



Approfondimento sperimentale sulla capacità delle nuove sorgenti di illuminazione artificiale LED di influenzare le performance, la qualità e la quantità del sonno

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

APPROFONDIMENTO SPERIMENTALE SULLA CAPACITÀ DELLE NUOVE SORGENTI DI ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE LED DI INFLUENZARE LE PERFORMANCE, LA QUALITÀ E QUANTITÀ DEL SONNO

F. Bisegna, C. Burattini, G. Curcio, L. Piccardi, F. Ferlazzo, A.M. Giannini, F. Gugliermetti
(Sapienza Università di Roma, DIAEE)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Approfondimento sperimentale sulla capacità delle nuove sorgenti di illuminazione artificiale led di influenzare le performance, la qualità e quantità del sonno"

Responsabile scientifico ENEA: Ornella Li Rosi



Responsabile scientifico: 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

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 LA VIGILANZA	6
1.2 IL SONNO.....	8
2 ATTIVITÀ PRECEDENTI.....	9
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ.....	10
3.1 I TEST SVOLTI	11
3.2 L'AMBIENTE SPERIMENTALE.....	12
3.3 IL PROTOCOLLO SPERIMENTALE	14
4 RISULTATI	15
4.1 LA VIGILANZA	15
4.2 IL SONNO.....	17
5 DISCUSSIONE.....	21
6 CONCLUSIONI.....	22
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	23
8 APPENDICE	28

Sommario

Negli ultimi anni la ricerca internazionale ha dimostrato che esiste una stretta relazione tra radiazione luminosa e ritmi circadiani, influenza del comportamento umano e stimolazione del funzionamento cerebrale; tali effetti non-visivi sembrano dipendere principalmente dall'intensità luminosa, dalla composizione spettrale, dalla durata dell'esposizione e dall'ora del giorno in cui essa avviene, ma ad oggi non sono ancora chiari gli effetti su specifiche funzioni cognitive, né si può considerare sufficientemente nota l'influenza della nuova tecnologia LED.

In quest'ambito, precedenti studi svolti dallo stesso gruppo hanno evidenziato che, rispetto all'illuminazione prodotta con sorgenti alogene, un'illuminazione LED con temperatura correlata di colore (CCT) neutra (4000K), produce effetti positivi su alcuni aspetti dell'attenzione, quali le funzioni esecutive e la vigilanza visiva: con l'illuminazione LED è stata riscontrata la capacità di produrre molteplici rappresentazioni mentali contemporaneamente e di incrementare il livello di vigilanza durante l'esecuzione di un compito di attenzione.

La presente attività approfondisce gli studi svolti precedentemente considerando sorgenti con differente composizione spettrale e temperatura di colore: in un primo esperimento sono state confrontate le stesse lampade utilizzate nei lavori precedenti, alogene e LED neutro, ed in un secondo esperimento lo studio è stato ripetuto con due scenari luminosi LED, con temperatura correlata di colore calda (3000 K) e fredda (6800), per investigare la differente influenza che tali sorgenti hanno a livello psicofisiologico. In entrambi gli esperimenti sono stati analizzati sia gli effetti immediati sulle capacità attentive in un compito di vigilanza cross-modale, sia gli effetti conseguenti sul sonno. I risultati di questo studio mostrano un effetto positivo delle illuminazioni sperimentali (LED 4000 K e LED 6800 K) sulle prestazioni di vigilanza visiva, ma non sulla vigilanza acustica, se paragonato alle illuminazioni calde (alogena 2800 K e LED 3000 K), e l'assenza di effetti significativi dell'illuminazione, sia alogena sia LED, sul sonno dei soggetti partecipanti.

La conoscenza approfondita dell'influenza che la luce ha sulla mente umana a livello cognitivo apre la strada ad una nuova tipologia di progettazione illuminotecnica, finalizzata tanto al comfort visivo quanto al benessere fisiologico e all'efficienza cognitiva.

1 Introduzione

La scoperta del ruolo che la radiazione luminosa riveste nella regolazione dei ritmi circadiani umani [1] ha aperto la strada ad un nuovo indirizzo di ricerca e applicativo parallelo allo studio del fenomeno della visione.

Accanto al tradizionale percorso visivo, nel quale la luce è recepita dai coni e dai bastoncelli, e da questi trasformata in un segnale elettrico che viene elaborato dalla corteccia visiva primaria per formare l'immagine, esiste anche un sistema non-visivo, o circadiano, che utilizza la luce per regolare le funzioni fisiologiche secondo un andamento giornaliero di circa 24 ore. In questo sistema il segnale luminoso viene recepito dalle cellule gangliari (ipRGC), fotorecettori scoperti di recente nella retina [2, 3] che, attraverso il tratto retino-ipotalamico, lo proiettano verso il Nucleo Suprachiasmatico (NSC)[4], ovvero il centro neurale che presiede alla sincronizzazione dei ritmi endogeni [5]: in risposta allo stimolo luminoso il NSC determina, in particolare, l'inibizione della secrezione di melatonina [6] e la produzione di cortisolo [7], l'innalzamento della temperatura corporea [8] e del battito cardiaco [9], regola il ciclo sonno-veglia, e influenza l'espressione genetica [10].

Il picco di assorbimento della melanopsina (480 nm), il fotopigmento contenuto nelle ipRGC [11], così come gli studi svolti per determinare lo spettro di azione per la soppressione della melatonina [12,13] e lo spettro di efficienza circadiana [14, 15], dimostrano come il sistema non-visivo sia massimamente sensibile alla radiazione contenuta nella banda del blu [16] e limitatamente sensibile alla regione del giallo-verde [17]. L'effetto a livello circadiano non è prodotto esclusivamente dalla luce blu, ma è stato dimostrato che anche una esposizione alla luce bianca, tanto durante la notte [18, 19, 20], che di giorno [21], determina un incremento di allerta e vigilanza, e una riduzione della sonnolenza. È stato inoltre dimostrato che gli effetti non-visivi non sono limitati ad una stimolazione luminosa di elevata intensità, ma intervengono già con normali livelli di illuminamento presenti negli edifici e persino con luce debole [22, 23].

Oltre alla regolazione circadiana delle funzioni biologiche, la luce esercita un effetto diretto di attivazione delle funzioni cerebrali [24, 25]: misure elettroencefalografiche (EEG) hanno dimostrato che la luce riduce l'attività cerebrale alle basse frequenze, espressione di stati di sonno, e studi svolti con il supporto della risonanza magnetica funzionale e con la tomografia ad emissione di positroni (PET) hanno riportato un aumento dell'allerta e dell'attività mentale conseguente allo stimolo luminoso [26, 27].

Effetti sull'allerta sono stati evidenziati dall'attivazione del locus coeruleus (LC), ipotalamo e di alcune parti del talamo [28], mentre effetti sulle funzioni attentive sono state osservate per l'influenza della luce sulla corteccia prefrontale dorso-laterale e sulla corteccia cingolata anteriore, sul solco intraparietale e temporale superiore [27]; la memoria di lavoro e la memoria a lungo termine risultano stimulate dalla luce come conseguenza dell'attivazione della corteccia frontale destra, della corteccia parietale e dell'ippocampo [29].

Le aree cerebrali corticali e subcorticali influenzate dalla luce e le funzioni cognitive che risultano stimulate, indicano l'esistenza di un effetto positivo dell'illuminazione sulle performance. Uno studio svolto da Smolders et al. (2012) [30] ha mostrato come elevati livelli di illuminamento inducano un miglioramento dell'attenzione sostenuta, della ricerca visiva e della memoria di lavoro, mettendo inoltre in evidenza che le prestazioni cognitive migliorano maggiormente quando i partecipanti sono mentalmente affaticati; in Corbett et al. (2012) [31] un'ora di trattamento con luce bianca ad elevata intensità somministrata al mattino produce un incremento significativo delle capacità cognitive (velocità ed accuratezza), della memoria e dell'attenzione.

I lavori che hanno indagato l'effetto della composizione spettrale sulle prestazioni cognitive, sperimentando differenti scenari luminosi prodotti con varie tipologie di sorgenti o con diverse temperature di colore, hanno ottenuto risultati contrastanti, ma gli studi più recenti indicano un effetto tendenzialmente positivo della luce blu [32] sulle prestazioni cognitive umane.

È stato dimostrato che anche una breve esposizione di 20 secondi con luce blu (460 nm) produce un incremento dell'allerta e della velocità di elaborazione delle informazioni, che non si verifica con la stessa esposizione ad una luce gialla (580 nm) [33]. Uno studio effettuato su impiegati di un call center, utilizzando un'illuminazione di elevata CCT, ha dimostrato che un'illuminazione fluorescente a 17000 K aumenta

consistentemente l'allerta, la concentrazione, la memoria e migliora l'umore, rispetto ad un'illuminazione calda a 3000 K [34]; similmente Viola et al. [35], utilizzando due scenari luminosi analoghi (17000 vs. 4000 K), hanno confermato l'effetto positivo delle sorgenti fredde su allerta, prestazioni, fatica e qualità del sonno. Inoltre, uno studio condotto su studenti, ha dimostrato che un'illuminazione prodotta con luce bianca diretta (4000 K) arricchita con luce blu indiretta (14000 K) migliora la velocità di elaborazione cognitiva e la concentrazione, rispetto all'illuminazione tradizionale realizzata con lampade fluorescenti a 3000 K e 4000 K [36]. Sorgenti con CCT estremamente elevate non vengono attualmente utilizzate nelle comuni illuminazioni di interni, e rappresentano esempi estremi di applicazione della luce blu che sono utili per massimizzare effetti che con sorgenti con CCT tradizionalmente impiegate possono non emergere, o meglio rimanere nascosti. Laddove risultati sperimentali di tali esperienze portassero però a risultati importanti, potrebbero essere la base per la realizzazione di sistemi per l'ottenimento di particolari condizioni, con possibili future utilizzazioni in specifici ambiti reali, come ad esempio gli ambienti estremi. È stato dimostrato che anche con le sorgenti fluorescenti fredde commerciali (6500 K), dopo 90 minuti di esposizione a bassi livelli di illuminamento (40 lux), si ottiene un incremento delle prestazioni cognitive (attenzione sostenuta) rispetto a sorgenti con CCT calda (2500 K e 3000 K); lo stesso studio ha inoltre rilevato una riduzione della sonnolenza e della secrezione della melatonina[37], ma nessuna indicazione è fornita rispetto alla gradevolezza di tale illuminazione.

Il lavoro qui presentato è volto ad indagare l'effetto prodotto dai LED sulla vigilanza e sul sonno; i LED sono una nuova tecnologia di emissione luminosa, che sta diventando di largo utilizzo per le sue caratteristiche di elevata efficienza luminosa e larga varietà di prodotti disponibili, capaci anche di sostituire le comuni sorgenti alogene e fluorescenti, ma i cui effetti sulla salute umana e sulle prestazioni cognitive non sono ancora stati definiti. I LED utilizzati nelle comuni applicazioni (domestica, scuole, uffici, ospedali) sono del tipo LED blu e fosfori gialli, il cui spettro di emissione è costituito da due picchi, uno nella regione del blu e l'altro nel giallo, variabili in relazione alla temperatura correlata di colore che si vuole ottenere.

Il lavoro è finalizzato a verificare se tali LED influenzino le funzioni cognitive, attraverso uno studio sul sonno e sulla vigilanza. L'obiettivo è duplice: da un lato testarli come alternativa alle sorgenti alogene per sapere se i LED inducano un effetto psicofisiologico non riscontrabile con le lampade tradizionali, dall'altro mettere a confronto due diverse composizioni spettrali per capire come l'effetto sia legato alla CCT.

1.1 La vigilanza

In ambito psicologico la vigilanza è associata ai vari gradi del livello di veglia, in funzione della prontezza a rispondere ad uno stimolo; è un aspetto dell'attenzione, definibile 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 [38].

Da un punto di vista anatomico, l'area celebrale responsabile dello stato di vigilanza è il sistema fronto-parietale destro [39]. La regolazione della vigilanza è dovuta al NSC, che, come conseguenza dello stimolo luminoso, fa variare secondo il ritmo circadiano l'attività neuronale dalla norepinefrina (NE), un neurotrasmettitore rilasciato dal Locus Coeruleus (LC), responsabile dell'attivazione talamica e corticale [40]. 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 [10].

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; questo 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 [41].

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 [42].

I paradigmi sperimentali per indagare la vigilanza si possono classificare in due tipologie: alcuni compiti 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. Altri compiti 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.

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, teta 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 teta 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 [43].

Gli studi riguardanti l'effetto della luce sulla vigilanza sono stati condotti principalmente di notte, in condizioni di privazione di sonno, in modo da essere svolti in condizioni di bassi livelli di vigilanza ed amplificare l'effetto dell'illuminazione, ma anche per sfruttare l'effetto indiretto della soppressione di melatonina, quando questa è al massimo della concentrazione nel sangue [18, 44, 45, 46]; la maggioranza di tali studi riporta un effetto positivo della stimolazione luminosa ad elevata intensità sulla vigilanza, corrispondente ad una diminuzione della sonnolenza e della concentrazione di melatonina. Al contrario, gli studi condotti durante le ore diurne non hanno trovato effetti della luce sulla vigilanza [47, 44]; il lavoro di Phipps-Nelson et al. (2003) [21] ha dimostrato che 5 ore di esposizione ad una illuminazione di elevata intensità (1000 lux) durante il giorno ha effetto sulla vigilanza, incrementando i tempi di reazione in un compito di vigilanza psicomotoria e riducendo significativamente la sonnolenza.

Dagli studi compiuti sembrerebbe che gli effetti della luce della vigilanza dipendano dalla composizione spettrale, ossia che la luce blu determini un miglioramento delle prestazioni di questa funzione mentale. Lockley et al. (2006) [48] riportano che l'esposizione ad una luce monocromatica blu (460 nm) per 6 ore e 30 minuti durante la notte migliora le prestazioni di vigilanza, riducendo i tempi di risposta in un compito di vigilanza acustica, rispetto ad un'illuminazione monocromatica gialla (555 nm) della stessa intensità (12,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ e 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ rispettivamente, con una stessa densità di fotoni pari a 2800 fotoni per cm^2 al secondo). Risultati simili sono ottenuti da Chellappa et al. (2011) [37] con una illuminazione policromatica: la sperimentazione ha dimostrato che, rispetto ad un'illuminazione calda (2500 e 3000 K), una luce bianca fredda (6500 K) incrementa il livello di allerta e migliora la prestazione in un compito di vigilanza.

1.2 Il sonno

Il ciclo sonno-veglia è una delle principali funzioni fisiologiche che seguono un andamento circadiano regolate dal NSC; esso consiste in due stati, il sonno e la veglia appunto, che generalmente si presentano come reciprocamente esclusivi [10] e ciclicamente alternati. Per questo motivo la descrizione del sonno richiede di affrontare anche la trattazione della veglia, in quanto i due stati sono strettamente interconnessi.

Due sono i processi alla base del ciclo sonno-veglia: il processo S che aumenta esponenzialmente con le ore di veglia promuovendo la necessità di sonno ed il processo C che regola la veglia durante il giorno e si riduce esponenzialmente dall'inizio del sonno e per tutta la sua durata [49]. Diversi livelli di veglia sono regolati dal processo C che aumenta gradualmente durante il giorno, subisce una leggera flessione nel primo pomeriggio, per raggiungere un picco nel tardo pomeriggio e poi decresce gradualmente fino a raggiungere un minimo in piena notte. I due processi C ed S sono strettamente legati e la loro interazione determina la ciclicità della funzione sonno-veglia ed il passaggio da uno stato all'altro (1993); durante il giorno la veglia è mantenuta dal processo C che determina un aumento dell'allerta e contemporaneamente ingenera un aumento della tendenza al sonno, mentre durante la notte il sonno, permesso grazie ad una persistente diminuzione dello stato di veglia, riduce la necessità di sonno.

A livello cerebrale i due stati di veglia e sonno si traducono nell'attivazione di due differenti aree, rispettivamente il sistema di attivazione reticolare ascendente (ARAS) ed il nucleo preottico ventrolaterale (VLPO). Il primo è un sistema composto da cinque nuclei: il locus coeruleus (LC), il nucleo raphe (RN) ed il nucleo tuberomammillare (TMN) che proiettano verso la corteccia cerebrale, il tegmentale laterodorsale (LDT) e il nucleo peduncolopontino (PPT) che proiettano verso il talamo; l'interazione di questi nuclei regola la veglia, l'allerta e l'attenzione. Il VLPO produce l'acido gamma-aminobutirico, un neurone che proietta verso l'ARAS e ne induce l'inibizione, causando una diminuzione della veglia e promuovendo il sonno.

L'inibizione reciproca di ARAS e VLPO determina il passaggio dallo stato di sonno a quello di veglia e viceversa: il sonno si verifica quando lo stato di attivazione del VLPO genera l'inibizione dell'ARAS, mentre quando l'attivazione dell'ARAS è maggiore dell'attivazione del VLPO si passa allo stato di veglia. Questo meccanismo di attivazione-inibizione è regolato dal NSC attraverso la stimolazione di neuroni ipotalamici ricchi di oressine, neurotrasmettitori dell'allerta che producono un effetto eccitatore nell'ARAS.

Il ciclo sonno-veglia è inoltre regolato dalla secrezione di melatonina da parte della ghiandola pineale, un ormone la cui concentrazione nel sangue segue una ritmicità circadiana grazie alla regolazione da parte del NSC. La melatonina è anche definito l'ormone del sonno perché la sua secrezione avviene durante la notte, raggiungendo livelli massimi tra le 2:00 e le 4:00 per poi decrescere ed essere inibita al mattino; la melatonina influenza l'architettura del sonno amministrando il passaggio dal sonno REM (rapid eye movement) allo stadio NREM (non-rapid eye movement) e modifica la durata del sonno durante le differenti stagioni in funzione della diversa lunghezza del giorno e della notte.

Quando il ritmo sonno-veglia endogeno si discosta dallo stimolo ambientale del ritmo naturale giorno-notte si possono verificare disordini di natura circadiana. La sindrome della fase di sonno posticipata (Delayed Sleep-Phase Syndrome DSPS) e della fase di sonno anticipata (Advanced Sleep-Phase Syndrome ASPS) sono caratterizzate dall'avere i tempi di sonno e di veglia che intervengono dalle 3 alle 6 ore rispettivamente dopo e prima gli orari consueti; nel primo caso ciò determina insonnia ed eccessiva stanchezza giornaliera, che si riverberano in un peggioramento delle prestazioni cognitive, mentre nel caso della ASPS si verificano risvegli nelle prime ore della mattina, sonnolenza e fatica pomeridiane. Il ciclo free-running è una completa e costante desincronizzazione del ritmo circadiano endogeno, che tende a durare meno di 24 ore, rispetto all'andamento naturale di luce e buio, comportando lo sfasamento giornaliero dei tempi di sonno e veglia; tale disordine si verifica principalmente in soggetti totalmente ciechi, in cui l'azione regolatrice dello stimolo luminoso può non avere effetto. Il ritmo sonno-veglia irregolare, probabilmente dovuto a disfunzioni del NSC, è presente in soggetti affetti da forme di demenza, ritardo mentale o lesione cerebrale: in essi il normale andamento ciclico non avviene ed al contrario si verificano episodi di veglia e sonno di lunghezza variabile sia di giorno che di notte. Frequente tra i lavoratori notturni, lo "shift work sleep disorder" è una desincronizzazione del ritmo circadiano indotta dai turni lavorativi che causa problemi quali

insonnia, sonno non riposante, stanchezza, e può provocare problemi metabolici, cardiovascolari e diabete; è stata inoltre trovata una correlazione tra i soggetti affetti da tale disordine e l'insorgenza di alcune forme di cancro. Tra i disordini del sonno è incluso il jet-lag, corrispondente ad un repentino sfasamento del ritmo circadiano endogeno rispetto all'andamento esogeno giorno-notte causato da viaggi in cui avviene un cambio di fuso orario: si può esperire il jet-lag già nel caso di uno spostamento di fuso orario di 3 ore e gli effetti variano in funzione del numero di ore di differenza, della direzione verso cui si viaggia, ma anche in relazione alla risposta del singolo organismo; i sintomi, tra cui si annoverano sonnolenza e fatica durante il giorno, insonnia notturna, alterazioni dell'umore e problemi gastrointestinali, sono temporanei e spariscono con il riallineamento del ritmo interno allo stimolo luce-buio esogeno dopo alcuni giorni, variabili in funzione della capacità di adattamento dell'organismo.

Il livello di sonno o di veglia può essere misurato attraverso l'attività encefalica per mezzo dell'EEG: durante il sonno vengono registrati i ritmi lenti teta e delta, ed il movimento oculare lento; inoltre durante la transizione tra la fase di veglia e quella di sonno può essere osservata una riduzione del battito degli occhi [50]. Negli studi sul sonno vengono frequentemente usate prove di vigilanza, perché è stato dimostrato che esiste una correlazione tra la privazione di sonno ed aumento degli errori e dei tempi di risposta nei test di vigilanza psicomotoria [51]. Altamente indicativo del livello di sonnolenza è risultato essere altresì il Karolinska Sleepiness Scale (KKS) [52], un questionario nel quale i soggetti danno un'autovalutazione del proprio stato, che spesso viene somministrato negli studi sul sonno da solo o in aggiunta ad altri test.

La luce è il fattore che maggiormente influenza i ritmi circadiani e, tra questi, il ritmo sonno-veglia: da essa dipende il settaggio del ciclo in una durata di circa 24 ore e l'allineamento tra ritmo fisiologico e ritmo naturale giorno-notte; è stato dimostrato come la lunghezza, la fase e l'ampiezza del ciclo possano essere regolate dalla luce e si pensa che questa possa essere utilizzata come cura per i disordini del sonno, in particolare lo "shift work sleep disorder". L'effetto che la luce produce sul ritmo sonno-veglia dipende sia dall'intensità dello stimolo luminoso, sia dalla composizione spettrale dello stesso.

È stato dimostrato che un illuminamento medio di 1000 lux prodotto da lampade fluorescenti sia sufficiente per determinare una riduzione della sonnolenza durante il giorno dopo 1 ora di esposizione, effetto che non si è riscontrato con lampade ad incandescenza a luce debole (< 5 lux) [21]. Il livello di sonnolenza risulta inoltre ridotto con un'esposizione notturna di 6,5 ore ad una luce monocromatica di 640 nm, molto più di quanto avvenga con una luce di 555 nm; la scarsa capacità delle lunghezze d'onda medio-lunghe di inibire il sonno è stato confermato in uno studio condotto con una stimolazione luminosa monocromatica verde (500 nm) [53]. Al contrario, la capacità della luce fredda di ridurre la sonnolenza, è stato dimostrato con un'illuminazione prodotta da sorgenti fluorescenti a 6500 K [37].

Da quanto riportato, risulta evidente come l'illuminazione artificiale possa incidere sul ritmo sonno-veglia, in funzione della quantità di luce fornita, della qualità della luce emessa e dell'ora del giorno in cui viene ricevuta; studi recenti hanno evidenziato come il ritmo sonno-veglia della popolazione moderna sia cambiato a causa delle nuove abitudini permesse dall'illuminazione artificiale, spostandosi di circa due ore rispetto al ritmo indotto dalla naturale alternanza di luce e buio [54]. Attualmente non si ha sufficiente conoscenza di quale sia la qualità e la quantità di luce, né il tempo o la durata dell'esposizione, capaci di produrre effetti distruttivi sul sonno; altresì non è ancora del tutto chiaro come utilizzare la luce al fine di una corretta regolazione del ritmo sonno-veglia, anche ai fini della cura dei disturbi del sonno. Lo studio sul sonno svolto nel presente lavoro sperimentale è finalizzato ad aggiungere un tassello nella conoscenza scientifica (principalmente sul primo di questi due punti).

2 Attività precedenti

L'attività sperimentale svolta all'interno del PAR nel triennio 2013-2015 si è occupata di valutare l'influenza della differente composizione spettrale delle sorgenti artificiali sulle performance cognitive, con particolare riferimento all'attenzione: sono state indagate le funzioni esecutive, sotto il duplice aspetto delle capacità visuo-spaziali e delle capacità inibitorie, e la vigilanza, sia visiva che acustica. In questo ultimo anno l'indagine si è interessata anche del sonno, per valutare l'impatto di diverse esposizioni luminose sul livello

di sonnolenza; l'intento è inoltre collegare il ruolo che la luce ha sulle performance con quello svolto sulla regolazione del sonno, introducendo problematiche connesse con il ciclo circadiano. Gli attuali studi rendono prevedibile che nel prossimo futuro la luce assuma un ruolo importante nella salute degli individui, con potenziali impatti sulla gestione energetica degli impianti di illuminazione.

La sperimentazione è iniziata confrontando inizialmente l'effetto prodotto sull'attenzione da due tipologie di lampade estremamente differenti nella composizione spettrale: le lampade alogene, con bassa percentuale di radiazione nelle lunghezze d'onda corte ed elevata emissione nelle lunghezze d'onda lunghe, e la luce emessa da una sorgente LED neutra, che presenta due picchi di emissione, uno nella regione del blu ed uno nella banda del giallo.

Nel primo lavoro, svolto nel 2013, è stata studiata l'influenza delle due condizioni luminose sulle funzioni esecutive con due test visivi, un compito di rotazioni mentali e un cambio di compito volontario; 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 concerne 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 [55, 56, 57].

Gli effetti positivi riscontrati con l'illuminazione LED sulle funzioni esecutive hanno portato, nel 2014, 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, con le stesse condizioni luminose, lampade alogene e LED neutro, sia compiti di tipo visivo, come già l'anno precedente, sia compiti acustici; lo studio aveva la finalità di capire se l'effetto dello spettro luminoso fosse limitato ad una modalità sensoriale, o se invece l'informazione luminosa, pur mediata dalla funzione visiva, avesse un'influenza generalizzata di attivazione cerebrale, riscontrabile nello svolgimento di compiti attentivi, qualunque fosse l'organo coinvolto nell'esecuzione del compito [58].

I risultati hanno evidenziato un incremento della vigilanza visiva nei soggetti che hanno svolto il compito con lampade LED, confermando l'effetto positivo di questa tipologia di sorgenti sull'attenzione, ma nessun effetto sulla vigilanza acustica. Si è ritenuto che la mancanza di un effetto legato alla diversa illuminazione sulla vigilanza acustica fosse dovuto alla modalità unimodale della prova; per questo motivo, il lavoro svolto durante questo terzo anno ha approfondito lo studio sulla vigilanza con un compito cross-modale, in cui sono presentati stimoli acustici e visivi contemporaneamente.

Nell'attività del 2015 sono state svolte due sperimentazioni, la prima confrontando l'effetto sulla vigilanza delle stesse sorgenti alogene e LED neutro, già utilizzate nei due studi precedenti, la seconda mettendo a confronto due lampade LED, una con CCT calda, l'altra con CCT fredda.

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; in quest'ottica si inserisce lo studio svolto sul sonno, con la finalità di capire se ed in che misura l'illuminazione LED abbia un'influenza su tale funzione fisiologica.

3 Descrizione delle attività

Il presente lavoro prosegue gli studi svolti negli anni precedenti approfondendo l'indagine su come la composizione spettrale della radiazione luminosa influenzi le capacità cognitive umane, focalizzando nuovamente l'attenzione sulla vigilanza; lo studio è stato inoltre esteso all'effetto dell'illuminazione sul sonno, indagando se l'esposizione alle sorgenti LED influenzi la sonnolenza ed il sonno notturno.

L'ipotesi da cui muove questo studio è che l'illuminazione LED, con un'emissione ricca di lunghezze d'onda corte, soprattutto nei casi delle temperature di colore più fredde, eserciti sull'essere umano un effetto di attivazione mentale, che produrrebbe un incremento dell'attenzione in generale, e della vigilanza in particolare. Allo stesso tempo la stessa radiazione blu emessa dal LED dovrebbe indurre un effetto di attivazione a livello fisiologico, riducendo il livello di sonnolenza dei soggetti esposti a tale illuminazione; questo effetto, positivo se interviene al mattino perché utile alla regolazione dei ritmi circadiani, potrebbe potenzialmente risultare dannoso qualora l'esposizione intervenga nelle ore pomeridiane, in quanto potrebbe generare un ritardo dei ritmi fisiologici, causando disturbi del sonno, quali difficoltà ad addormentarsi, minor numero di ore di sonno e risvegli notturni.

Il lavoro si compone di due indagini sperimentali in cui, utilizzando lo stesso protocollo, le stesse funzioni vengono esaminate con differenti scenari luminosi: in un primo esperimento (E1) vengono messi a confronto gli effetti prodotti da un'illuminazione LED neutra (4000 K) con quelli prodotti da lampade alogene (2800 K), mentre in un secondo esperimento (E2) la stessa analisi viene ripetuta confrontando due illuminazioni LED, una con CCT fredda (6800 K) e l'altra calda (3000 K).

3.1 I test svolti

In entrambi gli esperimenti sono stati studiati gli effetti della radiazione luminosa sulla vigilanza e sul sonno, utilizzando i medesimi test sperimentali.

Lo studio sulla vigilanza è stato svolto utilizzando un test cross-modale, nel quale i partecipanti hanno eseguito contemporaneamente un compito di vigilanza visiva ed un compito di vigilanza acustica. Entrambi i compiti sono stati predisposti da uno degli autori con un software, in modo che lo stimolo acustico e visivo venissero presentati nello stesso istante da un computer e che le risposte ed i tempi di reazione fossero registrati dallo stesso.

Gli stimoli visivi consistevano 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, mentre gli stimoli acustici consistevano in due suoni differenti, uno basso a 1000 Hz ed uno acuto ad 2000 Hz, della stessa intensità (60 Db) emessi da due casse poste ai lati del monitor, con una sequenza alternata (Fig. 1).



Figura 1 – Stimoli visivi (sx) e stimoli acustici (dx)

Il compito del soggetto era 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 ovvero verde-verde) o di un suono con lo stesso tono (1000 Hz-1000 Hz ovvero 2000 Hz-2000Hz).

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.

Lo studio sul sonno è stato svolto utilizzando 3 questionari validati a livello internazionale e tradotti in lingua italiana. Il Diario del Sonno consiste in una serie di domande che servono a valutare la quantità e la qualità del sonno del soggetto nella notte precedente (Appendice 1); questo questionario è stato compilato dai partecipanti la mattina del giorno in cui hanno eseguito il test, entro 15 minuti dal risveglio.

Il questionario denominato Karolinska Sleepiness Scale (KKS) [52] è stato utilizzato per valutare il livello di sonnolenza dei soggetti in specifici momenti della giornata: esso viene compilato dai partecipanti indicando quanto si sentono vigili o sonnolenti in una scala che va da 1 (molto vigile) a 9 (molto sonnolento) (Appendice 2). Questo questionario è stato somministrato durante lo svolgimento del test, alla fine del test (svolto durante la mattina), e fatto compilare ai partecipanti nel giorno del test alle ore 15:00, 18:00 e 21:00.

Il questionario denominato Global Vigor Affettive Scale (GVAS) [59] consiste in una serie di domande a cui il soggetto deve rispondere utilizzando una scala bipolare non graduata che ha agli estremi i valori “per niente-moltissimo” (Appendice 3); tale questionario è stato somministrato negli stessi momenti del KSS ed è stato utilizzato per valutare il livello generale di attivazione.

3.2 *L’ambiente sperimentale*

Entrambi gli esperimenti sono stati svolti all’interno del Laboratorio di Illuminotecnica del Dipartimento DIAEE dell’Università Sapienza, dove è stata allestita una cabina sperimentale per lo studio delle sorgenti luminose artificiali. La cabina, di dimensioni 3,6x2,4 m e altezza 3 metri, non è dotata di finestre per escludere l’ingresso di luce naturale ed ha i muri interni rivestiti di cartoncino nero opaco per limitare l’effetto della riflessione luminosa; al suo interno è attrezzata con una postazione di lavoro composta di un tavolo (1,2 x 0,7 m), una sedia, un computer completo di monitor LCD, mouse, tastiera e casse audio. Le lampade sono posizionate sul soffitto della cabina, sostituendo appositi pannelli di cartongesso delle dimensioni 60x60 cm con apparecchi delle stesse dimensioni nel caso dei LED, o facendo pendere al lato del pannello le lampade nel caso delle sorgenti alogene.

Le due condizioni luminose sperimentate nell’esperimento E1 consistevano in un’illuminazione neutra fornita da un apparecchio LED avente un flusso luminoso di 4500 lm ed una CCT di 4000 K, ed un’illuminazione calda realizzata con 6 lampade alogene poste in corrispondenza del perimetro del LED, aventi ciascuna un flusso luminoso di 850 lm ed una temperatura di colore di 2800 K.

Nell’esperimento E2 sono stati confrontati due scenari luminosi prodotti ciascuno con un apparecchio LED, aventi temperatura di colore 3000K e potenza 50 W nel caso della condizione calda, e 6800 K e potenza 40 W nel caso della condizione fredda.

Per valutare esattamente i quattro scenari luminosi sono state compiute misurazioni di tipo radiometrico e fotometrico. La composizione spettrale delle sorgenti è stata misurata con uno spettroradiometro JETI Specbos 1211UV per acquisire la differente concentrazione di emissione luminosa, specialmente nelle lunghezze d’onda blu, nelle quattro condizioni luminose sperimentate; le curve di emissione delle due sorgenti utilizzate nell’esperimento E1 e nell’esperimento E2 sono riportate rispettivamente nei grafici di figura 2 e figura 3.

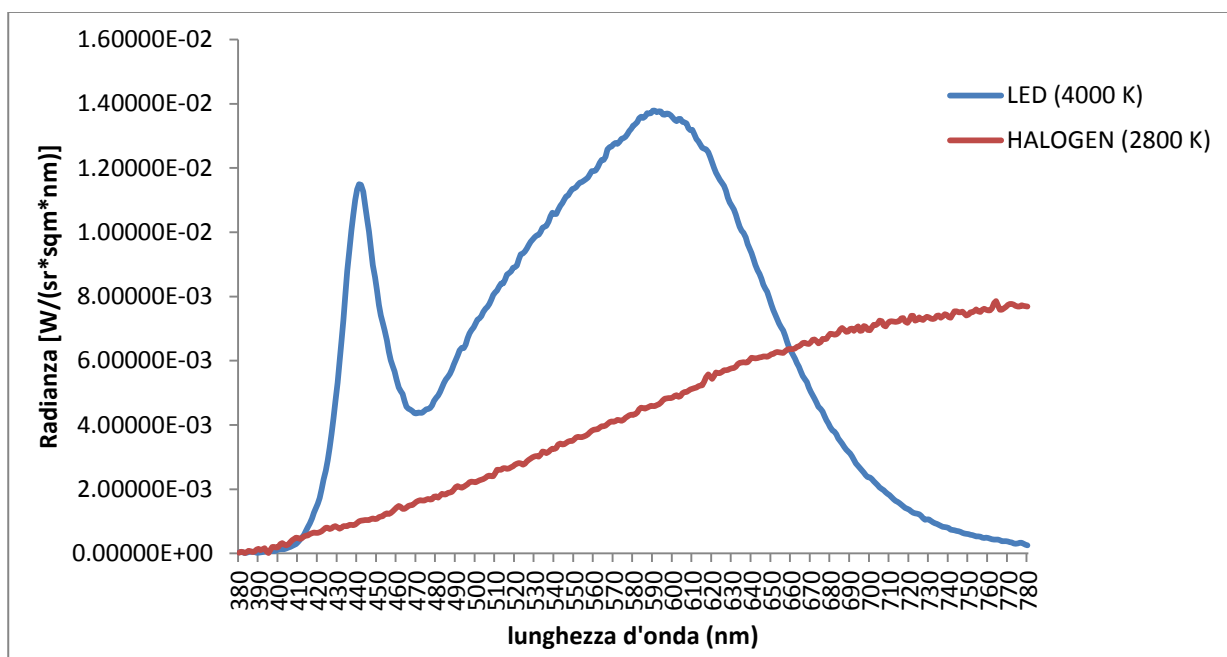


Figura 2 – E1: emissione spettrale delle sorgenti utilizzate nella condizione luminosa calda (alogeno 2800 K) e neutra (LED 4000 K)

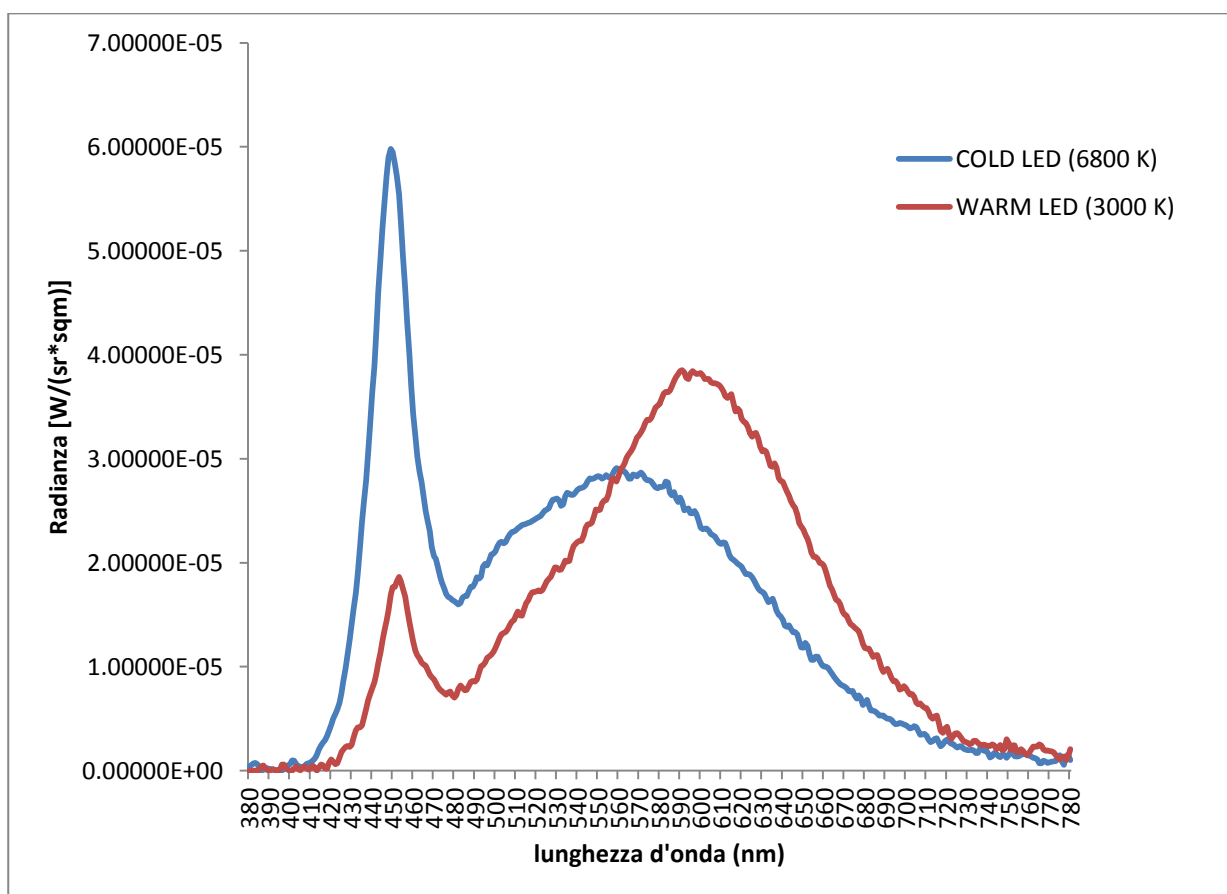


Figura 3 – E2: emissione spettrale delle sorgenti utilizzate nella condizione luminosa calda (LED 3000 K) e fredda (LED 6800 K)

L'illuminamento (E) sul piano di lavoro è stato misurato con un luxmetro DeltaOHM HD2302.0 usando una griglia di punti distanti 20 cm: i valori per ciascuno scenario luminoso sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Illuminamento sul piano di lavoro

	ESPERIMENTO 1		ESPERIMENTO 2	
sorgenti	LED 4000 K	ALOGENE 2800 K	LED 6800 K	LED 3000 K
E min (lux)	119	102	413	408
E med (lux)	139	144	441	446
E max (lux)	156	174	505	528

L'informazione luminosa ricevuta dall'occhio dei partecipanti è stata controllata misurando l'illuminamento (E) e la luminanza (L) con uno spettroradiometro JETI Specbos 1211UV posizionato in corrispondenza della sedia ad un'altezza di 1,2 m da terra e direzionato verso il monitor; in Tabella 2 sono riportati i valori misurati in ciascuna condizione luminosa.

Tabella 2 – Illuminamento e luminanza all'occhio

	ESPERIMENTO 1		ESPERIMENTO 2	
sorgenti	LED 4000 K	ALOGENE 2800 K	LED 6800 K	LED 3000 K
E (lux)	90	100	289	288
L (cd/m ²)	2,5	3,4	1,8	1,9

3.3 Il protocollo sperimentale

I due esperimenti sono stati svolti seguendo la stessa procedura, con l'unica differenza negli scenari luminosi utilizzati.

Quaranta volontari, in egual numero maschi e femmine, con età media compresa tra i 18 ed i 35 anni hanno preso parte a ciascun esperimento, per un totale di 80 partecipanti; i soggetti sono stati selezionati all'interno del corpo studenti delle facoltà di Architettura ed Ingegneria dell'Università Sapienza. Ciascuno di loro ha dichiarato di non aver sperimentato cambiamenti di fuso orario negli ultimi tre mesi, di non aver fumato o assunto caffè nelle due ore precedenti l'esecuzione del test e di non essere consumatore abituale di alcool o droghe; i soggetti hanno inoltre compilato un questionario di anamnesi, per poter escludere disturbi psichiatrici, eventi lesivi di natura cerebrale ed assunzione di psicofarmaci.

La mattina del test entro 15 minuti dal risveglio i soggetti hanno compilato il diario del sonno, nel quale hanno indicato l'ora in cui si sono coricati, l'ora in cui si sono svegliati, il numero di ore di sonno, il numero di risvegli notturni e la loro durata: solamente i soggetti con una durata del sonno superiore alle 6,5 ore hanno partecipato all'esperimento.

Una volta arrivato al laboratorio di illuminotecnica, ciascun partecipante è stato fatto accomodare all'interno della cabina sperimentale ed ha trascorso 10 minuti di adattamento, trascorsi i quali l'operatore ha spiegato la procedura sperimentale, senza però fornire alcuna indicazione sullo scopo della sperimentazione. L'intero esperimento è durato circa 1 ora e 30 minuti, durante i quali ai partecipanti non è stato consentito uscire dalla cabina, né alzarsi dalla sedia.

I soggetti hanno compiuto una sessione base (SB) nella quale hanno eseguito il compito di vigilanza cross-modale al computer della durata di circa 15 minuti, seguita da una pausa di 20 minuti durante la quale hanno compilato i questionari cartacei KSS e GVAS, e da una sessione cognitiva (SC) sempre di 15 minuti nella quale i soggetti hanno ripetuto il compito di vigilanza cross-modale al computer; al termine della SC sono stati nuovamente compilati i questionari cartacei KSS e GVAS. Ai soggetti è stato inoltre chiesto di compilare nuovamente questi due questionari cartacei altre tre volte ad orari fissi durante la giornata del test (alle 15:00, alle 18:00 e alle 21:00).

Prima dell'inizio dell'esperimento ciascun soggetto è stato assegnato in modo casuale al gruppo sperimentale (GS) o al gruppo di controllo (GC), che differiscono unicamente per le condizioni luminose con cui viene eseguito il test. Il gruppo di controllo ha eseguito tutte le fasi della sperimentazione con luce calda (E1: alogena; E2: LED 3000 K), mentre il gruppo sperimentale ha svolto solamente la sessione base con luce calda: dall'inizio della pausa e per tutta la sessione test il GS ha svolto i compiti rispettivamente, con la luce neutra nell'E1 (LED 400K), e con luce fredda nell'E2 (LED 6800 K).

Il protocollo sperimentale, con le fasi ed i relativi scenari luminosi utilizzati, sia nell'esperimento E1, sia nell'esperimento E2, sono esemplificati nella Tabella 3.

Tabella 3 – Protocollo sperimentale

		SESSIONE BASE	PAUSA	SESSIONE COGNITIVA	FINE
compiti		Vigilanza cross-modale	KSS GVAS	Vigilanza cross-modale	KSS GVAS
E1	GS	alogene	LED 4000K	LED 4000K	LED 4000K
	GC	alogene	alogene	alogene	alogene
E2	GS	LED 3000 K	LED 6800K	LED 6800K	LED 6800K
	GC	LED 3000 K	LED 3000 K	LED 3000 K	LED 3000 K

4 Risultati

4.1 La vigilanza

I risultati dei test cognitivi sono stati ottenuti dal calcolo dei tempi di reazione medi nelle prove di vigilanza, considerando separatamente le risposte agli stimoli visivi da quelle relative agli stimoli acustici; i risultati ottenuti nei primi 6 minuti sono stati confrontati con quelli degli ultimi 6 minuti in un'analisi ANCOVA Gruppo (GC vs. GS) x Tempo (6 minuti iniziali vs. 6 minuti finali), utilizzando i tempi di risposta della SB come covariata.

Nell'esperimento E1, due partecipanti del GC e due del GS sono stati esclusi dall'analisi, in quanto i rispettivi tempi di reazione agli stimoli sono risultati due deviazioni standard più lenti rispetto alla media.

L'analisi preliminare effettuata con il test M di Box non ha mostrato una violazione dell'assunzione di uguaglianza delle matrici di covarianza, né per gli stimoli visivi ($M=10,62$; Chi-quadrato(6)=9,61; $p=0,14$), né per gli stimoli acustici ($M=9,43$; Chi-quadrato(6)=8,53; $p=0,2$).

Nel caso degli stimoli visivi, i valori medi dei tempi di reazione della sessione cognitiva sono risultati aumentati negli ultimi 6 minuti rispetto ai 6 minuti iniziali per il gruppo di controllo, mentre sono diminuiti per il gruppo sperimentale (Tabella 4); ciò sembrerebbe indicare che i soggetti che hanno eseguito il test

con illuminazione LED hanno manifestato un leggero incremento di vigilanza, al contrario dei soggetti che eseguono il test con luce alogena, i quali hanno mostrato un tradizionale decremento di vigilanza col passare del tempo.

Tabella 4 – E1: tempi medi di reazione (millisecondi) agli stimoli visivi (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	489,13 ms (8,73)	597,13 ms (8,72)
Gruppo Sperimentale	476,23 ms (8,73)	465,54 ms (8,72)

I risultati dell'analisi statistica ANCOVA hanno mostrato l'esistenza di un effetto significativo di Gruppo ($F_{1,33}=3,69$; $p=0,06$), confermando l'esistenza di una differenza tra il GS ed il GC nella sessione cognitiva; tuttavia non è stato trovato nessun effetto di Tempo ($F_{1,33}=1,49$; $p=0,23$), o di interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,33}=1,67$; $p=0,21$). La differenza tra i tempi medi di reazione del gruppo sperimentale nella sessione cognitiva rispetto alla sessione base non è statisticamente rilevante e questo indica che la differenza di vigilanza nel GS tra la prova eseguita con sorgenti alogene e quella eseguita con LED neutro non è significativa.

Anche nel caso degli stimoli acustici, il confronto dei tempi medi di reazione dei primi minuti rispetto agli ultimi minuti nella sessione cognitiva ha mostrato una maggiore velocità del GS e una minore velocità del GC col passare del tempo (Tabella 5).

Tabella 5 – E1: tempi medi di reazione (millisecondi) agli stimoli acustici (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	437,50 ms (7,79)	448,65 ms (7,70)
Gruppo Sperimentale	409,85 ms (7,79)	403,71 ms (7,70)

In questo caso la differenza tra i tempi medi di reazione nei due gruppi non è risultata significativa, in quanto l'analisi statistica ANCOVA non ha mostrato alcun effetto di Gruppo ($F_{1,33}=2,92$; $p=0,10$), né di Tempo ($F_{1,33}<1$), né un'interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,33}=1,50$; $p=0,23$). I risultati indicano perciò, che la sorgente LED neutra non ha influenzato la vigilanza acustica in modo differente rispetto alle sorgenti alogene.

Nell'esperimento E2, un partecipante del gruppo di controllo è stato escluso dall'analisi perché i suoi tempi di reazione sono risultati 2 deviazioni standard più lenti rispetto alla media del gruppo; il test M di Box non ha mostrato una violazione dell'assunzione di uguaglianza delle matrici di covarianza, né per gli stimoli visivi ($M=4,83$; Chi-quadrato(6)= 4,41; $p=0,62$), né per gli stimoli acustici ($M=5,25$; Chi-quadrato(6)=4,79; $p=0,57$). I risultati della vigilanza visiva hanno mostrato che i partecipanti del gruppo di controllo hanno eseguito la prova nella sessione cognitiva più lentamente negli ultimi 6 minuti rispetto ai 6 minuti iniziali, a differenza del gruppo sperimentale in cui la velocità nei tempi di reazione è rimasta pressoché costante (Tabella 6).

Tabella 6 – E2: tempi medi di reazione (millisecondi) agli stimoli visivi (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	470,20 ms (7,85)	494,76 ms (8,98)
Gruppo Sperimentale	491,14 ms (7,85)	491,44 ms (8,98)

L'analisi statistica ANCOVA non ha evidenziato l'esistenza di effetti significativi di Gruppo ($F_{1,36}<1$) o di Tempo ($F_{1,36}<1$); è risultato invece significativo l'effetto di interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,36}=5,38$; $p=0,03$). I risultati del test Newman-Keuls hanno mostrato come la differenza tra i tempi di reazione del GS nella sessione cognitiva sia significativa rispetto ai tempi di reazione del GC nella stessa sessione e rispetto ai tempi di reazione avuti dallo stesso GS nella sessione base.

L'illuminazione sembrerebbe pertanto avere esercitato un effetto sulla vigilanza visiva: in particolare, durante lo svolgimento del compito con il LED freddo, la vigilanza non ha subito il normale decremento con il passare del tempo, come invece è avvenuto quando lo stesso compito è stato svolto con il LED caldo.

I risultati riferiti agli stimoli acustici hanno mostrato che i partecipanti di entrambi i gruppi nella sessione sperimentale hanno risposto agli stimoli con tempi di reazione più lunghi nei minuti finali rispetto ai minuti iniziali della prova, come mostrato in Tabella 7; l'analisi ANCOVA indica che non risulta significativo alcun effetto principale, di Gruppo o Tempo, né di interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,36}<1$ in tutti i casi).

Tabella 7 – E2: tempi medi di reazione (millisecondi) agli stimoli acustici (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	426,22 ms (6,95)	438,87 ms (8,99)
Gruppo Sperimentale	437,08 ms (6,95)	451,92 ms (8,99)

La vigilanza acustica non sembrerebbe essere stata influenzata dall'illuminazione LED, in quanto tale funzione ha mostrato il naturale decremento con il passare del tempo di esecuzione del compito, sia quando questo è stato svolto con un LED caldo, sia quando è stato svolto con un LED freddo.

4.2 Il sonno

Come anticipato nella sezione 3.3, ciascun partecipante ai due esperimenti ha compilato le scale di valutazione della sonnolenza (KSS), di vigore fisico e di umore (GVAS) in tempi prestabiliti (Prove): immediatamente prima (pre) e dopo la sessione cognitiva (post1), e poi in corrispondenza di orari fissi (15.00-post2, 18.00-post3, 21.00-post4). Nessuno dei partecipanti ai due esperimenti è stato escluso dall'analisi dei dati, in quanto, dai dati contenuti nel Diario del Sonno, tutti hanno avuto un sonno adeguato la notte precedente al test.

L'analisi dei risultati è stata effettuata calcolando, per ciascuna Prova, i valori medi delle scale di autovalutazione della sonnolenza (KSS), di vigore fisico (VIGOR) e di umore positivo (AFFECT), separatamente per il GC e per il GS; successivamente tali valori sono stati sottoposti ad Analisi della Varianza (ANOVA) Gruppo (GC vs. GS) x Prova (pre, post1, post2, post3, post4).

Per quanto riguarda l'esperimento E1, nessun effetto significativo è emerso tra i due gruppi nella scala di sonnolenza KSS (figura 4), nella scala di vigore (figura 5), né nella scala di umore (figura 6), in funzione dell'orario di compilazione.

Il livello di sonnolenza dei due gruppi risulta essere uguale, sia prima che dopo la prova cognitiva, subendo un incremento di pari livello: ciò sembra indicare che le due tipologie di sorgenti utilizzate nella Sessione Cognitiva per il GS (LED 4000K) e per il GC (alogene), non esercitano un effetto immediato sulla sonnolenza. Dai risultati emergerebbe inoltre l'assenza di un effetto a lungo termine, poiché entrambi i gruppi riportano lo stesso livello di sonnolenza alle ore 21:00 (post4); gli effetti di medio termine non sembrano indicativi per nessuno dei due gruppi, in quanto i livelli di sonnolenza medi nelle prove post2 e post3 determinano un andamento spezzato delle due curve, con nessuna significatività statistica.

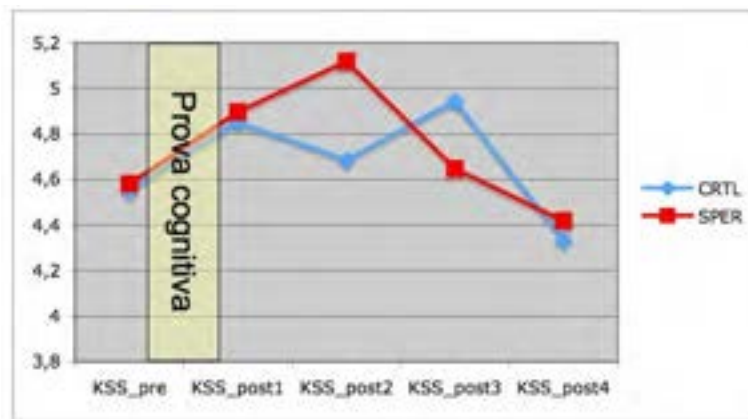


Figura 4 – E1: livelli medi di sonnolenza nel gruppo di controllo (CRTL) e nel gruppo sperimentale (SPER)

I risultati del vigore fisico mostrano una mancanza di effetti dovuti all'illuminazione su questa funzione fisica, sia di breve che di medio e di lungo termine; il grafico in Figura 5 mostra chiaramente un lieve decremento del vigore durante il giorno, della stessa entità per entrambi i gruppi, senza differenze apprezzabili nell'andamento delle due curve rappresentative.

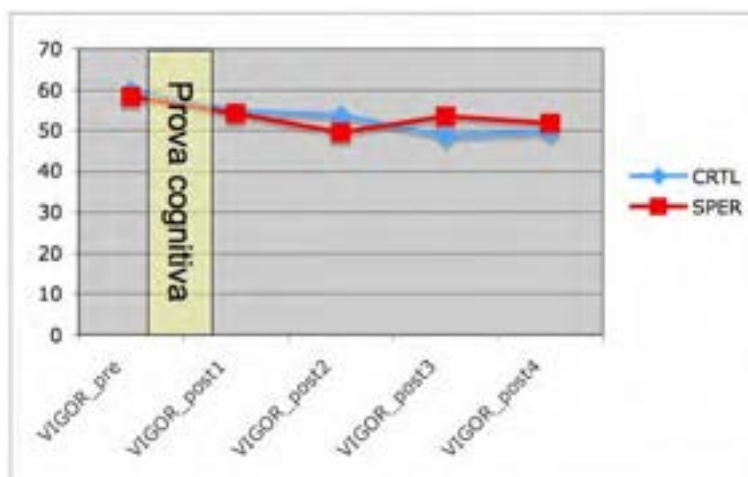


Figura 5 – E1: livelli medi di vigore fisico nel gruppo di controllo (CRTL) e nel gruppo sperimentale (SPER)

L'illuminazione non sembra avere un effetto di breve termine neanche sull'umore: l'andamento parallelo delle curve nel grafico di Figura 6 mostra come i livelli soggettivi medi di tale funzione decrescano della stessa entità dalla prova pre alla prova post1; la piccola differenza di andamento nelle due prove successive non indica una variazione di umore degna di rilievo nel medio periodo. Le due curve mostrano invece un divario sensibile nei valori medi della prova post4, che sembrano indicare un effetto di lungo termine: l'analisi statistica ha dimostrato però di essere non significativo.

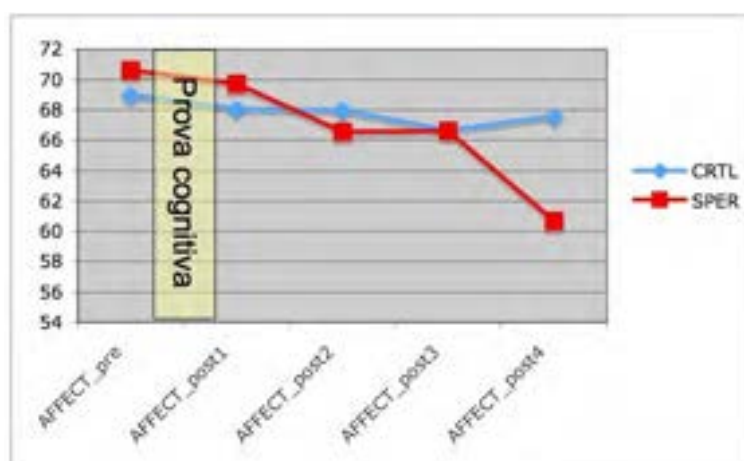


Figura 6 – E1: livelli medi di umore nel gruppo di controllo (CTRL) e nel gruppo sperimentale (SPER)

Alla luce dei risultati ottenuti nell'E1, si può concludere che nessuna delle due illuminazioni, LED neutra o alogena, sembrano influenzare la sonnolenza, il vigore o l'umore; l'analisi dei dati non ha mostrato differenze nelle valutazioni soggettive di queste tre funzioni, né durante l'esposizione luminosa (pre e post1), né negli orari successivi (post2, post3, post4).

Per quanto riguarda l'esperimento E2, i risultati indicano un effetto positivo dell'illuminazione LED fredda, rispetto all'illuminazione LED calda, sul livello di sonnolenza, ma non sul vigore o sull'umore.

Il gruppo di controllo, che esegue l'intera sperimentazione con il LED caldo, riporta infatti un incremento della sonnolenza soggettiva durante la prova cognitiva, non riscontrato nel gruppo sperimentale, che esegue la sessione cognitiva con il LED freddo, e riporta invece una riduzione significativa della funzione (Figura 7). L'analisi statistica ha mostrato una tendenza alla significatività per quanto riguarda la scala di valutazione della sonnolenza (KSS) relativamente all'interazione Gruppo x Prova ($F=3,62$; $p=0,06$), che sembra indicare una riduzione della sonnolenza nel gruppo sperimentale rispetto a quello di controllo immediatamente dopo la prova cognitiva.

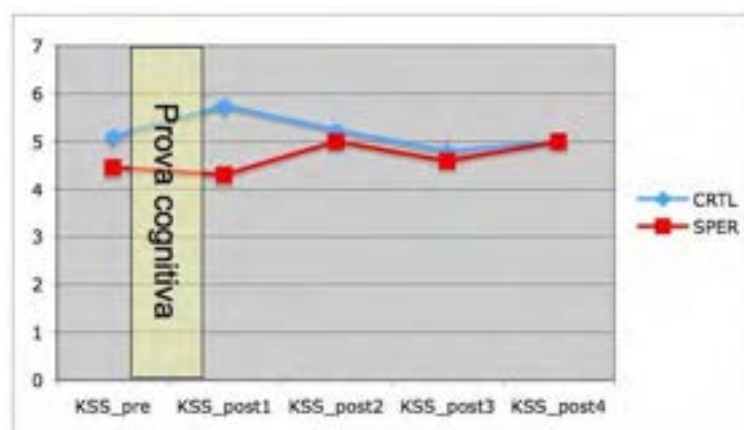


Figura 7 – E2: livelli medi di sonnolenza nel gruppo di controllo (CTRL) e nel gruppo sperimentale (SPER)

I confronti post-hoc, effettuati con il test di Scheffè indicano che tale tendenza alla significatività è limitata alla prova post1, mentre nelle ore successive questa tendenza alla differenza scompare del tutto; se ne deve dedurre un effetto positivo della sorgente fredda di breve durata, limitato al tempo dell'esposizione stessa, forse perdurante per un breve tempo successivo.

Il grafico in figura 7 mostra chiaramente che, dopo una differenza iniziale corrispondente alle prove pre e post1, già dalla prova post2, le curve rappresentanti il livello soggettivo di sonnolenza abbiano un andamento pressoché uguale; il livello di sonnolenza tende a diminuire nel pomeriggio, per poi aumentare

secondo l'andamento naturale durante la sera allo stesso modo in entrambi i gruppi, indicando un'assenza di effetto dell'illuminazione LED (calda e fredda) sul sonno nel lungo periodo.

Nessun effetto significativo è emerso invece dall'analisi statistica tra i due gruppi, in funzione dell'orario di compilazione, per ciò che concerne la scala di vigore (figura 8) e la scala di umore (figura 9).

La figura 8, dove sono riportati i livelli soggettivi di vigore fisico, mostra come non vi siano differenze apprezzabili nei due gruppi tra i valori medi precedenti la prova cognitiva (pre), quelli immediatamente successivi (post1) e quelli relativi alle ore pomeridiane (post2 e post3). Le due curve mostrano invece una differenza nella prova post4 tra il GS ed il GC, che sembra indicare una riduzione del livello di vigore nei partecipanti del gruppo sperimentale ed un incremento nei soggetti del gruppo di controllo, ma dall'analisi statistica è risultato che tale effetto non sia significativo.

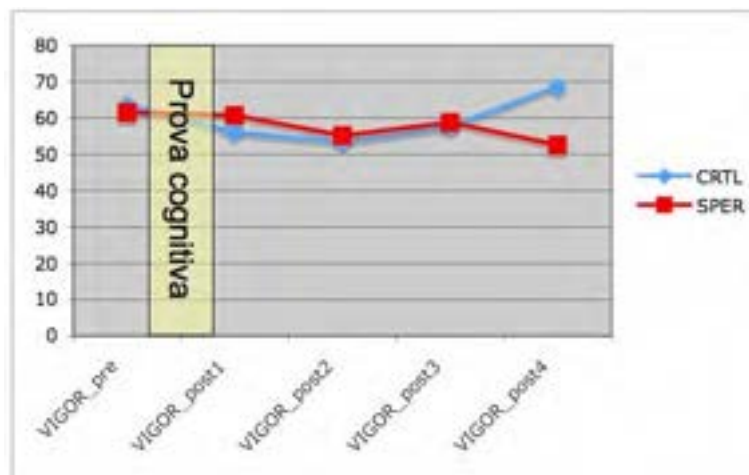


Figura 8 – E2: livelli medi di vigore fisico nel gruppo di controllo (CTRL) e nel gruppo sperimentale (SPER)

Dai risultati ottenuti si può dedurre che l'esposizione all'illuminazione LED non sembra produrre un effetto immediato sul vigore fisico, né sembrerebbe influenzarlo nel medio e nel lungo periodo.

I valori medi dell'umore soggettivo del gruppo sperimentale e del gruppo di controllo determinano due curve con andamento differente. Nel GC non si verificano variazioni di umore tra la prova precedente ed immediatamente successiva la sessione cognitiva; si osserva poi una lieve flessione del livello di umore (post2), seguita da un innalzamento dello stesso nelle prove successive (post3 e post4). Nel gruppo sperimentale si nota una lieve diminuzione di umore tra la prova precedente (pre) e la prova seguente (post1) la sessione cognitiva, seguita da un innalzamento dei livelli di umore nelle prove post2 e post3 e da una nuova diminuzione nella prova post4.

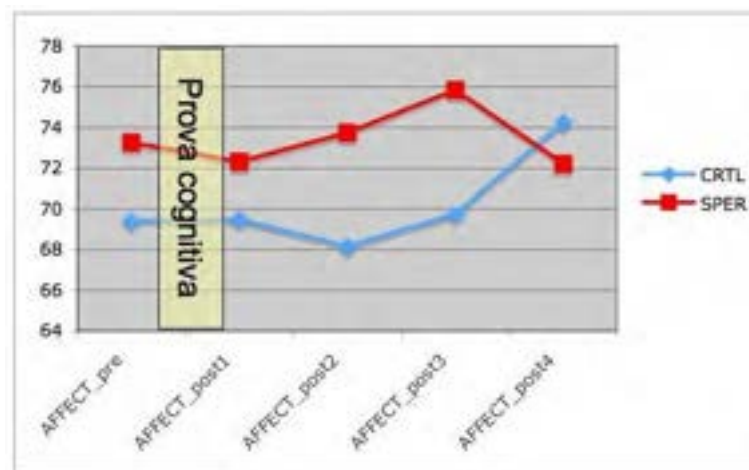


Figura 9 – E2: livelli medi di umore nel gruppo di controllo (CTRL) e nel gruppo sperimentale (SPER)

I grafici sembrerebbero indicare un miglioramento dell'umore che interviene nel medio periodo successivo all'esposizione con illuminazione LED fredda; l'analisi statistica indica tuttavia, che non esistono differenze significative tra i livelli di umore nelle singole prove tra i due gruppi.

5 Discussione

La sperimentazione svolta era tesa ad indagare se le sorgenti LED abbiano la capacità di influenzare la vigilanza ed il sonno, e se l'effetto sia legato alla Temperatura Correlata di Colore, o più precisamente, alla loro composizione spettrale. Lo studio è stato svolto con due esperimenti successivi, in ciascuno dei quali sono stati confrontati due scenari luminosi: l'E1, sulla scorta delle sperimentazioni precedenti, è stato effettuato utilizzando un LED neutro (4000 K) per la condizione sperimentale e le sorgenti alogene come condizione di controllo (2800 K), al fine di comprendere se si verificasse un effetto a livello cognitivo legato alla tipologia luminosa; mentre nell'E2 sono state messe a confronto due illuminazioni LED, fredda nella condizione sperimentale (6800 K) e calda nella condizione di controllo (3000 K), per capire se l'effetto prodotto dalla luce fosse legato alla CCT.

L'influenza dell'illuminazione sembra essere differente a seconda dalla funzione considerata e per questo motivo verranno trattati separatamente gli effetti sulla vigilanza visiva, sulla vigilanza acustica e sul sonno.

I risultati ottenuti indicano che l'illuminazione LED, esercita un'influenza sulla vigilanza visiva. Già nell'E1, i partecipanti che hanno eseguito il test con illuminazione LED, hanno ottenuto tempi di reazione più veloci nella parte finale del compito, a differenza dei soggetti appartenenti al gruppo di controllo, che hanno svolto il test con illuminazione alogena e hanno riportato un naturale incremento dei tempi di reazione nei minuti finali del compito. Sebbene, in questo caso, l'effetto non sia risultato significativo rispetto alla prestazione compiuta dallo stesso gruppo sperimentale nella sessione base, la riduzione dei tempi di reazione nella parte finale del compito nella sessione cognitiva, costituisce un segnale da tenere in considerazione.

L'effetto di migliorare le prestazioni di vigilanza visiva sembra legato alla CCT del LED: come riportato da molti studi internazionali, l'effetto positivo sulle prestazioni si verifica con le sorgenti fredde e non con le sorgenti calde. Concordemente con ciò, nell'E2 è stato osservato un naturale decremento della vigilanza visiva nei soggetti che hanno svolto il test con illuminazione LED calda (3000 K), che invece non è stato riscontrato nei soggetti del gruppo sperimentale (LED 6800 K).

Nessun effetto dell'illuminazione è invece emerso in riferimento alla vigilanza acustica. Nell'E1 è stato osservato solamente una riduzione dei tempi di reazione nella parte finale della prova da parte dei soggetti del gruppo sperimentale, ma tale effetto è stato dimostrato non significativo; mentre nell'E2 si è verificato un incremento dei tempi di reazione con entrambe le condizioni luminose sperimentate. Il risultato ottenuto sulla vigilanza acustica è concorde con i risultati della sperimentazione svolta sulla vigilanza lo scorso anno; nonostante negli esperimenti svolti nel corso di questo anno sia stato utilizzato un paradigma differente rispetto alla sperimentazione precedente, non è stato rilevato un effetto positivo sulla vigilanza acustica dovuto all'illuminazione LED, né calda, né fredda.

Dai risultati ottenuti dai test di valutazione soggettiva della sonnolenza, l'illuminazione LED sembrerebbe avere un effetto limitato su tale funzione, senza avere la capacità di influenzare il sonno notturno. I risultati dell'E1 indicano che né la sorgente LED neutra, né le sorgenti alogene producano un effetto significativo sul livello di sonnolenza: durante l'esposizione luminosa è stato osservato lo stesso aumento della sonnolenza nei soggetti di entrambi i gruppi e lo stesso livello di sonnolenza è stato registrato nell'ultima prova svolta alle ore 21, poco prima di andare a dormire. L'assenza di un'influenza dell'illuminazione sul sonno è confermata dai risultati del test GVAS, sia per quanto attiene il livello di vigore fisico, che per quanto riguarda l'umore: in entrambi i casi non è stata riscontrata alcuna differenza significativa tra i valori medi indicati dal gruppo sperimentale rispetto a quelli del gruppo di controllo.

Solamente nell'esperimento E2 è stato osservato un effetto dell'illuminazione LED fredda sulla sonnolenza, ma limitatamente al tempo di esposizione luminosa, o per il breve periodo seguente: nella prova post1 i soggetti del gruppo sperimentale, esposti da circa 40 minuti alla sorgente fredda, hanno riportato una

riduzione della sonnolenza rispetto alla prova precedente, svolta dopo una esposizione alla sorgente LED calda; al contrario, i soggetti del GC hanno riportato un aumento della sonnolenza nello stesso periodo, dopo un'esposizione continua ad illuminazione alogena. Bisogna sottolineare, però, che tale effetto risulta essere di breve periodo, in quanto nessuna differenza significativa è stata osservata tra i due gruppi nelle prove successive post2, post3 e post4 svolte nel pomeriggio e la sera; questi risultati non danno motivo di supporre che l'illuminazione LED abbia influenzato il sonno notturno dei partecipanti, benché tale dato non sia stato accertato.

6 Conclusioni

Analizzando complessivamente i risultati ottenuti nella sperimentazione svolta nell'ambito dell'accordo PAR nel corso dei tre anni, emerge l'esistenza di un effetto positivo dell'illuminazione LED sulle funzioni cognitive, in particolare sull'attenzione.

La ricerca del 2013, nella quale sono state studiate due funzioni esecutive, le rotazioni mentali e le funzioni inibitorie, con due condizioni luminose, lampade alogene e LED neutro, ha dimostrato la capacità dell'illuminazione LED di influenzare positivamente le due funzioni. I soggetti che hanno eseguito il compito di rotazioni mentali con il LED neutro, hanno svolto il compito in modo più accurato e con tempi di risposta più rapidi, rispetto ai soggetti che hanno svolto lo stesso compito con le lampade alogene; allo stesso modo, con l'illuminazione LED è risultato ridotto il meccanismo di inibizione mentale, comunemente usato quando viene elaborata dal cervello una sequenza di azioni: i risultati dei test svolti hanno indicato che con l'illuminazione LED neutra il cervello è in grado di tenere attive contemporaneamente più di una rappresentazione mentale e di eseguire più processi simultaneamente senza costi temporali.

Le tre sperimentazioni condotte sulla vigilanza, nelle quali sono state studiate complessivamente quattro condizioni luminose, alogene vs. LED 4000 K e LED 3000 vs. K LED 6800 K, hanno dimostrato l'effetto positivo dell'illuminazione LED neutra e fredda sulla vigilanza visiva; è stato infatti osservato che, nelle due condizioni luminose sperimentali (LED 4000 K e LED 6800 K), i soggetti non hanno subito il decremento di vigilanza che normalmente si verifica con il passare del tempo durante lo svolgimento del compito, ma hanno registrato tempi di risposta costanti (E2) o addirittura inferiori (studio del 2014 ed E1 anche se non significativo). Tali prestazioni non sono state osservate, invece, nelle due condizioni luminose di controllo (lampade alogene e LED 3000 K), con le quali i partecipanti agli studi hanno eseguito la parte terminale del compito con tempi di risposta più lenti rispetto alla parte iniziale.

L'effetto dell'illuminazione sulle funzioni cognitive sembrerebbe legato alla composizione spettrale della sorgente, e, nello specifico, dovrebbe essere dovuto alla percentuale di radiazione blu contenuta nella luce emessa e all'intensità con cui vengono emesse tali lunghezze d'onda. Nessun effetto legato all'illuminazione è stato riscontrato sulle funzioni esecutive e sulla vigilanza visiva nei soggetti che hanno svolto il compito con lampade alogene e con il LED caldo, mentre un effetto positivo sui tempi di reazione è stato osservato con LED neutro e con LED freddo. La motivazione dei risultati ottenuti è presumibilmente legata allo spettro di emissione luminosa delle sorgenti utilizzate nella sperimentazione. Le lampade alogene hanno uno spettro continuo e crescente, con emissione minima nella banda del blu, consistente nella regione del rosso e massima nell'infrarosso (figura 2); queste lampade emettono una luce bianca con TCC calda (2800 K). Lo spettro di emissione dei LED è caratterizzato da due picchi, uno nella banda del blu e l'altro nella banda del giallo; la TCC di queste sorgenti è legata alla percentuale relativa di emissione nei due picchi: il LED a 3000 K presenta una modesta quantità di radiazione blu ed un'elevata percentuale nel giallo (figura 3) ed ha dunque una TCC calda, mentre il LED a 6800 K ha una TCC fredda in quanto il picco nelle lunghezze d'onda corte è molto pronunciato ed il picco nelle lunghezze d'onda medio-lunghe è ridotto (figura 3); il LED a 4000 K emette una luce bianca neutra perché ha una composizione spettrale percentualmente bilanciata di blu e di giallo.

Se l'effetto non-visivo della luce è prodotto dalla luce blu, ossia dalla luce con lunghezze d'onda corta, come sembra dai molti studi svolti a livello internazionale, solamente le sorgenti che emettono luce bianca con elevata TCC sono in grado di stimolare le funzioni cognitive. Ciò spiegherebbe perché negli studi svolti sono

stati trovati effetti positivi sulle prestazioni cognitive nei test svolti con illuminazione LED neutra e fredda, mentre nessun effetto è stato osservato né con l'illuminazione alogena, né con l'illuminazione LED a 3000 K, aventi entrambe una TCC calda.

Negli studi condotti questo anno, l'influenza dell'illuminazione LED sulla sonnolenza risulta prodotta esclusivamente con TCC fredde, essendo stata riscontrata come effetto del LED a 6800 K, ma non con il LED neutro a 4000 K. Dai risultati ottenuti l'influenza sembrerebbe inoltre limitata alla durata dell'esposizione e non perdurare nel lungo periodo, così da non avere effetti sul sonno notturno quando l'esposizione avviene durante il giorno. Tuttavia, tali conclusioni sono limitate ad un'esposizione di breve durata, come quella di 40 minuti sperimentata in questo studio; nel caso di un'esposizione prolungata di diverse ore, non si può escludere che l'effetto dell'illuminazione sulla sonnolenza perduri nel medio e nel lungo periodo, influenzando anche il sonno, o che un effetto si verifichi anche con illuminazione LED avente CCT neutra.

Alla luce dei risultati ottenuti in questi tre anni di studi è importante sottolineare la necessità di una corretta gestione dell'illuminazione, sia nell'uso della sorgente luminosa, sia relativamente agli orari di utilizzo, al fine di considerare accanto al comfort visivo e all'efficienza energetica, anche gli effetti prodotti sulla salute.

7 Riferimenti bibliografici

1. C. A. Czeisler, G. S. Richardson, J. C. Zimmermann, M. C. Moore-Ede, E. D. Weitzmann, "Entertainment of human circadian rhythms by light-dark cycles: a reassessment", *Photochemistry and Photobiology*, 34 (1981), pp. 239-247.
2. I. Provencio, I. R. Rodriguez, G. Jiang, W. P. Hayes, E. F. Moreira, M. D. Rollag, "A novel human opsin in the inner retina", *The Journal of Neuroscience* 20 (2000), pp. 600-605.
3. D. M. Berson, F. A. Dunn, T. Motoharu, "Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock", *Science* 295 (2002), pp. 1070-1073.
4. R. Y. Moore, J. C. Speh, J. P. Card, "The retinohypothalamic tract originates from a distinct subset of retinal ganglion cells", *Journal of Comparative Neurology* 352 (1995), pp. 351-366.
5. T. L. Shanahan, C. A. Czeisler, "Physiological Effects of Light on the Human Circadian Peacemaker", *Seminars in Perinatology* 24 (2000), pp. 299-320.
6. A. J. Lewy, T. A. Wehr, F. K. Goodwin, D. A. Newsome, S. P. Markey, "Light Suppresses Melatonin Secretion in Humans", *Science* 210 (1980), pp. 1267-1269.
7. F. A. J. L. Scheer, R. M. Buijs, "Light affects morning salivary cortisol in humans", *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 84 (1999), pp. 3395-3398.
8. D-J. Dijk, C. Cajochen, A. A. Borbély, "Effect of a single 3-hour exposure to bright light on core body temperature and sleep in humans", *Neuroscience Letters* 121 (1991), pp. 59-62.
9. F. A. J. L. Scheer, L. J. P. van Doornen, R. M. Buijs, "Light and diurnal cycle affect human heart rate: possible role for the circadian peacemaker", *Journal of Biological Rhythms* 14 (1999), pp. 202-212.
10. S. Y. R. Yoon, C. M. Shapiro, "Chronobiology of Sleep – Circadian Rhythms, Behaviour, and Performance" *Encyclopedia of Sleep* (2013), pp. 426-434.
11. R. J. Lucas, S. N. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, and G. C. Brainard, "Measuring and using light in the melanopsin age", *Trends in Neurosciences* 37 (2014), pp. 1-9.
12. G. C. Brainard, J. P. Hanfin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. Rollag, "Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor", *The Journal of Neuroscience* 16 (2001), pp. 6405-6412.
13. 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", *Journal of Physiology* 535 (2001), pp. 261-267.
14. M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman, "A model of phototransduction by the human circadian system", *Brain Research Reviews* 50 (2005), pp. 213 – 228.

- 15.M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner, "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system", *Lighting Research and Technology* 44 (2012), pp. 386-396.
- 16.S. W. Lockley, G. C. Brainard, C. A. Czeisler, "High Sensitivity of the Human Circadian Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light", *The Journal of Clinical Endocrinology and metabolism* 88 (2003), pp. 4502-4505.
- 17.C. Cajochen, M. Münch, S. Kobiałka, K. Kräuchi, R. Stener, P. Oelhafen, S. Orgül, A. Wirz-Justice, "High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light", *The Journal of Clinical Endocrinology and metabolism* 90 (2005), pp. 1311-1316.
- 18.S. S. Campbell, D. Dawson, "Enhancement of nighttime alertness and performance with bright ambient light", *Physiology & Behaviour* 48 (1990), pp. 317-320.
- 19.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 & Behaviour* 53 (1993), pp. 929-936.
- 20.S. Lavoie, J. Paquet, B. Selmaoui, M. Rufiange, M. Dumont, "Vigilance levels during and after bright light exposure in the first half of the night", *Chronobiology International* 20 (2003), pp. 1019-1038.
- 21.J. Phipps-Nelson, J. R. Redman, D-J. Dijk, S. M. Rajaratnam, "Daytime Exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance", *Sleep* 26 (2003), pp. 695-700.
- 22.G. C. Brainard, A. J. Lewy, M. Menaker, R. H. Fredrickson, L. S. Miller, R. G. Weleber, V. Cassone, D. Hudson, "Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers", *Brain Research* 454 (1988), pp. 212-218.
- 23.D. B. Boivin, J. F. Duffy, R. E. Kronauer, C. A. Czeisler, "Dose-response relationship for resetting of human circadian clock by light", *Nature* 379 (1996), pp. 540-542.
- 24.G. Vandewalle, P. Maquet, D-J. Dijk, "Light as a modulator of cognitive brain function", *Trends in Cognitive Science* 13 (2009), pp. 429-438.
- 25.C. Cajochen, "Alerting effects of light", *Sleep Medicine Review* 11 (2007), pp. 453-464.
- 26.G. Vandewalle, S. Gais, M. Schabus, E. Balteau, G. Albouy, V. Sterpenich, D-J Dijk, M. Pierre, "Superiority of blue (470 nm) light in eliciting non-image forming brain responses during auditory working memory in humans: a fMRI study", *Journal of Sleep Research* 15 (2006), pp. 54.
- 27.G. Vandewalle, E. Balteau, C. Phillips, C. Degueldre, V. Moreau, "Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses", *Current Biology* 16 (2006), pp. 1616-1621.
- 28.F. Perrin, P. Peigneux, S. Fuchs, S. Verhaeghe, S. Laureys, B. Middleton, C. Degueldre, G. Del Fiore, G. Vandewalle, E. Balteau, R. Poirrier, V. Moreau, A. Luxen, P. Maquet, "Non visual responses to light exposure in the human brain during the circadian night", *Current Biology* 14 (2004), pp. 1842-1846.
29. 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* 17 (2007), pp. 2788-2795.
- 30.K. C. H. J. Smolders, Y. A. V. de Kort, P. J. M., "Cluitmans A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures", *Physiology & Behaviour* 107 (2012), pp. 7-16.
- 31.R. W. Corbett, B. Middleton, J. Ardent, "An hour of bright white light in the early morning improves performances and advances sleep and circadian phase during Antarctic winter", *Neuroscience Letters* 525 (2012), pp. 146-151.
- 32.F. Bisegna, C. Burattini, O. Li Rosi, L. Blaso, S. Fumagalli, "Non visual effects of light: An overview and an Italian experience", 6th International Building Physics Conference, Torino 15-17 giugno 2015, pp.1-6.
- 33.S. Lehl, K. Gerstmeier, J. H. Jacob, H. Frieling, A. W. Henkel, R. Meyrer, J. Wiltfang, J. Kornhuber, S. Bleich, "Blue light improves cognitive performance", *Journal of Neural Transmission* 114 (2007), pp. 457-460.
- 34.P. R. Mills, S. C. Tomkins, L. J. M. Schlangen, "The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance", *Journal of Circadian Rhythms* 5 (2007), pp. 2-9.

- 35.A. U. Viola, L. M. James, L. J. M. Schlangen, D-J. Dijk, "Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality" *Scandinavian Journal of Work Environment & Health* 34 (2008), pp. 297-306.
- 36.O. Keis, H. Helbig, J. Streb, K. Hille, "Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance" *Trends in Neuroscience and Education* 3 (2014), pp. 86-92.
- 37.S. L. Chellappa, R. Steiner, P. Blattner, P. Oelhafen, T. Götz, C. Cajochen, "Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert?", *Plos ONE* 6 (2011), pp. 1-11.
- 38.F. Stablum, L'attenzione, Ed. Carocci 2002.
- 39.G. Aston-Jones, "Brain structures and receptors involved in alertness", *Sleep Medicine*, n. 6 (2005), pp. S3-S7.
- 40.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.
- 41.R. Parausuraman, J.S. Warm, J.E. See, "Brain System of Vigilance", *The attentive brain* (1998), pp. 221-256, The MIT Press, Cambridge.
- 42.J. E. See, S. R. Howe, J.S. Warm, W.N. Dember, "Meta-Analysis of the Sensitivity Decrement in Vigilance", *Psychologica Bulletin*, n. 117 (1995), pp. 230-249.
- 43.B. S. Oken, M. C. Salinsky, S. M. Elsas, Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurements, *Clinical Neurophysiology* 117 (2006), pp. 1885-1901.
- 44.P. Badia, B. Myers, M. Boecker, J. Culpepper, J. R. Harsh, "Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior", *Physiology & Behavior* 50 (1991), pp. 583-588.
- 45.D. E. Bunnell, S. P. Treiber, N. H. Phillips, R. J. Berger, "Effects of evening bright light exposure on melatonin, body temperature and sleep", *Journal of Sleep Research* 1 (1992), pp. 17-23.
- 46.C. Cajochen, J. M. Zeitzer, C. A. Czeisler, D-J. Dijk, "Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness", *behavioural Brain Research* 115 (2000), pp. 75-83.
- 47.C. Lafrance, M. Dumont, P. Lespérance, C. Lambert, "Daytime Vigilance after Morning Bright Light Exposure in Volunteers Subjected to Sleep Restriction", *Physiology & Behavior* 63 (1998), pp. 803-810.
- 48.S. W. Lockley, E. E. Evans, F. A. J. L. Scheer, G. C. Brainard, C. A. Czeisler, D. Aeschbach, "Short-Wavelength Sensitivity for the Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans", *Sleep* 29 (2006), pp. 161-168.
- 49.A. A. Borbély, P. Achermann, "Concepts and models of sleep regulation: an overview", *Journal of Sleep Research* 1 (1992), pp. 63-79.
- 50.O. Ogunrinde, H. J. Yue, "Sleep-Related breathing Disorder (SRBD) – Attention and Vigilance", *Enciclopedia of Sleep* 2013, pp. 346-351.
- 51.M. E. Jewlett, D-J. Dijk, R. Kronauer, D. Dinges, "Dose-response relationship between sleep duration and human psychomotor vigilance and subjective alertness", *Sleep* 22 (1999), pp. 171-179.
- 52.T. Akerstedt, M. Gillberg, "Subjective and objective sleepiness in the active individual", *International Journal of Neuroscience* 52 (1990), pp. 29-37.
- 53.E. M. Harrison, M. R. Gorman, S.C. Mednick, "The effect of narrowband 500 nm light on daytime sleep in humans", *Physiology & Behavior* 103 (2011), pp. 197-202.
- 54.T. Kantermann, "Circadian Biology: Sleep-Styles Shaped by Light-Styles", *Current Biology* 23 (2013), pp. R689-R690.
- 55.C. Burattini, F. Gugliermetti, F. Ferlazzo, L. Piccardi, A. M. Giannini, F. Bisegna, "Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sugli aspetti percettivi e circadiani", Enea 2013.
- 56.F. Ferlazzo, L. Piccardi, C. Burattini, M. Barbalace, F. Bisegna, A.M. Giannini, "Effects of new light sources on task switching and mental rotation performance", *Journal of Environmental Psychology* 39 (2014), pp. 92-100.

57. C. Burattini, L. Piccardi, F. Ferlazzo, A. M. Giannini, F. Bisegna, "Positive effects of blue light on an aspect of executive functions: future implications for air traffic controllers", *Italian Journal of Aerospace Medicine* 10 (2014), pp. 24-35.
58. C. Burattini, F. Ferlazzo, L. Piccardi, A. M. Giannini, F. Bisegna, "Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sulla vigilanza ed attenzione", Enea 2014.
59. T. H. Monk, "A Visual Analogue Scale technique to measure global vigor and affect", *Psychiatry Research* 27 (1989), pp. 88-89.

Curricula degli autori

Dr.ssa Chiara Burattini. Dottoranda al terzo 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. Professore associato 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. Giuseppe Curcio. Professore associato presso il Dipartimento di Medicina Clinica, Sanità Pubblica, Scienze della Vita e dell'Ambiente - MESVA dell'Università degli Studi dell'Aquila. Svolge ricerca attiva nei temi riguardanti la deprivazione di sonno e misure della sonnolenza, le relazioni tra sonno e memoria, gli effetti delle alterazioni del ciclo sonno-veglia sulle funzioni cognitive ed emozionali, l'invecchiamento normale e patologico ed effetti sulle funzioni cognitive superiori, gli aspetti cognitivi, emotivi e neurofisiologici delle sindromi neurodegenerative. In questi ambiti ha effettuato oltre 100 pubblicazioni su riviste e congressi internazionali; è inoltre socio e referee di diverse riviste scientifiche nazionali ed internazionali e vincitore di premi 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. 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.).

Prof. Franco Gugliermetti. Professore ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) della Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale (ICI), e direttore, dal 01.11.2013, del dipartimento DIAEE. È inoltre coordinatore del corso di dottorato in "Energia e Ambiente" di Sapienza, coordinatore del corso universitario di perfezionamento in "Smart cities and communities: progettazione e gestione della città orientata al benessere" e responsabile del Laboratorio di Illuminotecnica ed energia raggianti del DIAEE. 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.

8 Appendice

Appendice 1. Diario del sonno

DIARIO DEL SONNO (da compilare entro 15 min. dal risveglio)

Nome e Cognome _____

Data _____ Orario _____

1. A che ora sei andato a letto ieri sera? _____
2. A che ora hai spento la luce disponendoti a dormire? _____
3. Dopo quanti minuti ti sei addormentato? _____
4. Quanto è stato facile addormentarti?
 molto difficile ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ molto facile
5. Quante volte ti sei risvegliato nel corso della notte? _____
6. Quanto è stato facile riaddormentarti dopo il risveglio?
 molto difficile ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ molto facile

(Se ricordi più di un risveglio, valuta separatamente ciascun riaddormentamento indicando ognuno con una lettera dell'alfabeto - "A" per il primo, "B" per il secondo, etc. - e segnando ciascuna lettera in corrispondenza del quadratino che corrisponde alla sua valutazione).

7. In totale, per quanti minuti sei rimasto sveglio? _____
 (Se ti sei svegliato più di una volta indica in successione, dal primo all'ultimo risveglio, quanti minuti sei rimasto sveglio dopo ciascuno di essi).

8. Quanto hai dormito complessivamente (in ore e minuti)? _____
9. A che ora ti sei svegliato definitivamente questa mattina? _____
10. Dopo quanti minuti ti sei alzato? _____
11. Come ti sei svegliato?
 spontaneamente ☐ con una sveglia ☐ altro (specificare) ☐
12. Come giudicheresti il tuo livello di sonnolenza/vigilanza al momento del risveglio?
 estremamente sveglio ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ estremamente sonnolento
13. Valuta come è stato complessivamente il tuo sonno:

molto leggero	☐	☐	☐	☐	☐	molto profondo
molto agitato	☐	☐	☐	☐	☐	molto tranquillo
molto poco riposante	☐	☐	☐	☐	☐	molto riposante
14. Hai sognato? SI ☐ NO ☐ NON SO ☐
15. Se sì, quanti sogni ricordi? _____
16. Per favore, annota qui di seguito qualsiasi cosa abbia disturbato il tuo sonno questa notte (per es., rumori, luce esterna, russamento, irrequietezza, agitazione, sensazione di scomodità, etc.);

Appendice 2. Karolinska Sleepiness Scale

Karolinska Sleepiness Scale

Nome.....	Data	Oral	
			Proval _____

Per favore valuta il tuo livello di sonnolenza negli ultimi 10 minuti, cercando, tra le descrizioni sotto riportate, il numero che corrisponde a quella che più adeguatamente descrive il tuo stato. Nella tua valutazione considera anche i punti intermedi alle descrizioni riportate.

1= molto vigile

2

3= vigile a livello normale

4

5= né vigile, né sonnolento/a

6

7= sonnolento/a, ma senza alcuna difficoltà a rimanere sveglio/a

8

9= molto sonnolento/a, con grande difficoltà a rimanere sveglio/a, sforzandomi di non dormire

Appendice 3. Global Vigor Affective Scale

Vigor Global Vigor-Affect Scale (Monk, 1989)

Nome.....	Data	Ora	Prova
-----------	------	-----	---------------

1. Quanto ti senti vigile?

Per niente | | Moltissimo

2. Quanto ti senti triste?

Per niente | | Moltissimo

3. Quanto ti senti teso?

Per niente | | Moltissimo

4. Quanto sforzo ti costa fare qualcosa?

Per niente | | Moltissimo

5. Quanto ti senti felice?

Per niente | | Moltissimo

6. Quanto ti senti stanco?

Per niente | | Moltissimo

7. Quanto ti senti calmo?

Per niente | | Moltissimo

8. Quanto ti senti assonnato?

Per niente | | Moltissimo