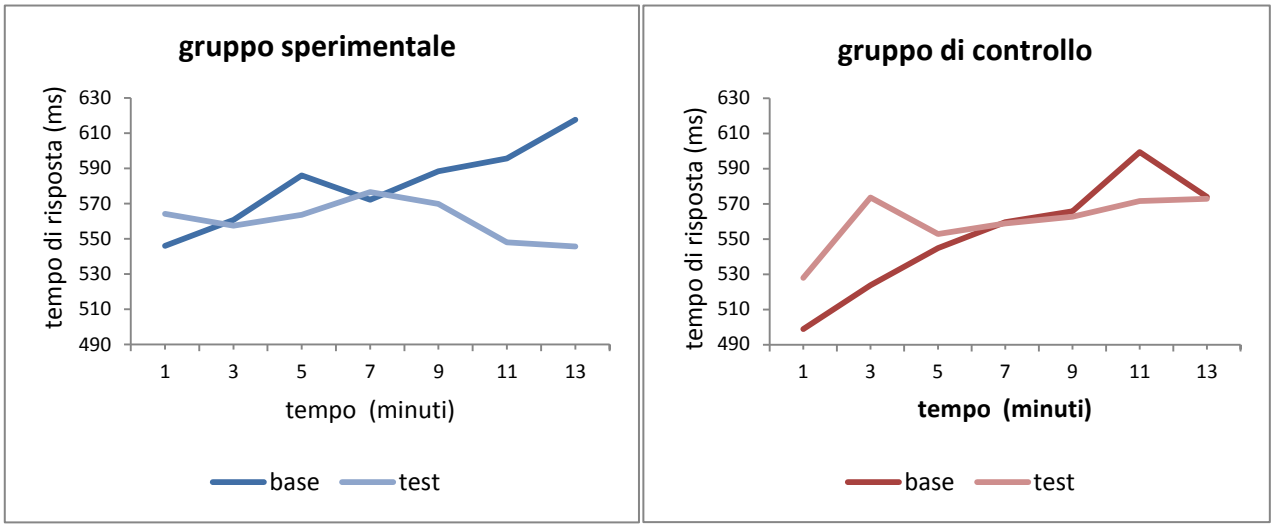

Figura 5. Test visivo: andamento dei tempi di risposta durante le prove per il gruppo sperimentale e per il gruppo di controllo

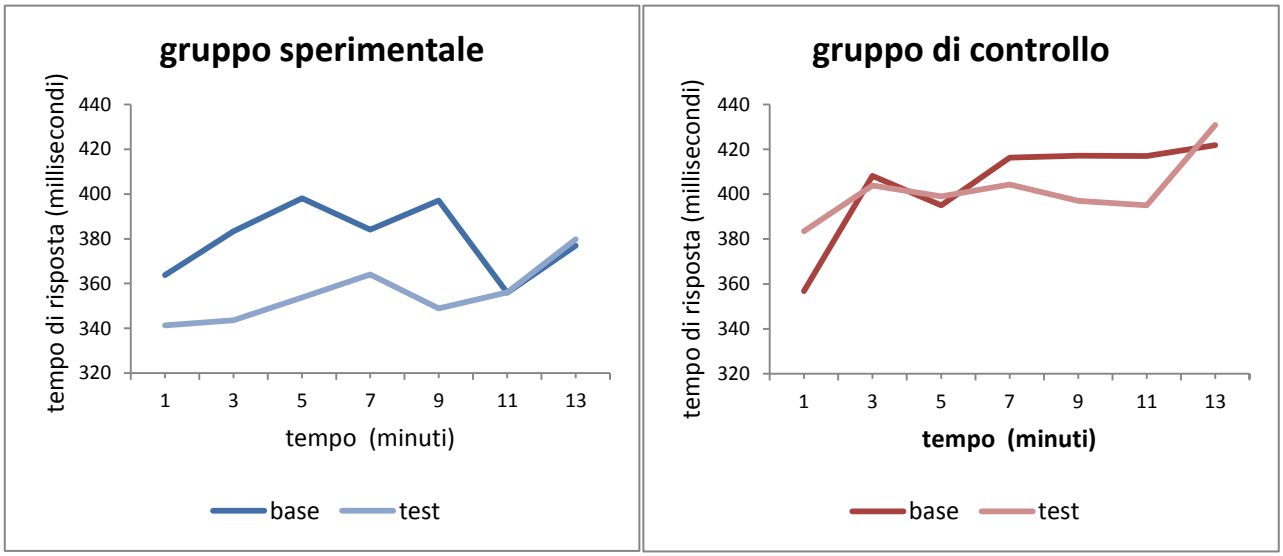

Figura 6. Test acustico: andamento dei tempi di risposta durante le prove per il gruppo sperimentale e per il gruppo di controllo

Successivamente, con l'intento di capire se vi fossero differenze di genere negli andamenti della vigilanza, l'analisi sui dati è stato ripetuto distinguendo i risultati dei partecipanti maschi (M) da quelli delle partecipanti femmine (F).

Il calcolo dei tempi medi di risposta dei soggetti femminili e dei soggetti maschili nei 7 intervalli in cui è suddiviso il tempo di svolgimento delle prove, dà luogo ad andamenti differenti tra M ed F nella prova test del gruppo sperimentale sia nel test visivo che nel test acustico, come mostrato in Figura 7 e Figura 8; al contrario, gli andamenti del gruppo di controllo, non mostrano differenze rilevanti tra soggetti M ed F, mostrando in tutti i casi, SB e ST, di prove acustiche e visive, un incremento nei tempi di risposta con il procedere dell'esperimento.

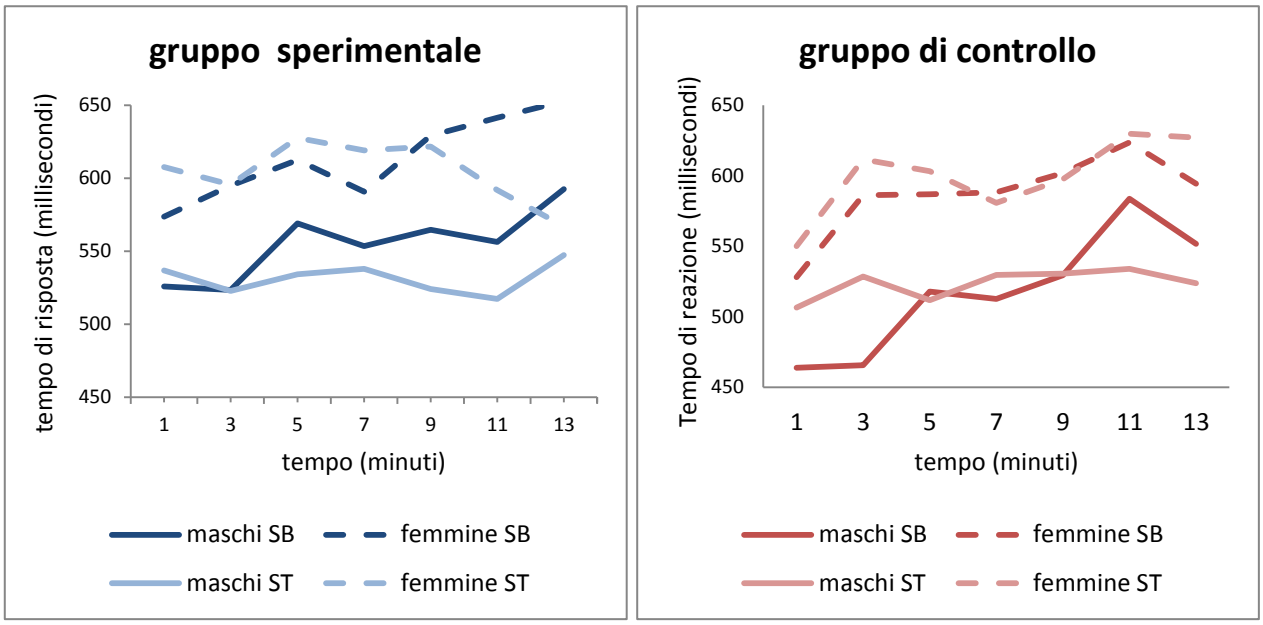

Figura 7. Test visivo: andamento dei tempi di risposta durante le prove suddivisi in maschi e femmine

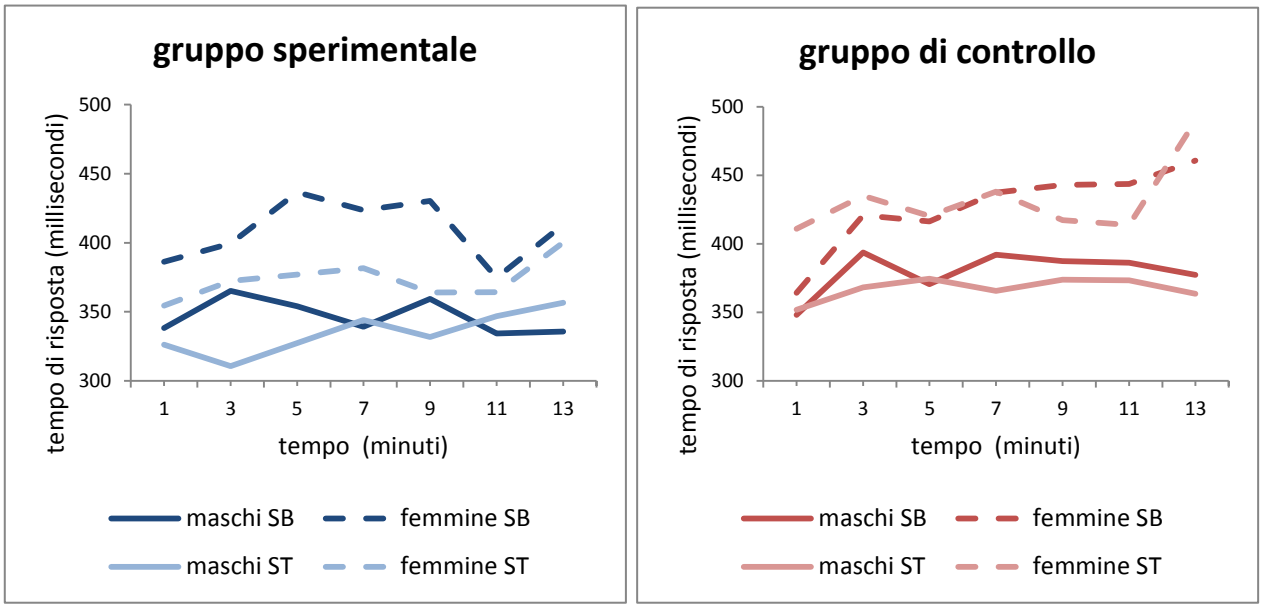

Figura 8. Test acustico: andamento dei tempi di risposta durante le prove suddivisi in maschi e femmine

La differenza maggiormente rilevante tra gli andamenti di M e F nel gruppo sperimentale si manifesta nel test visivo: solamente l'andamento della curva delle femmine registra un decremento dei tempi di risposta nella ST, ma non quella dei maschi che mostra un andamento crescente, seppur leggermente. Invece le due curve M ed F relative alla SB non mostrano particolarità degne di nota, avendo entrambe un andamento crescente che mostra un tipico aumento dei tempi di risposta con il tempo di svolgimento dell'esperimento. Il confronto degli andamenti del GS sembrerebbe indicare che la diversa tipologia di sorgente luminosa ha effetti unicamente sulla vigilanza del genere F, non anche sul genere M, nell'esecuzione di compiti visivi, riducendo i tempi di risposta col procedere del tempo. Nell'analisi dell'intero campione del GS l'effetto sembrava relativo all'intero gruppo, comprensivo di soggetti M ed F, perché i valori dei tempi di risposta delle F sono maggiori di circa 100 unità rispetto a quelli dei M, e riescono quindi ad influenzare

l'andamento della curva dei tempi di risposta relativa all'intero gruppo; inoltre la curva delle F subisce un forte decremento negli ultimi tre intervalli, riuscendo a prevalere sull'andamento della curva dei M che ha un andamento tendenzialmente lineare durante tutto l'esperimento.
Una differenza non rilevante per lo studio della vigilanza, ma pur sempre significativo nello studio delle prestazioni cognitive, si evince dai risultati del gruppo sperimentale nel test acustico. I soggetti F sono più veloci nel rispondere agli stimoli target sia nella ST che nella SB, mentre i soggetti M impiegano all'incirca gli stessi tempi di risposta in entrambe le sessioni; nel gruppo sperimentale, invece, non ci sono differenze nella velocità di risposta allo stimolo target tra M ed F in nessuna delle due sessioni.
Sembrerebbe che la differente illuminazione non abbia effetto sulla vigilanza acustica né nei soggetti M, né nei soggetti F; parrebbe invece esserci un effetto dell'illuminazione sulla prestazione dei soli soggetti F, che sono più veloci nel dare la risposta con la luce LED rispetto ai soggetti M; lo stesso incremento di velocità nei tempi di risposta non avviene con l'illuminazione fornita da lampade alogene.
Dai risultati ottenuti, dunque, l'illuminazione LED sembrerebbe avere effetto unicamente sui soggetti F, non anche sui M; essa inoltre parrebbe avere un'influenza limitata alla sola vigilanza visiva, riducendo i tempi di reazione col procedere dell'esperimento, non essendo stato riscontrato un effetto sulla vigilanza acustica.
La mancanza di un effetto dell'illuminazione LED sulla vigilanza acustica potrebbe essere dovuto alla durata del test, troppo breve per registrare un incremento della vigilanza in compiti acustici che risultano relativamente semplici da eseguire. In alternativa all'aumento del tempo di durata della prova, potrebbe essere aumentata la difficoltà del compito, per poter registrare effetti sulla vigilanza anche dopo pochi minuti.
Lo studio sulla vigilanza sarà approfondito in futuro effettuando un secondo esperimento nel quale verrà utilizzato un paradigma cross-modale, nel quale saranno presentati contemporaneamente ed in modo sincronizzato un compito di vigilanza visiva ed un compito di vigilanza acustica, così da incrementare la difficoltà di esecuzione piuttosto che aumentare la durata del test, per evitare di introdurre effetti di stanchezza dovuti alla lunghezza temporale dell'esperimento che falserebbero i risultati. Il paradigma cross modale risulta più difficile da eseguire rispetto ad un paradigma unimodale, perché il soggetto deve prestare attenzione contemporaneamente a due tipologie di stimoli. Per ottenere dei risultati confrontabili con l'esperimento svolto, saranno utilizzati gli stessi stimoli acustici e visivi.

6 Discussione

Lo studio sperimentale effettuato si inserisce all'interno dell'indagine sugli effetti non visivi della luce sull'uomo, focalizzando l'attenzione sull'influenza della radiazione luminosa su alcuni aspetti della psicologia umana.
Studi precedenti indicano la capacità della radiazione luminosa, ed in particolare di quella emessa nelle lunghezze d'onda corte, di attivare l'attività neuronale in molte aree cerebrali, come quelle governate dal Nucleo Soprachiasmatico, generando una risposta dell'organismo a livello fisiologico. Evidenze sperimentali dimostrano che molte regioni del sistema nervoso centrale sono governate dal NSC attraverso il Locus Coeruleus, comprese aree del cervello che presiedono i processi cognitivi, quali la vigilanza, l'attenzione, la memoria e l'apprendimento. Ancora pochi lavori hanno focalizzato il loro interesse nello studio dell'influenza della luce sulla mente umana, ed in particolare negli specifici processi cognitivi, come le funzioni esecutive e l'attenzione.
Questo lavoro ha indagato se due diverse tipologie di sorgenti luminose, lampade alogene e LED, avessero un effetto differente sulla vigilanza, a causa della loro differente composizione spettrale: si suppone infatti che l'illuminazione LED, avendo una consistente percentuale di emissione nelle lunghezze d'onda corte, renda il compito di vigilanza più facile rispetto all'illuminazione alogena, che invece ha scarsa quantità di radiazione nel blu. Tale ipotesi è supportata dai risultati dello studio svolto l'anno precedente, che hanno evidenziato un effetto sulle funzioni esecutive con l'illuminazione LED, non riscontrato con l'illuminazione alogena.

I risultati di questo studio confermano, parzialmente, l'ipotesi di un effetto positivo dell'illuminazione LED sulla vigilanza. Come parametro di studio per valutare la prestazione è stato utilizzato il decremento di vigilanza, effetto specifico dei compiti di vigilanza dovuto ad un incremento nei tempi di risposta, che tende ad aumentare con la lunghezza temporale del compito.
L'analisi dei risultati mostra una diversa prestazione nel compito di vigilanza visiva con le due sorgenti. Quando i soggetti del GS svolgono il test con l'illuminazione alogena i tempi di risposta aumentano con il passare del tempo, mentre diminuiscono con l'illuminazione LED, indicando che la diversa tipologia luminosa produca un diverso effetto sulla vigilanza: un decremento di vigilanza con le sorgenti alogene ed un incremento di vigilanza con il LED. L'incremento di vigilanza non si riscontra nei soggetti del GC, che svolgono due volte il compito con illuminazione alogena ed in entrambe le sessioni mostrano un aumento dei tempi di risposta durante la prova.
L'incremento di vigilanza visiva che sembra dovuto all'illuminazione LED non è però generalizzabile ad entrambi i sessi, poiché la prestazione del GS risulta fortemente influenzata dall'andamento dei tempi di risposta delle partecipanti femmine: solamente i soggetti femminili mostrano una diminuzione dei tempi di risposta durante la prova, e non i soggetti maschili, i cui tempi di risposta tendono ad aumentare anche con l'illuminazione LED.
Tale differenza di genere risulta una novità rispetto allo studio dell'anno precedente, nel quale i dati analizzati per genere non hanno riportato differenze tra soggetti maschili e femminili nell'effetto della radiazione luminosa sulle prestazioni: nei partecipanti di entrambi i sessi è stata riscontrata un'influenza sulle funzioni esecutive attribuibile sorgenti LED.
Deve inoltre essere evidenziato che l'effetto dello spettro luminoso sulla vigilanza non sembrerebbe indipendente dalla modalità sensoriale; dallo studio condotto l'incremento di vigilanza risulta legato alla funzione visiva, non anche a quella acustica. Nel test acustico non sono infatti emerse differenze nel decremento di vigilanza dovute alle due sorgenti, in quanto i tempi di risposta di entrambi i gruppi di soggetti sono aumentati durante lo svolgimento della prova sia nella sessione base che nella sessione test.
La mancanza di un effetto legato alla diversa illuminazione sulla vigilanza acustica si pensa sia dovuto all'inefficacia del test acustico causata dalla facilità di esecuzione; è dunque necessario approfondire lo studio della performance acustica con un compito di difficoltà maggiore.
Il confronto dei risultati ottenuti nello studio svolto lo scorso anno con quelli qui presentati sembrerebbero concordare nell'indicare che lo spettro luminoso del LED influenzi le funzioni attentive di tipo visivo; tuttavia, un effetto della luce blu sulle funzioni uditive non è del tutto da escludere e necessita di uno studio più approfondito.

7 Conclusioni

Dagli studi svolti negli ultimi due anni con la finalità di dare una risposta all'interrogativo se la sorgente LED produca degli effetti non-visivi sull'uomo, sembra emergere un'influenza dovuta allo spettro luminoso su alcuni meccanismi cognitivi; i risultati di questi lavori sembrerebbero confermare ricerche precedenti sulla capacità della luce blu di produrre effetti non-visivi, non solamente sui ritmi circadiani, ma anche sulla mente umana.
Il confronto con le sorgenti tradizionali indica come il LED abbia un effetto positivo sulla vigilanza e sulle funzioni esecutive, che le lampade alogene non producono: tale effetto è stato imputato alla particolare composizione spettrale del LED con un picco nel campo del blu ed un picco nel campo del giallo. È importante notare come la lampada LED utilizzata emettesse una luce bianca con temperatura di colore di 4000 K (vedi tab.1) e che dunque la componente blu nello spettro fosse percentualmente inferiore a quella gialla; l'aver riscontrato effetti positivi anche con tale composizione spettrale indica che non serve una luce monocromatica blu, ma anche una luce bianca è in grado di incrementare prestazioni cognitive, e che non è necessaria una temperatura di colore molto elevata ma è sufficiente una temperatura di colore neutra.

I risultati ottenuti hanno grande importanza a livello scientifico perché sono un primo indizio di come uno specifico spettro luminoso abbia la capacità di influenzare i meccanismi mentali, ed aprono un campo di indagine alla ricerca futura in cui devono essere sia approfonditi quanto ampliati.
In particolare è importante indagare quale sia l'influenza delle caratteristiche ambientali sui risultati ottenuti, ossia come questi possano modificarsi in funzione di un differente layout sperimentale, per poter successivamente trasmettere l'attività ad applicazioni reali. Oltre alla temperatura di colore delle lampade, fattori che possono incidere sulle prestazioni dell'individuo, sia sul piano psicologico che fisiologico, sono il posizionamento delle sorgenti rispetto al soggetto, il livello di illuminamento fornito sia all'occhio che sul piano si lavoro, il coefficiente di riflessione del materiale presente sulle pareti, nonché la presenza e la dimensione delle aperture che danno ingresso alla luce naturale; tali elementi, infatti, influiscono sia sulla quantità che sulla qualità della radiazione luminosa che colpisce la retina.
A livello progettuale i risultati sperimentali complessivi ottenuti nei due studi svolti hanno risvolti pratici interessanti, per la loro diretta applicabilità nel progetto illuminotecnico di edifici quali scuole, uffici, ospedali, torri di controllo ecc., con l'intento di facilitare i compiti cognitivi ed aumentare la produttività, o semplicemente per ridurre situazioni di pericolo. A causa dei possibili rischi per la salute umana derivanti dall'utilizzo indiscriminato di sorgenti luminose con elevata percentuale di radiazione blu, deve comunque essere sempre raccomandata una progettazione consapevole.

8 Riferimenti bibliografici

1. Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), "Ocular lighting effects on human physiology and behaviour" (2004) Wien, Austria CIE, p. 158.
2. T.L. Shanahan, C. Czeisler, "Physiological Effects of Light on the Human Circadian Peacemaker", Seminars in Perinatology, n. 4 (2000), pp. 299-320.
3. Mistlberger R.E., Refinetti R., Kriegsfeld L.J., Circadian Rhythms and Physiological Process, Enciclopedia of Sleep 2013, pp. 418-425.
4. 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.
5. Provencio I, Rodriguez IR, Jiang G, Hayes WP, Moreira EF, Rollag M.D. Novel human opsin in the inner retina. Journal of Neural Science 2000; 20: 600-605
6. A.J. Lewy, T.A. Wehr, F.K. Goodwin, D.A. Newsome, S.P. Markey, "Light suppresses melatonin secretion in humans", Science , n. 4475 (1980), pp.1267-1269.
7. Rea M.S., Figueiro M.G., Bierman A., Hamner R., Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system, Lighting Research and Technology 2011, 0, pp. 1-12.
8. D. Gall, Bieske K., "Definition and measurement of circadian radiometric quantities" , Proceedings of the CIE Symposium on Light and health-non visual effects, 30 Settembre – 2 Ottobre Vienna, 2004, pp. 129-132.
9. Kozakov R., Franke S., Schöpp H, Approach to an Effective Biological Spectrum of a Light Source, Leukos 2008, 4, pp.255-263.
10. 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.
11. 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.
12. Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., Brown T.M., Cooper H.M., Czeisler C., Figueiro M.G., Gamlin P.D., Lockley S.W., O'Hagan J.B., Price L.L.A., Provencio I., Skene D.J., Brainard G.C., Measuring and using light in the melanopsin age, Trends in Neurosciences 2014, 1, pp. 1-9.

13. G. Glickman, J.P. Hanifin, M.D. Rollag, J.Wang, H. Cooper, G.C. Brainard, (2003), Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans, J. Biol. Rhythms 18 71–79
14. L. Bellia, F. Bisegna, "From radiometry to circadian photometry: A theoretical approach", Building and Environment n. 62 (2013), pp. 63-68.
15. 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.
16. A.J. Lewy, H.A. Kern, N.E. Rosenthal, T.A. Wehr, "Bright artificial light treatment of a maniac-depressive patient with seasonal mood cycle", The American Journal of Psychiatry, n. 139 (1982), pp. 1496-1498.
17. E.J.W. Van Someren, A. Kessler, M. Mirmirann, D.F. Swaab, "Indirect bright light improves circadian rest-activity rhythm disturbances n demented patients", Biological Psychiatry, n. 41 (1997), pp. 955-963.
18. Boivin D.B., Shechter A., Light and Melatonin Treatment for Shift Work, Enciclopedia of Sleep 2013, pp. 81-95.
19. G. Vandewalle, P. Maquet, D.J. Dijk, "Light as a modulator of cognitive brain function", Trends in Cognitive Sciencesn. 13 (2009), pp. 429–438.
20. 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.
21. Barbalace M., Gugliermetti F., Lucchese F., Bisegna F., Studio per la valutazione degli effetti della luce sugli esseri umani, Enea 2012.
22. Burattini C., Gugliermetti F., Ferlazzo F., Piccardi L., Giannini A. M., Bisegna F., Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sugli aspetti percettivi e circadiani, Enea 2013.
23. Stablum F., L'attenzione, Ed. Carocci 2002.
24. G. Aston-Jones, "Brain structures and receptors involved in alertness", Sleep Medicine, n. 6 (2005), pp. S3-S7.
25. C.W. Berridge, B.D. Waterhouse, "The locus coeruleus-noradrenergic system: Modulation of behavioural state and state-dependent cognitive process, Brain Research Reviews, n. 42 (2003), pp. 33-84.
26. Yoon S.Y.R., Shapiro C.M., Chronobiology of Sleep –Circadian Rhythms, Behavior, and Performance, Enciclopedia of Sleep 2013, pp. 426-434.
27. R. Parausuraman, J.S. Warm, J.E. See, "Brain System of Vigilance", The attentive brain (1998), pp. 221-256, The MIT Press, Cambridge.
28. J. E. See, S. R. Howe, J.S. Warm, W.N. Dember, "Meta-Analysis of the Sensitivity Decrement in Vigilance", Psychologica Bullettin, n. 117 (1995), pp. 230-249.
29. W.P. Colquhoun, A. Baddeley, "Influence of Signal Probability during Pretraining on Vigilance Decrement", Journal of Experimental Psychology, n. 73, pp. 153-155.
30. Oken B.S., Salinsky M.C., Elsas S.M., Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurements, Clinical Neurophysiology 2006, 117, pp. 1885-1901.
31. W. J. M. Van Bommel, G.J Van den Beld, "Lighting for work: a review for visual and biological effects" Lighting Research and Technology, n. 4 (2004), pp. 255-269.
32. M. McCarthy, W. Waters, "Decreased attentional responsività during sleep deprivation: orienting responce latency, amplitude and habituation", Sleep, n. 20 (1997), pp. 115-123.

9 Abbreviazioni ed acronimi

LED, light emitting diode
ipRGC, cellule gangliari intrinsecamente foto sensitive
SNC, Nucleo Soprachiasmatico
CI, funzione di sensibilità circadiana

LC, Locus Coeruleus
GRS, resistenza galvanica cutanea
NE, norepinefrina
EEG, elettroencefalogramma
GS, gruppo sperimentale
GC, gruppo di controllo
SB, sessione base
ST, sessione test

Curricula degli autori

Dr.ssa Chiara Burattini. Dottoranda al secondo anno di studi presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università di Roma "Sapienza", studia gli effetti non visivi della luce sull'essere umano, e si occupa di applicazioni illuminotecniche e colorimetriche in ambiente spaziale. È autrice di circa 10 pubblicazioni in riviste e congressi nazionali ed internazionali, e vincitrice del Premio Scientifico "I Guidoniani" nell'anno 2013.

Prof. Fabio Ferlazzo. Professore associato presso il Dipartimento di Psicologia dell'Università di Roma "Sapienza" dove insegna i moduli Processi Cognitivi e Decisionali, Attenzione e Percezione, Ergonomia Cognitiva presso corsi di laurea triennale e specialistica. È membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Psicologia e Scienza Cognitiva, attivato presso il Dipartimento di Psicologia dell'Università di Roma "La Sapienza", corso nel quale svolge regolarmente lezioni su argomenti relativi alla metodologia della ricerca psicologica. Dal 2004 ad oggi è membro dell'esecutivo della Sezione di Psicologia Sperimentale dell'Associazione Italiana di Psicologia e dal 2005 fa parte del Comitato Editoriale del Giornale Italiano di Psicologia e della Rivista di Psicologia; inoltre Il Prof. Ferlazzo è referee per diversi giornali scientifici nazionali ed internazionali. È autore di circa 60 pubblicazioni su riviste e congressi nazionali ed internazionali.

Prof.ssa Laura Piccardi. Ricercatore con PhD presso il Dipartimento di Scienze della Vita, Salute e Ambiente dell'Università dell'Aquila dove si occupa di psicologia cognitiva e neuroimmagine. Insegna "Neuropsicologia Sperimentale" nel Corso di laurea specialistica in Psicologia Applicata, Clinica e della Salute. Dal 1999 ad oggi svolge attività stabile di ricerca presso il Centro Ricerche di Neuropsicologia dell'I.R.C.C.S. Fondazione Santa Lucia di Roma sui temi di neuroscienze cognitive e medicina della riabilitazione. È membro delle associazioni scientifiche SINP (Società Italiana di Neuropsicologia), AIP (Associazione Italiana di Psicologia), AIMAS (Associazione Italiana di Medicina Aerospaziale) e referente di molte riviste scientifiche internazionali. È autrice di oltre 70 pubblicazioni su riviste e congressi nazionali ed internazionali.

Prof.ssa Anna Maria Giannini. Professore ordinario presso il Dipartimento di Psicologia dell'Università di Roma "Sapienza". Responsabile del Laboratorio di Psicologia Sperimentale ed Applicata. Membro del gruppo di ricerca di Psicologia legale. Esperta nei campi di Psicologia del lavoro, Psicologia motivazionale e Valutazione psicologica, attualmente si occupa di Psicologia clinica, Psicologia sociale e Psicologia della personalità, con particolare interesse verso lo studio dei dilemmi morali e della vittimologia. Attualmente insegna Psicologia generale e Storia della Psicologia, Psicologia della legalità e della sicurezza (Laurea Triennale in Scienze Psicologiche sociali e Laurea Specialistica in Psicologia del Lavoro e delle Organizzazioni); inoltre insegna presso la Scuola di Specializzazione in Psicologia Clinica, Tecniche di gestione dello stress e presso la Scuola di Specializzazione in Valutazione Psicologica, Metodologia in Psicologia Giuridica e Forense.

Prof. Franco Gugliermetti. Professore ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) della Facoltà di Ingegneria di "Sapienza", Università di Roma. Direttore del DIAEE dal 01.11.2013. Coordinatore del dottorato in "Energia e Ambiente" di Sapienza. Responsabile del Laboratorio di Illuminotecnica ed energia raggiante del DIAEE. Coordinatore del corso universitario di perfezionamento in "Smart cities and communities: progettazione e gestione della città orientata al benessere". Autore di oltre di circa duecentoventi pubblicazioni nel campo della Fisica Tecnica è stato coordinatore e responsabile di numerosi progetti di ricerca per organizzazioni Nazionali e Internazionali, e ha siglato, come responsabile scientifico e referente, accordi di collaborazione con Enti ed organizzazioni nazionali ed estere nell'ambito della protezione e valorizzazione dei beni culturali e ambientali, nonché nello sviluppo di nuove tecnologie, sistemi e componenti ecocompatibili per la riduzione dei consumi energetici. Opera come referee per congressi internazionali e per riviste scientifiche internazionali.

Prof. Fabio Bisegna. Ingegnere con PhD in Fisica Tecnica. Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università di Roma "Sapienza". Docente presso la Facoltà di Architettura di "Sapienza" Università di Roma dei corsi di "Illuminotecnica e Progettazione del colore" e "Fisica Tecnica", è autore di circa 100 lavori pubblicati su riviste e congressi nazionali e internazionali. È referente per importanti congressi e riviste scientifiche internazionali, partecipa attivamente a gruppi di ricerca nazionali e internazionali. Attualmente, si occupa degli aspetti energetici e visivi connessi con la luce naturale e artificiale, sia in ambiente aperto che in ambiente confinato, e alla loro integrazione, con particolare riferimento al potenziale impiego di materiali trasparenti innovativi e di soluzioni tecnologiche avanzate di illuminazione artificiale (Led, Oled, PSALI, etc.).