



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio per la valutazione degli effetti della luce sugli esseri umani

M. Barbalace, F. Gugliermetti, F. Lucchese, F. Bisegna



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

DIATEE - Area Fisica Tecnica

Report RdS/2012/273

STUDIO PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLA LUCE SUGLI ESSERI UMANI

M. Barbalace, F. Gugliermetti, F. Bisegna (SAPIENZA Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, DIAEE – Area Fisica Tecnica)

F. Lucchese (SAPIENZA Università di Roma, Dipartimento di Psicologia Dinamica e Clinica)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

Progetto: Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici

Responsabile del Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Indice

Sommario	4
Introduzione	5
Elementi di fotometria circadiana	6
TEST n. 1 (in cabina sperimentale)	17
<i>Materiali e metodi</i>	17
<i>Discussione</i>	22
TEST n.2 (in ambiente reale)	24
<i>Valori di baseline</i>	24
<i>Analisi dati</i>	26
<i>Limiti del protocollo</i>	30
Conclusioni	32
Riferimenti bibliografici	33
Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività:	36

Sommario

Al giorno d'oggi la maggior parte del tempo viene trascorso all'interno di ambienti confinati, dove l'illuminazione è spesso prevalentemente artificiale. Nel 2002 è stato scoperto nella retina umana un terzo fotorecettore chiamato melanopsina responsabile della sincronizzazione dell'orologio biologico. Da allora è apparso chiaro che le condizioni d'illuminazione influenzano i nostri ritmi corporei in modo molto preciso: molti studi hanno indagato la relazione tra la luce e il tracciato di alcune secrezioni ormonali, in particolare i livelli di melatonina, prodotta dalla ghiandola pineale in condizioni di assenza di stimolazioni luminose. Sulla base di questi primi studi è stato pubblicato il Final Report della CIE 158:2004, che elenca i principi dell' "illuminazione salubre" (healthy lighting).

E' stato dimostrato che un'esposizione sbagliata alla luce può causare problemi di salute, tra cui alcuni specifici tipi di cancro (in particolare al seno e al colon retto). L'esistenza di un legame tra alterazione del ritmo circadiano e un'errata esposizione alla luce ha prodotto un gran numero di studi, che hanno raffinato le conoscenze in materia, scoprendo alcuni aspetti importanti sul sistema circadiano, come ad esempio:

- la composizione spettrale della luce è cruciale per la sua stimolazione, perché da un lato la melanopsina ha il suo picco di sensibilità nella regione del blu e dall'altro la reazione circadiana alla luce non è semplicemente la somma dei contributi di tutte le lunghezze d'onda, ma segue una legge di opponenza spettrale (giallo/blu e rosso/verde);
- la metà inferiore della retina è più sensibile alla luce rispetto a quella superiore;
- impulsi di luce a livelli di illuminamento elevati sono molto più efficaci nel sopprimere la melatonina rispetto a variazioni gradualmente;
- il momento dell'esposizione alla luce è cruciale nel determinare la reazione dell'orologio circadiano, ma questo meccanismo non è stato ancora del tutto compreso.

Altro aspetto di rilievo riguarda la relazione tra la luce e i parametri psicofisiologici: la relazione tra la psicologia e la luce è tema più complesso da indagare rispetto a quella tra fisiologia e luce, ma altrettanto importante. Nel 2009 è stata fornita evidenza preliminare che la luce monocromatica rossa, generalmente considerata elemento di riposo per il sistema circadiano, può allo stesso tempo attivare la reazione psicologica di allerta. Questa scoperta pone seri dubbi sulla pratica corrente legata all'uso di luce con particolari distribuzioni spettrali per ottimizzare l'allineamento circadiano, senza tener conto di possibili effetti collaterali sul piano psicologico.

Nell'ambito della ricerca sul tema della luce finalizzata alla salute e al benessere psicofisiologico degli esseri umani svolta dal dipartimento DIAEE, dopo una breve analisi bibliografica sulla relazione tra la luce e i parametri fisiologici, sono stati svolti due test sperimentali volti all'approfondimento delle conoscenze sull'influenza dell'ambiente luminoso sugli esseri umani. Il primo test (TEST n. 1) è stato realizzato all'interno di una cabina in grado di implementare facilmente differenti scenari d'illuminazione artificiale (senza apporto di luce naturale esterna), mentre il secondo (TEST n. 2) è stato svolto in ambiente reale nel quale era possibile realizzare un controllo della luce naturale nella zona di sperimentazione mediante opportune strutture oscuranti di materiale plastico.

Lo scopo di tale attività è orientato allo studio delle intercorrelazioni esistenti tra l'illuminazione ambientale e le reazioni umane, al fine di muovere un primo passo verso la definizione di nuove linee guida per un'illuminazione "consapevole" anche degli aspetti psicologici e fisiologici.

Introduzione

La progettazione dell'illuminazione è da sempre finalizzata a rendere ottimale la prestazione visiva richiesta da una determinata attività. Recentemente, si è scoperto che la luce ha una forte implicazione anche per la salute e il benessere [1], e si prevede che nel futuro tali implicazioni saranno prese in considerazione per una più completa e corretta illuminazione naturale e artificiale degli ambienti. Si sta verificando cioè un passaggio da un'impostazione più strettamente tecnica a una integrata, in cui convergono il benessere dell'individuo (visibilità in un determinato ambiente, comfort, umore e giudizio estetico, azione biologica), l'architettura strutturale (morfologia, composizione, codici e standard), e gli aspetti economici connessi con l'impiego di tali sistemi (installazione, mantenimento, funzionamento, energia e ambiente); tutti questi elementi insieme conducono ad una corretta progettazione illuminotecnica, garantendo in tal modo una illuminazione "ottimale" [2].

Le considerazioni riguardanti gli aspetti biologici dovranno essere introdotte con attenzione e solo quando ci sarà la giusta consapevolezza e conoscenza [3]. Poiché gli effetti fotobiologici della luce sono legati alle caratteristiche dell'energia luminosa incidente sulla retina, i sistemi d'illuminazione dovranno certamente essere valutati e testati anche per la luce che indirizzano all'occhio (intesa come la somma di quella proveniente dalla sorgente luminosa e da quella riflessa dalle superfici e oggetti circostanti) e non soltanto, come attualmente viene fatto, per quella emessa e/o che investe le superfici costituenti l'ambiente. Naturalmente per una corretta qualità della luce continueranno a valere gli aspetti progettuali "tradizionali" individuati dalla CIE in termini di colore, riflettanze delle pareti, abbagliamento, utilizzo della luce naturale, etc.

Molte sono ancora le questioni irrisolte; tra queste, quali siano [4-8]:

- le fasce orarie, l'intensità, lo spettro, la durata, il modello di esposizione luminosa da applicare come ottimale,
- le giuste dosi di luce e di "buio salubre" in relazione ai soggetti e alle loro caratteristiche ed età
- le caratteristiche circadiane dell'occhio medio umano, se lo spettro di azione della melatonina è l'unico da considerare.

Quel che appare però certo è che nel futuro un'illuminazione salubre e sostenibile dovrà prevedere una progettazione orientata sia agli aspetti visivi (performance e comfort) che a quelli circadiani, integrata dagli aspetti di efficienza energetica e sostenibilità ambientale. Nel CIE Technical Report 158:2004 [3], sono riportati cinque principi generali per un'illuminazione orientata alla salute e al benessere. Tali principi affermano che:

1. *Lo stile di vita dei Paesi industrializzati comporta una esposizione alla luce giornaliera limitata: essa è potenzialmente così bassa da risultare dannosa per la nostra salute. Manca a oggi un'idea chiara di quale sia la dose giornaliera di luce ottimale.*
2. *L'illuminazione biologica è inestricabilmente connessa al "buio biologico": il mantenimento dei ritmi circadiani richiede periodi di buio da affiancare a periodi di luce. Raccomandazioni per una dose giornaliera di buio sono importanti quanto quelle della dose di luce giornaliera, ma anch'esse ad oggi non esistono.*
3. *L'illuminazione biologica deve essere ricca nelle regioni dello spettro cui il sistema circadiano sia più sensibile: la zona dello spettro di maggiore interesse sembra essere quella compresa nella regione blu-verde. Un approfondimento delle conoscenze permetterebbe di trasferire informazioni per la progettazione e realizzazione di ambienti e sorgenti orientati a massimizzare i loro effetti per la salute, contenendo così i problemi connessi con l'efficienza energetica.*
4. *Un aspetto fondamentale nella determinazione dell'esposizione giornaliera alla luce è la quantità di luce ricevuta all'occhio, sia direttamente dalla sorgente luminosa, sia indirettamente dalle superfici al contorno: l'illuminazione biologica dovrebbe essere pensata sulla base della luce che arriva all'occhio, piuttosto che di quella sul piano di lavoro.*

5. *L'ora di esposizione alla luce influenza gli effetti dell'esposizione*: la sensibilità del sistema circadiano all'esposizione luminosa varia in modo significativo durante le 24 ore; ad oggi, per le applicazioni pratiche non si conosce né il periodo di esposizione più adatto, né i tempi di esposizione.

La questione diventa ancora più complessa quando si pensi al ruolo dell'illuminazione biologica nei confronti del sistema circadiano.

Elementi di fotometria circadiana

Centrale per la fotobiologia circadiana è l'orologio circadiano: esso risiede nel Nucleo Soprachiasmatico (SCN) del cervello, regola i tracciati giornalieri (circa dies, "di un giorno circa") dei ritmi fisiologici come il sonno e l'attività, ha un periodo di circa 24,5 ore [9] e per tenersi in fase con il ritmo giorno/notte di 24 ore esatte ha bisogno della luce [10], che percepisce come "indizio temporale" (Zeitgeber). La luce è il principale stimolo ambientale [11] per regolare il sistema circadiano, anche se altri stimoli esterni come il suono, la temperatura, i segnali sociali, la caffeina e gli orari dei pasti possono influenzare le funzioni di temporizzazione del corpo. Molte persone soffrono di sfasature, più o meno gravi, del sistema circadiano che potrebbero essere causate dall'esposizione ad una scorretta illuminazione artificiale.

L'occhio, l'organo della vista (Fig. 1), contiene al suo interno sia i fotorecettori per il sistema visivo (coni e bastoncelli) disposti su tutta la retina, sia quelli relativi al sistema non-visivo, cioè le cellule gangliari intrinsecamente fotosensibili (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGC) [12, 13] situate prevalentemente nella parte inferiore della retina [14]. Tale organo della vista si modifica con l'età e la visione peggiora a causa dell'ispessimento, dell'ingiallimento e della minore trasmittanza luminosa del cristallino che, provocando una diminuzione di trasparenza dell'occhio alle lunghezze d'onda più corte, influenzano l'ampiezza dei cicli circadiani.

In condizioni normali la luce è lo stimolo primario per mantenere in fase l'orologio biologico: ogni ciclo sonno/veglia è resettato dalla luce per essere in fase con il ciclo giorno/notte, mentre in assenza di stimolazione luminosa e per una parte delle persone non vedenti, il tracciato sonno/veglia del comportamento umano si desincronizza rispetto all'alternarsi di luce e oscurità all'esterno. I cambiamenti stagionali nel ciclo giorno/notte, i viaggi transmeridiani e i turni di lavoro notturni portano a una desincronizzazione dei ritmi biologici da quelli ambientali di luce e oscurità, creando problemi di salute più o meno gravi a seconda dell'entità e della durata della desincronizzazione tra il ritmo endogeno e quello ambientale. Svariati studi di fotobiologia hanno evidenziato infatti che la luce influisce sullo stato di salute sia come fattore coinvolto nell'insorgenza di patologie varie, che come elemento terapeutico di diverse malattie quali la SAD, meglio nota come depressione invernale, l'Alzheimer, la demenza, i disturbi del sonno. Gli impulsi nervosi prodotti da tali cellule raggiungono, tramite il tratto retino-ipotalamico, il nucleo soprachiasmatico (SCN), considerato la sede centrale dell'"orologio biologico" o del sistema circadiano, che permette la sincronizzazione dei ritmi endogeni scanditi dal pacemaker circadiano [15]. La rete dell'SCN comprende vari centri di controllo del sistema nervoso, compresi gli altri nuclei ipotalamici, i nuclei del setto, il talamo, il mesencefalo e il midollo spinale: questi sistemi regolano la produzione di molti ormoni, tra cui il cortisolo, la melatonina, l'insulina, l'ormone della crescita, la prolattina e la luteina.

La luce deve entrare attraverso gli occhi per essere biologicamente efficiente e il fotorecettore per il sistema circadiano è la melanopsina [13, 16-19], sostanza presente in una piccola popolazione di cellule gangliari retiniche (1-3%): gli assoni di queste cellule conducono il segnale al nucleo soprachiasmatico e da qui l'input passa alla ghiandola pineale, che secreta la melatonina [5]. La secrezione di quest'ormone, detto "ormone dell'oscurità biologica" segue un andamento che oscilla nell'arco delle 24 ore, con il picco durante le ore di oscurità: tale secrezione è inibita dall'esposizione alla luce durante le ore notturne [20-22] e può essere misurata nel sangue, nella saliva o nelle urine. La presenza nel circolo sanguigno di quest'ormone favorisce il rilassamento e il sonno, mentre la sua assenza aumenta il livello di vigilanza (Fig. 2).

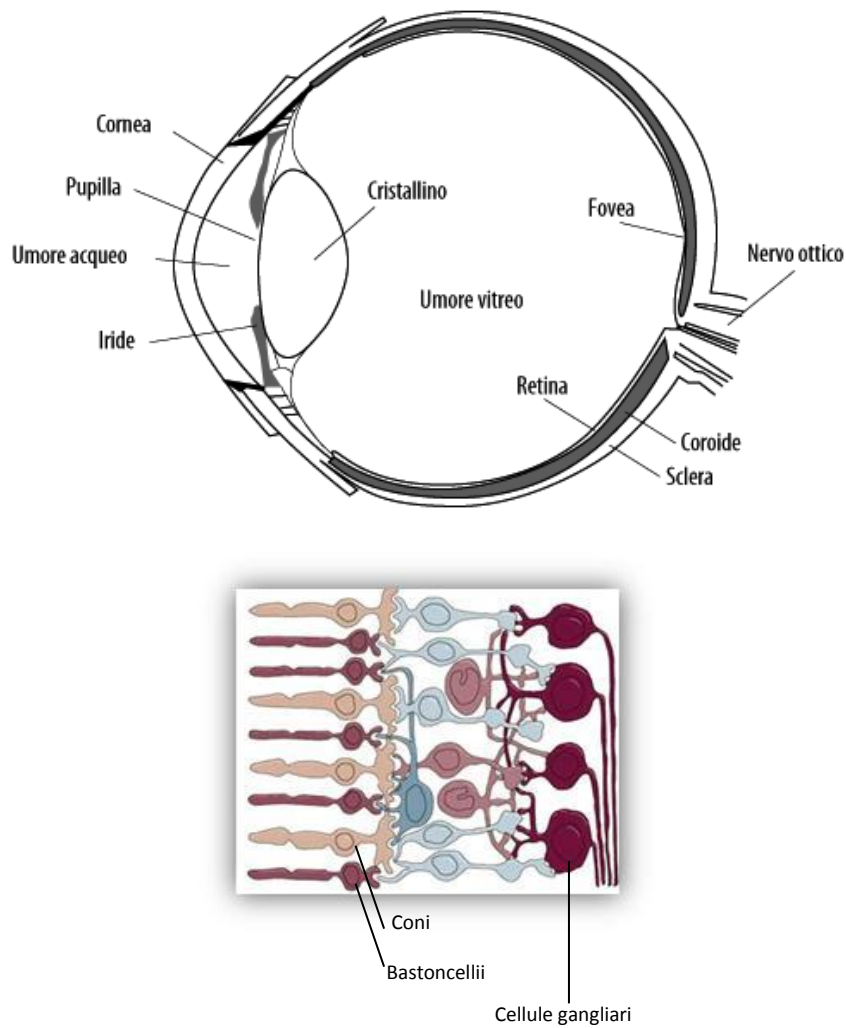


Figura 1. Fotoricettori per il sistema visivo (coni e bastoncelli) disposti interamente su tutta la retina, e fotoricettori per il sistema circadiano (cellule gangliari) disposti nella parte inferiore della retina.

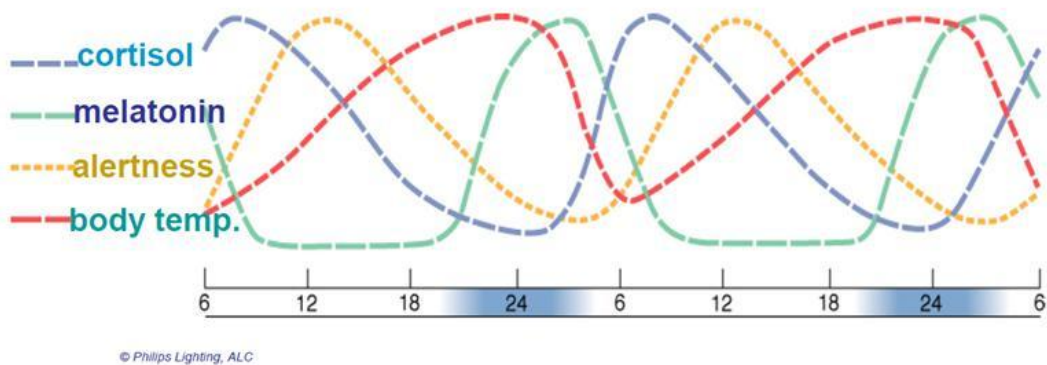


Figura 2. Ritmi giornalieri di alcuni processi fisiologici circadiani (cortisolo, melatonina, allerta e temperatura corporea) per una persona che si sveglia presto la mattina, pranza verso mezzogiorno e dorme durante la notte. (Fonte: Philips Lighting)

La melatonina è secreta di notte: le concentrazioni nel sangue aumentano rapidamente, raggiungendo il massimo in piena notte, per poi ridursi gradualmente all'approssimarsi del mattino. Il sistema regola l'attività secretiva sia grazie alla trasmissione neuronale di segnali esterni, sia in base ai cambiamenti di sensibilità del sistema circadiano a seconda dei segnali esterni. Il ruolo principale della melatonina è di riflettere il fotoperiodo ambientale tramite il profilo secretivo, ma è stato osservato che la produzione di quest'ormone influenza anche l'attività di diversi componenti del sistema immunitario. L'effetto più evidente e più indagato, al momento, circa le stimolazioni in aree oculari [23-26] è la risposta della ghiandola pineale in termini di soppressione della produzione della melatonina durante l'esposizione alla luce. La melatonina è inoltre conosciuta come agente oncostatico endogeno ed è stata ampiamente testata per la sua capacità di influenzare e inibire le attività metaboliche cellulari in alcuni tipi di cellule come quelle tumorali[27-30].

La melatonina non è l'unico ormone in stretta relazione con l'orologio biologico: tra i tanti altri riveste particolare importanza il cortisolo, noto anche come "ormone dello stress", che contribuisce ad aumentare gli zuccheri disponibili nel sangue, l'efficienza del sistema immunitario e protegge dalle infiammazioni. La distruzione temporanea o cronica dei bioritmi nell'uomo e negli animali è stata collegata da molti studi all'insorgenza di patologie varie, dalle più lievi, come i tipici disturbi da jet lag (disturbi gastrointestinali, cefalea, disturbi del sonno) alle più gravi, come alcuni tipi di cancro, in particolare al seno e al colon-retto. Diverse grandezze relative alla luce influiscono sui ritmi circadiani: l'orario dell'esposizione, l'intensità della luce, lo spettro, la durata e il "pattern di esposizione", ossia "storia dell'esposizione alla luce". Le modalità di interazione tra queste variabili e l'orologio biologico si stanno lentamente delineando, ma sono ancora in fase di studio [31]. Dal punto di vista della stimolazione circadiana ci sono una serie di elementi che richiedono di essere definiti e misurati diversamente rispetto alla fotometria classica, in termini di quantità, spettro, distribuzione spaziale, temporizzazione e durata dell'esposizione luminosa. Si evidenzia cioè la necessità di definire una fotometria circadiana per la misurazione dello stimolo biologico di soppressione della melatonina; infatti pur essendo la luce lo stimolo primario e principale del sistema circadiano, non è ancora completamente chiaro quali delle sue caratteristiche influenzino il sistema circadiano.

Un'esposizione continua a una luce con idonee caratteristiche spettrali può creare un anticipo o un ritardo di fase in funzione di quella circadiana endogena. Lo sfasamento del ciclo circadiano dipende principalmente da quattro fattori: quantità di luce, composizione spettrale, ora in cui la stimolazione luminosa è applicata all'individuo, direzione da cui proviene la luce (e relativa percezione dello stimolo luminoso all'interno dell'occhio). L'esposizione alla luce dopo il picco minimo del ciclo di temperatura corporea (circa al risveglio) genera soppressione della melatonina e produzione di cortisolo, e determina un aumento delle performance dell'individuo. L'esposizione alla luce di sera ritarda sia la fase del ciclo della temperatura corporea [32] sia il ritmo circadiano, e riduce la propensione al rilassamento, al riposo e al sonno; è stata inoltre osservata, a tal proposito, in molti esperimenti, la propensione di molti individui a preferire livelli d'illuminamento più alti per contrastare gli effetti della sonnolenza post prandiale.

Gli effetti di un'adeguata illuminazione artificiale di notte sono indicativi della soppressione della melatonina, della vigilanza e delle prestazioni. L'esposizione luminosa durante la prima metà della notte genera un ritardo del ciclo circadiano, mentre se ci si sottopone alla medesima esposizione nella seconda metà della notte, si ha un anticipo del ciclo circadiano: lo sfasamento più rilevante si ottiene in piena notte, quando il livello di melatonina raggiunge il suo apice. L'influenza della stimolazione luminosa sul sistema circadiano dipende anche dalla quantità di luce somministrata, con un effetto dose-dipendente: uno stimolo di luce brillante è più efficace nella soppressione della melatonina di uno stimolo generato da una luce fioca [33-35]. Alcune ricerche hanno mostrato, ad esempio, che 500 lux di illuminazione con lampada fluorescente[45] possono essere meno efficaci nella soppressione della melatonina di quelli corrispondenti a soli 3,5 lux prodotti da sorgenti LED [37]. Anche il modo in cui avviene la variazione della luce può essere significativo: variazioni improvvise del livello di illuminamento sono più efficaci di variazioni graduali ai fini della soppressione della melatonina[38-40].

Riassumendo: l'esposizione alla luce alle differenti ore del giorno soggettivo (valutato in base al ritmo della melatonina) [18] provoca dunque avanzamenti o ritardi della fase circadiana, e la direzione e l'entità di questi sfasamenti dipendono dal momento in cui avviene la stimolazione luminosa: in generale, luce fornita

durante la “mattina soggettiva” aiuta a mantenere sincronizzato l’orologio biologico, mentre l’esposizione alla luce di sera favorisce un ritardo di fase. La Curva di Risposta di Fase (Phase Response Curve) (Fig. 3) è stata stabilita empiricamente e mette in relazione l’orario di esposizione alla stimolazione luminosa con la direzione e l’entità dello sfasamento indotto.

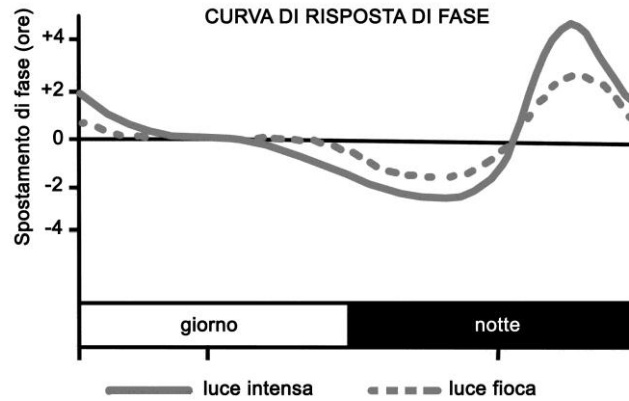


Figura 3. Curva di risposta di fase del sistema circadiano: esprime lo spostamento della fase circadiana (sfasamento anticipo-ritardo) in funzione dell’orario soggettivo di esposizione alla luce.

Numerose ricerche sugli effetti fisiologici della luce hanno evidenziato come la stimolazione luminosa necessaria a influire sul sistema circadiano sia indubbiamente maggiore di quella necessaria per l’attivazione della risposta del sistema visivo. Per il sistema visivo a un’esposizione breve corrisponde una risposta immediata (centesimi di secondo), mentre per il sistema circadiano a una esposizione prolungata corrisponde una risposta lenta (alcuni minuti) [41], in quanto, oltre a trasmettere gli impulsi nervosi al nucleo soprachiasmatico, vi è il tempo di secrezione della melatonina da parte della ghiandola pineale e dell’ingresso dell’ormone nel sangue. In particolare, la soppressione della melatonina in seguito all’esposizione a uno stimolo luminoso non è istantanea, bensì avviene da circa dieci minuti dopo l’inizio della stimolazione, mentre il ritorno ai livelli pre-stimolo si raggiunge circa un quarto d’ora dopo il termine dell’esposizione. Anche il modo in cui avviene la variazione di stimolo luminoso può essere importante: variazioni brusche sono più efficaci rispetto a quelle gradualmente per la soppressione della melatonina.

I ricettori del sistema circadiano sono concentrati nella parte inferiore della retina, per cui l’uomo è molto più sensibile alla luce proveniente dalla metà superiore del campo visivo, mentre un’illuminazione proveniente dal basso influenza in misura molto minore i ritmi biologici.

La differenza più evidente tra l’illuminazione artificiale e quella naturale è che la seconda è molto più intensa: i livelli d’illuminamento artificiale in scuole, residenze e industrie raramente superano i 1000lux sul piano di lavoro (circa 200 lux al livello della cornea) e anzi, comunemente, rimangono molto al di sotto di questo valore. Al contrario, gli illuminamenti di esterni subito dopo l’alba variano da 2000 a 10000lux al livello del suolo, anche in giorni nuvolosi: da questo fatto si deduce che gran parte degli ambienti chiusi ha un’illuminazione troppo bassa per mantenere sincronizzato l’orologio circadiano e inibire la secrezione di melatonina, per cui si è esposti all’“oscurità biologica” anche durante le ore diurne. Nei paesi industrializzati, si è riscontrata una più alta incidenza di tumori al seno, e questo è stato almeno in parte associato a un’errata esposizione alla luce, in termini di scelta di sorgente luminosa, temperatura di colore, flusso luminoso, illuminamento, ed in particolare e soprattutto ad una esposizione a luce brillante di notte e ad una esposizione a luce troppo fioca di giorno, combinazione che produce un’interruzione del ciclo circadiano, desincronizzando il sistema immunitario e la secrezione di melatonina. Questa percentuale di rischio viene incrementata da altri fattori, come una dieta ricca di grassi, la distruzione del ritmo giorno-notte del cortisolo, lo status socio-economico, il lavoro da turnista, etc [42-43].

Una distruzione transitoria del ritmo circadiano avviene in realtà ogni qualvolta è compiuto un viaggio transmeridiano attraverso zone con diversi fusi orari. La sindrome da jet lag include cambiamenti del ciclo sonno/veglia (stanchezza durante il giorno e insonnia durante la notte), dell’umore, dell’appetito, giramenti

di testa, disturbi gastrointestinali, irritabilità e lieve depressione o confusione. La durata e la gravità del jet lag derivano dalla direzione di viaggio, dal numero di fusi attraversati, dall'orario di partenza e di arrivo, da vari fattori individuali (età, livelli di attività e precedente orario del sonno) e dall'esposizione alla luce solare dopo l'arrivo. L'adattamento del ciclo circadiano a un nuovo fuso orario può richiedere sia un anticipo sia un ritardo di fase: essendo l'orologio circadiano leggermente in ritardo rispetto alle 24h, è più facile ottenere una nuova sintonizzazione dopo un volo verso est che verso ovest. Per il rifasamento del ciclo circadiano, si stanno testando diverse soluzioni, come ad esempio l'esposizione a orari prestabiliti alla luce artificiale (2-5 ore a 2500 - 10000 lux) in cicli singoli o consecutivi (Fig. 4).

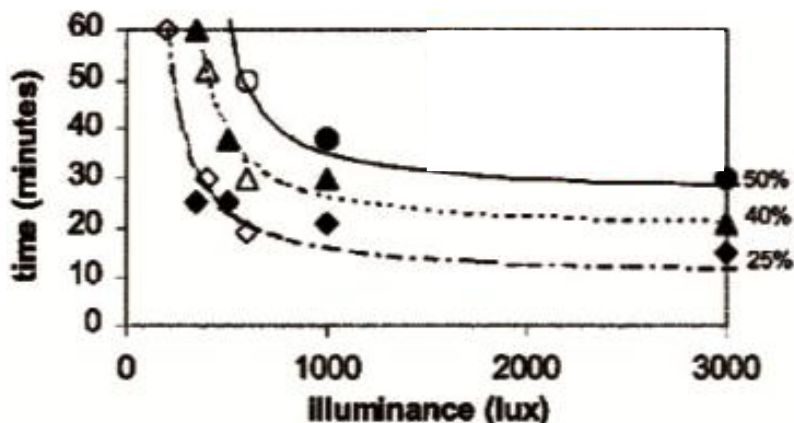


Figura 4. Tempo necessario di soppressione della melatonina al variare dell'illuminamento.

Le categorie di lavoratori notturni, stimati al 20% del totale degli occupati nei Paesi industrializzati, subiscono una sostanziale e prolungata alterazione del ritmo circadiano, che non riesce a conformarsi al lavoro di notte e al sonno di giorno a causa degli indizi temporali esterni, con conseguente sonnolenza e scarsa performance durante il lavoro [44-48]. Così come i disturbi da jet lag, anche questi ultimi possono essere alleviati con l'esposizione a orari prestabiliti a pulsazioni di luce bianca e indossando, al rientro dal lavoro, occhiali con lenti di colore arancione che impediscono alle lunghezze d'onda nel campo del blu di raggiungere la retina. E' inoltre raccomandabile dormire in un ambiente completamente buio affinché possa rientrare il picco della temperatura corporea e ristabilire la corretta secrezione di melatonina all'interno dell'orario del sonno.

Anche la cosiddetta sindrome affettiva stagionale (SAD), o depressione stagionale, deriva dalla diminuzione della durata del giorno, conseguente al passaggio dalla stagione estiva a quella autunnale-invernale, dall'apporto di una dose di luce giornaliera troppo bassa o dallo scompenso del ciclo circadiano. Sui soggetti predisposti, questa naturale oscillazione determina l'insorgenza, con diversi livelli di gravità, dei sintomi della SAD [49]. La light therapy è risultata valida per migliorare le disfunzioni del ciclo circadiano [50], aiutando a correggere questi disagi ripristinando il giusto ciclo e alleviando i sintomi depressivi. Vista la facilità con cui l'esposizione luminosa riesce a modificare i cicli circadiani, la light therapy è utilizzata sia per curare le alterazioni dell'orologio biologico dei pazienti malati di Alzheimer, i quali mostrano ritardi nei cicli, sia per ripristinare i disturbi minori come quelli legati al sonno.

E' stato inoltre dimostrato che la storia dell'esposizione alla luce influisce anch'essa sull'entità della soppressione della melatonina: in un esperimento è stato riscontrato che una "storia d'illuminazione" caratterizzata da illuminamenti alti e prolungati per una settimana rende il sistema circadiano meno sensibile all'esposizione alla luce durante le ore notturne rispetto a soggetti con un'esposizione precedente alla luce molto più bassa.

Da risultati di test sperimentali emerge inoltre che la temperatura di colore influenza lo stato di sonnolenza: il sistema nervoso centrale, alla presenza di una luce proveniente da una sorgente con temperatura di colore di 3000K è più rallentato rispetto a una sorgente a 5000K [51]. E' stata valutata inoltre l'influenza della variazione sullo spettro della luce sul livello di vigilanza [52-53], sulla frequenza cardiaca e sulla temperatura corporea (Cajochen et al.) [54], scoprendo che la luce con una lunghezza

d'onda pari ai 460 nm, oltre ad abbattere i livelli di melatonina nel sangue, aumenta la temperatura corporea e la frequenza cardiaca, ossia lo stato di vigilanza negli individui, rendendoli più attivi e produttivi sia fisicamente sia mentalmente. Baron e McCloughan sono stati tra i primi a ipotizzare che il messaggio visivo e l'illuminazione che lo genera possano cambiare l'umore delle persone [55-58], i giudizi che esprimono e il modo in cui si comportano: malgrado siano trascorsi trenta anni dalle affermazioni di questi due studiosi, questo aspetto dell'interazione uomo-ambiente è stato ancora poco indagato perché le modifiche degli stati emozionali che la luce può indurre sugli individui sono difficilmente quantificabili in termini numerici e quindi mal si prestano all'applicazione del metodo scientifico.

Dal punto di vista prettamente fisico comunque, oltre che sulla secrezione della melatonina, la luce ha un impatto diretto sull'attività della corteccia cerebrale, sulla temperatura corporea e sulla frequenza cardiaca, mentre per quanto riguarda la sfera psichica è stata dimostrata la sua influenza sullo stato d'animo e sul comportamento degli individui: questo secondo aspetto è legato al messaggio visivo che l'immagine (colore e luce) produce sul nostro sistema percettivo e sulla nostra psiche. Le reazioni psicofisiologiche sono inconsapevoli o scarsamente coscienti e sono legate a reazioni immediate ad alcuni stimoli legati alla sopravvivenza: in particolare il rosso è istintivamente collegato a una condizione di pericolo, mentre il blu è inconsciamente associato a uno stato di quiete. Più in generale, una luce calda o una luce fredda, indipendentemente dalla loro composizione spettrale, provocano reazioni differenti nei soggetti (Tab. 1).

Figueiro et al. [59-62] ha poi successivamente verificato sulla base dell'analisi del tracciato elettroencefalografico che c'è una relazione tra l'aumento della luce sull'occhio e l'aumentare dello stato di vigilanza. In sintesi si può affermare a oggi che:

- la luce rossa dal punto di vista circadiano crea calma e rilassamento e predispone al sonno, mentre dal punto di vista psicologico aumenta i livelli di allerta probabilmente perché collegata inconsciamente al senso di pericolo;
- la luce blu dal punto di vista circadiano aumenta i livelli di allerta e predispone all'attività sia fisica che mentale, mentre dal punto di vista psicologico predispone alla calma e all'introspezione.

Tabella 1. Reazioni psicofisiche ai colori caldi e freddi

	Colore o luce	
	caldo	freddo
La pressione sanguigna, l'espiazione, il battito cardiaco vengono	stimolati	calmati
I vasi sanguigni si	dilatano	restringono
La produzione di adrenalina viene	stimolata	frenata
Il tasso emoglobinico viene	rialzato	abbassato
Il battito delle palpebre	aumenta	diminuisce
Il sistema nervoso si	eccita	rilassa
La sensibilità acustica è	minore	maggiore
La temperatura ambientale appare	maggiore	minore

L'utilizzo di semplici grandezze fotometriche per descrivere la luce appare assolutamente inadeguata per caratterizzare il suo effetto sul sistema circadiano: tali grandezze sono, infatti, pesate secondo la curva di visione fotopica, che rispecchia sostanzialmente la sensibilità dei coni M (lunghezze d'onda medie, nel campo del giallo) e L (lunghezze d'onda elevate, nel campo dell' arancio-rosso), più presenti nella parte centrale della retina. Questi fotorecettori sono poco influenti sul sistema circadiano, come già dimostrato [10, 11, 63]. I fotorecettori del sistema circadiano, cioè le cellule gangliari contenenti melanopsina (una G-proteina accoppiata a un recettore) presentano un picco della sensibilità spettrale per lunghezze d'onda corte, nel campo del blu, strettamente connesso al picco di sensibilità che innesca gli effetti del sistema circadiano. In questo senso, si può affermare che una luce brillante prodotta da una lampada ad incandescenza ricca di radiazioni nel campo del giallo-rosso possiede una buona resa cromatica e consente una corretta funzione visiva ma non collabora alla soppressione di melatonina o comunque in modo minore rispetto ad una sorgente fluorescente di uguale flusso ma con temperatura di colore pari a 6.500K. La soppressione della melatonina è legata alla sensibilità della melanopsina alle varie lunghezze d'onda della luce: tale curva di sensibilità è molto diversa da quella della visione fotopica e mostra chiaramente una grande importanza delle lunghezze d'onda del blu e una scarsa o nulla sensibilità alle lunghezze d'onda del rosso-arancio (Fig. 5-6).

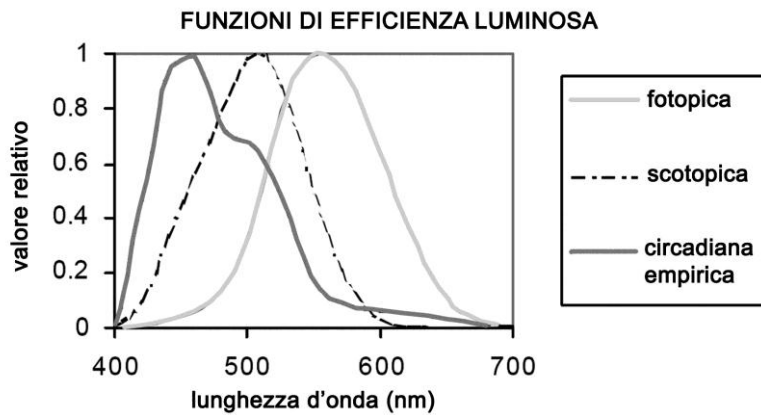


Figura 5. Curva di sensibilità circadiana empirica: tale curva è stata ricavata sperimentalmente e ad oggi è ancora in via di validazione.

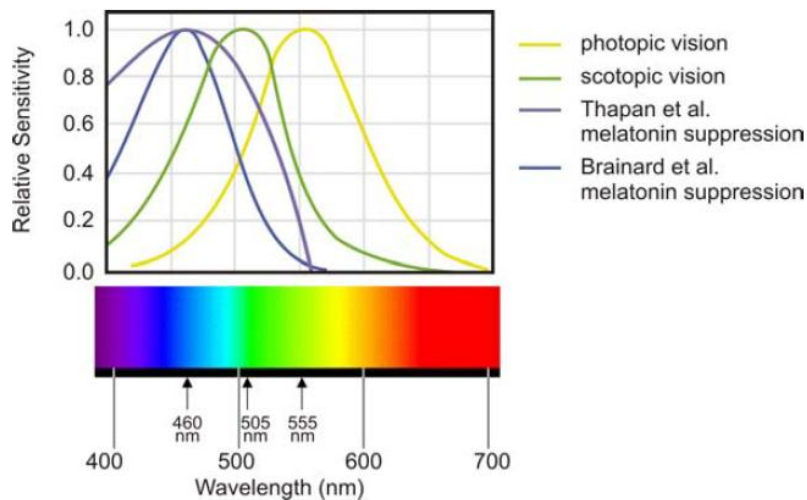


Figura 6. Studi per la determinazione della curva di sensibilità circadiana: il picco di sensibilità è intorno ai 480 nm, nella regione del blu dello spettro, a differenza della curva di visibilità fotopica, con picco di sensibilità intorno ai 555nm, nella regione verde-gialla dello spettro.

Le varie ipotesi di curva di sensibilità circadiana possono essere utilizzate per calcolare il “flusso circadiano” prodotto da una data sorgente, ossia per valutare l’efficacia della sorgente nello stimolare il sistema circadiano. Per questo, il primo modello di fototrasduzione (Rea et al.) [64] propone una misura corrispettiva per il sistema circadiano (stimolo circadiano su watt) dell’efficienza luminosa per il sistema visivo. Il valore dello stimolo circadiano prodotto per watt assorbito per i più diffusi tipi di sorgenti presenti sul mercato è stato calcolato secondo questo modello, e i risultati ottenuti mostrano che una lampada fluorescente da 7.500 K ha efficienza più che doppia rispetto ad una lampada fluorescente da 3.000 K della stessa potenza, a parità di esposizione allo stimolo luminoso e di performance visive (Fig. 7).

<i>Light Source</i>	<i>Photopic lumens/watt</i>	<i>Circadian stimulus/watt</i>
Fluorescent 3000K	100 lm/W	74 CS/W
Fluorescent 7500K	100 lm/W	157 CS/W
Incandescent	12 lm/W	12 CS/W
D65	70 lm/W	133 CS/W
Clear Mercury (Hg)	45 lm/W	18 CS/W
Blu LED (470 nm)	8 lm/W	223 CS/W
	15 lm/W	418 CS/W

Figura 7. Valore di stimolo circadiano su watt in riferimento allo stimolo lumen su watt per diverse sorgenti luminose.

Ad esempio, se l’illuminamento fotopico fosse lo stesso sotto una lampada a incandescenza e sotto la luce naturale, la luce naturale sarebbe 2,22 volte più efficace dell’incandescenza dal punto di vista del sistema circadiano, a causa della diversa composizione spettrale. Per quanto riguarda invece le sorgenti luminose tradizionalmente considerate “a luce bianca”, l’errore nella stima dell’input del sistema circadiano potrebbe risultare raramente superiore al 200%.

Da un punto di vista pratico, poi, il doppio della luce artificiale significa il doppio del costo, per cui l’aspetto spettrale diventa fondamentale nella pratica architettonica per il risparmio energetico.

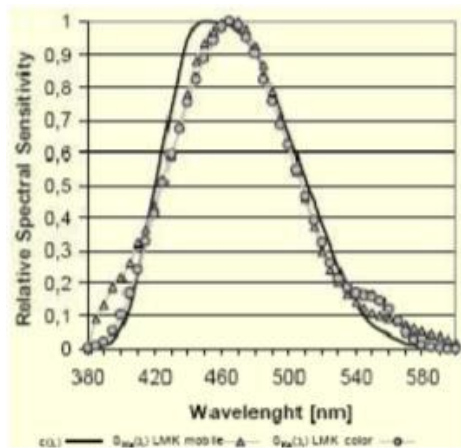
La curva di sensibilità circadiana mostra come l’occhio sia particolarmente ricettivo verso le lunghezze d’onda del blu (460-480nm), mentre tendenzialmente molto meno sensibile avvicinandosi alla zona del rosso (650-700nm). Il problema dal punto di vista illuminotecnico si sposta quindi sulle sorgenti e sulle loro caratteristiche di emissione spettrale. L’importanza della distribuzione spettrale dell’emissione luminosa è legata alla caratteristica di opponenza spettrale giallo/blu e rosso/verde del sistema circadiano: a causa di questo fenomeno, a parità d’intensità della componente blu, una sorgente che contiene equivalente componente gialla stimola molto meno rispetto ad una che ha queste due componenti fortemente sbilanciate a favore del blu. Figueiro et al. [65] ha dimostrato che soli 18 lux prodotti da un LED blu sono più efficienti nella soppressione della melatonina di 450 lux di luce bianca prodotti da una lampada ai vapori di mercurio avente uno spettro caratterizzato da un picco nel blu e uno nel giallo. A ulteriore conferma, in altri test sono stati incrociati due illuminamenti (450 lux e 1050 lux) prodotti da una lampada a vapori di mercurio non filtrata e gli illuminamenti prodotti dalla stessa lampada (7,5 e 15 lux) in presenza di un filtro blu, che lasciava passare solo la parte di spettro attorno a 436nm: il risultato è stato che, malgrado in presenza di filtro l’illuminamento fosse estremamente minore, la soppressione della melatonina era maggiore rispetto alla condizione non filtrata, anche se la componente spettrale blu nelle due condizioni era pressoché identica.

Il fenomeno di opponenza spettrale del sistema circadiano rende dunque impossibile stabilire una relazione diretta tra l’intensità dello stimolo luminoso e il livello di soppressione della melatonina senza considerarne anche la reale composizione spettrale: in altre parole, non è possibile sommare il contributo delle diverse lunghezze d’onda prese singolarmente. Il fatto che il sistema circadiano sia più sensibile alla luce blu al diminuire della componente giallo-rossa porta a comprendere come gran parte della luce artificiale bianca, correntemente utilizzata per l’illuminazione degli edifici, sia molto poco efficace nella soppressione diurna della melatonina rispetto alla luce naturale, che invece è molto ricca di lunghezze d’onda corte (blu e violetto).

Nonostante i molti risultati ottenuti, a tutt'oggi si è ancora lontani dal definire una curva di efficienza spettrale circadiana $c(\lambda)$. Dall'analisi dei (pochi) dati disponibili, s'ipotizza che il picco massimo di sensibilità circadiana si attesti intorno ai 450 nm. Sulla base di una serie di sperimentazioni, si sono potuti calcolare l'efficienza circadiana e il fattore di attivazione circadiana in funzione delle differenti sorgenti luminose e delle differenti curve di sensibilità circadiana a oggi presenti in bibliografia: per lunghezze d'onda maggiori di 450nm, la funzione proposta da Kozakov [66] diminuisce più rapidamente, mentre la funzione ottenuta da Thapan et al. [67] diminuisce meno rapidamente; per questo, il fattore di attivazione circadiana, definito come:

$$a_{cv} = \frac{\int X e^{\lambda} c(\lambda) d \lambda}{\int X e^{\lambda} V(\lambda) d \lambda}$$

presenta sempre valori minori con i dati di Kozakov, mentre i valori più grandi sono ottenuti con i dati di Thapan. Tale fattore, in mancanza di metodologie atte a caratterizzare il fenomeno di opponenza, è attualmente il solo tramite attraverso cui è possibile ottenere le grandezze circadiane a partire da quelle fotometriche; questo coefficiente descrive in maniera approssimata l'efficienza circadiana dei vari colori della luce, in quanto fa ricorso, come detto, ad una legge di addittività spettrale degli effetti, della cui validità e possibilità di correzione non si hanno ancora sufficienti conoscenze. La misura dei valori a_{cv} può essere effettuata attraverso: il calcolo a partire dallo spettro della sorgente, la misura integrale a partire da un detector adattato alla curva $c(\lambda)$, oppure, metodo alternativo e più economico, tramite approssimazione della funzione $c(\lambda)$ attraverso il diagramma colorimetrico CIE; è possibile infine la misura di tali valori anche a partire dalla temperatura di colore (Fig. 8a-d). Sulla base di questo approccio, attraverso la misura del fattore a_{cv} risulterebbe quindi possibile valutare, in maniera approssimativa, la stimolazione circadiana prodotta dai diversi sistemi di illuminazione e sorgenti presenti sul mercato.



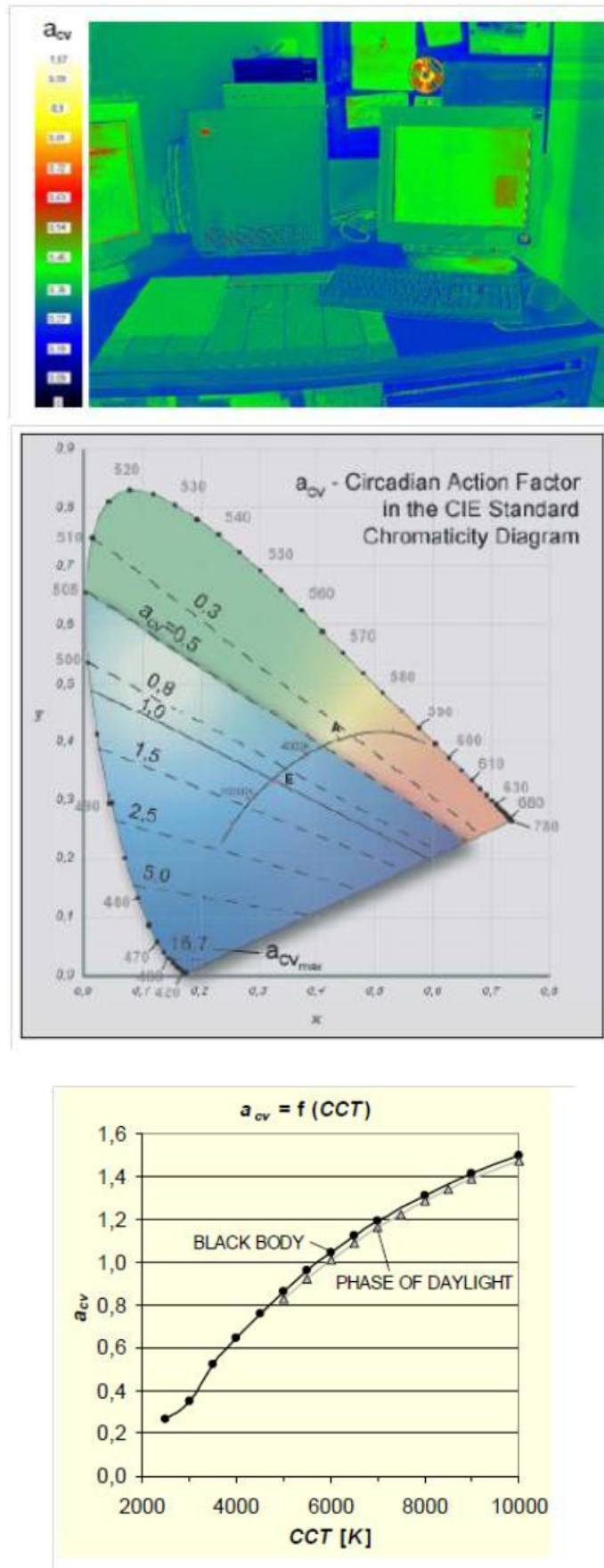


Figura 8a-d. Valori di a_{cv} nelle diverse rappresentazioni.

Alcuni dubbi però sussistono sulle procedure a tutt'oggi presentate per la rivisitazione in termini circadiani della progettazione illuminotecnica. In questo senso, sono diverse le ricerche portate avanti da studiosi per una più completa e dettagliata caratterizzazione dell'ambito ormai noto come fotometria circadiana [68]. Sono in corso inoltre molte ricerche su tutti i vari ambiti descritti. In futuro, è probabile che nelle nuove normative si terrà conto sia degli aspetti visivi sia di quelli circadiani con il fine ultimo di progettare e realizzare impianti efficienti ed efficaci per garantire un'ottimale qualità dell'illuminazione [69].

TEST n. 1 (in cabina sperimentale)

Materiali e metodi

E' stata realizzata una cabina sperimentale (Fig. 9) per svolgere una serie di test finalizzati a una maggiore comprensione della relazione tra le condizioni d' illuminazione ambientale e le risposte psicofisiologiche dei soggetti.

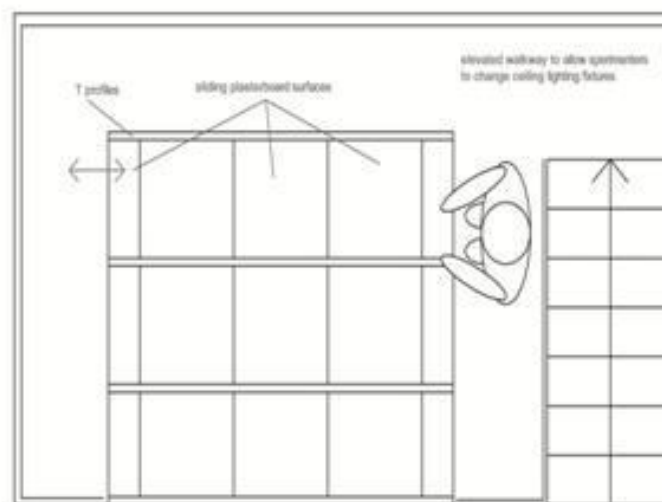
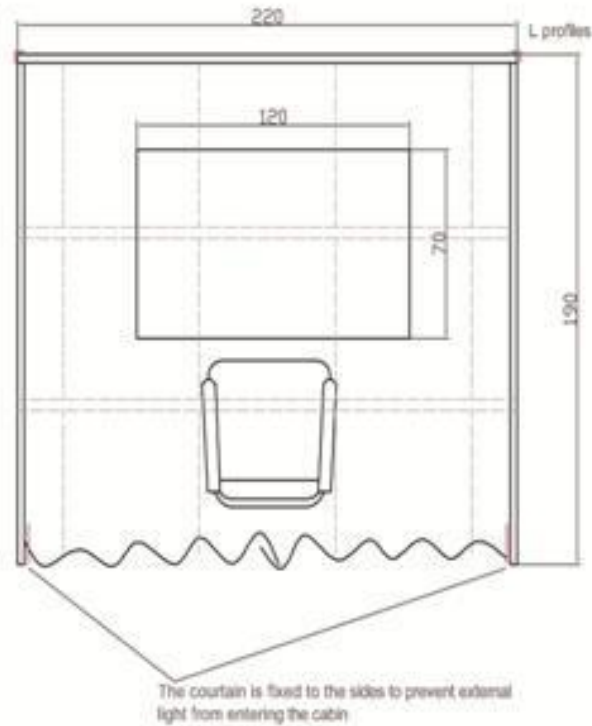


Figura 9. Pianta dell'interno e dell'esterno della cabina sperimentale.

La cabina riproduce una stanza priva di finestre grande a sufficienza per ospitare un tavolo con sopra un monitor da 24 pollici ed è progettata per cambiare facilmente gli apparecchi di illuminazione attraverso lo spostamento dei pannelli di cartongesso del controsoffitto. Tende nere poste dietro il soggetto evitano alla luce proveniente dall'esterno di penetrare nell'ambiente di studio. Sono state considerate due diverse condizioni di illuminazione:

- Oscurità: meno di 10 lux a livello dell'occhio (illuminamento verticale), dovuti al monitor del PC.
- Illuminazione artificiale: circa 450lux a livello dell'occhio, dovuti a apparecchi a soffitto che montano due tubi fluorescenti Philips modello TDL36W/830.

Sette soggetti (età media 25 anni, soggetti con età al di sotto di 40 anni, distribuzione bilanciata del sesso) hanno preso parte al protocollo: coinvolti per conoscenza personale, sono stati informati su ciò che avrebbero dovuto fare durante il test, e hanno fornito il loro consenso scritto. I soggetti sono rimasti immobili nella cabina guardando il monitor di fronte a loro per tutta la durata del test. Tutti i soggetti erano sani, al momento dell'effettuazione del test, e si sono astenuti dall'assunzione di caffè e/o sigarette prima e durante il test.

Durante il protocollo sperimentale è stato somministrato un test psicofisiologico impiegato anche per scopi di ricerca psicologica, con la collaborazione di un docente della Facoltà di Psicologia Dinamica e Clinica di Sapienza Università di Roma. Si tratta di uno slide show temporizzato costituito da una serie di immagini: dopo 25 secondi di pausa (slide grigia), ci sono 6 secondi di presentazione dello stimolo (immagine). Le immagini sono divise in tre categorie:

- immagini negative (scene violente, animali che ringhiano, serpenti, persone ferite...);
- immagini neutre (paesaggi naturali, fiori,...);
- immagini positive (cuccioli, volti sorridenti,...).

Sono state effettuate misure relative alle condizioni di illuminazione, ai parametri fisiologici e all'umore (l'ultima attraverso un questionario a risposta aperta). Lo strumento "Heart and Emotion" della Elemaya Instruments è stato impiegato per registrare le variabili psicofisiologiche (GSR, Galvanic Skin Resistance, resistenza galvanica cutanea, tonico e fasico e heart rate (HR), battito cardiaco). Lo strumento è fornito di un sensore fotoplethysmografico che deve essere applicato al dito medio per ottenere la misura dell'HR e una coppia di elettrodi che devono essere applicati al dito indice e anulare per quantificare la resistenza galvanica cutanea (Fig. 10).

Il GSR tonico è il valore assoluto della resistenza galvanica cutanea: aumenta se il soggetto è calmo e diminuisce se il soggetto è nervoso. Il GSR fasico è collegato invece alle risposte emozionali: pensieri, parole, stimoli legati alle emozioni provocano nel soggetto un picco di questa variabile.

Per quanto riguarda l'Heart Rate (HR), essa è invece influenzata da fenomeni emozionali e sospiri, che possono causare una temporanea vasocostrizione.

L'HRV (Heart Rate Variability) permette di ottenere informazioni legate all'equilibrio tra l'attivazione del sistema simpatico (legato ad uno stato di calma) e quella del sistema parasimpatico (legato ad uno stato generale di agitazione).

Un pc situato al di fuori della cabina è collegato allo strumento posto all'interno, al fine di registrare tre parametri psicofisiologici: resistenza galvanica cutanea (sia fasica che tonica) e battito cardiaco.

I soggetti sono stati sottoposti a 10 minuti di baseline prima dell'inizio del test psicofisiologico. Durante questo periodo di tempo sono rimasti seduti al buio, in silenzio e immobili, guardando lo schermo bianco del pc. Nel frattempo gli elettrodi hanno registrato sei parametri ogni 30 secondi: il GSR tonico e fasico, il battito cardiaco, la variabilità del battito cardiaco, l'attivazione del simpatico e del parasimpatico. Alla fine di questa registrazione preliminare, l'output era costituito di un set di 20 dati, la cui media rappresenta di parametri dei soggetti in condizione di "riposo emozionale".

Dopo le registrazioni di baseline, aveva inizio il vero test (Fig. 11): durante la somministrazione del test psicofisiologico, sono stati registrati il GSR tonico e fasico e l'HR ogni secondo. La risposta emozionale è stata poi sincronizzata attraverso un apposito software istallato nel PC situato fuori dalla cabina.

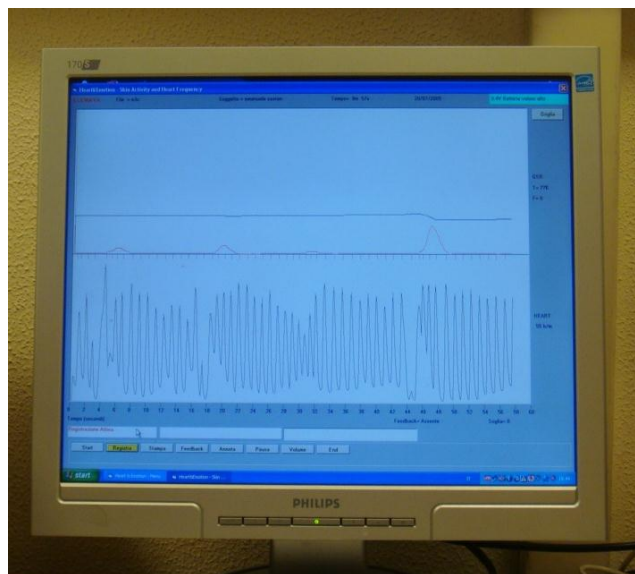


Figura 10. Lo strumento Elemaya Heart & Emotion, la schermata del monitor durante una registrazione, gli elettrodi attaccati ad un soggetto.



Figura 11. Schermata di pausa (25 secondi) e stimolo (6 secondi).

In associazione con il test psicofisiologico, dopo ogni sessione ai soggetti è stato chiesto di riempire il questionario SAM (Self Assessment Manikin) (Fig. 12), per esprimere alcuni parametri che avevano associato a ciascuna immagine durante il test. Il SAM è stato sviluppato da Bradley e Lang ed è un test non verbale basato su un sistema di valutazione emozionale tridimensionale che prende in considerazione tre variabili: valenza, attivazione e dominanza [70].

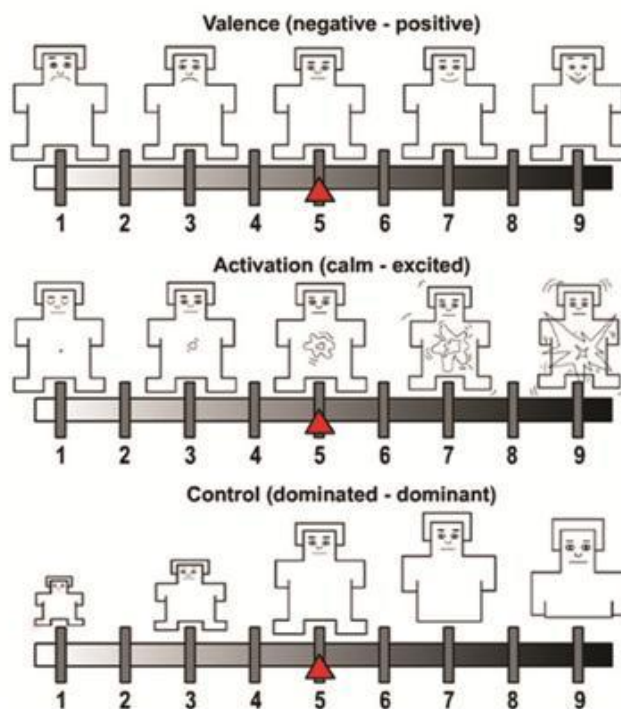


Figura 12. SAM- Self Assessment Manikin.

La valenza viene posta in relazione all'associazione di un'immagine con un significato positivo o negativo; l'attivazione è connessa all'umore (stimolante o calmante) che l'immagine provoca nel soggetto; la dominanza indica se l'immagine domina il soggetto o se è dominata dal soggetto. L'analisi dei dati effettuata è stata mirata a scoprire un'eventuale relazione tra le variazioni dei dati psicofisiologici e i cambiamenti quantitativi nei parametri ambientali (livelli di illuminamento). Durante la raccolta dati le registrazioni psicofisiologiche sono state sincronizzate con il test psicofisiologico, per cui è stato possibile comprendere la risposta del soggetto a ogni singola immagine: le triplette di dati

(GSR tonico e fasico e HR) registrati ogni secondo di test sono state ridotte da 25 a 1 per ogni slide grigia (assenza di stimolazione) e da 6 a 1 (presentazione dello stimolo), calcolando il valore medio nell'intervallo di tempo.

I valori medi di ogni intervallo di tempo sono poi stati analizzati sulla base della valenza dei differenti stimoli (positivo, negativo o neutro). In questo modo per ognuna delle due condizioni dello stesso soggetto, è stato possibile confrontarne il comportamento in diverse situazioni ambientali. I dati esportati dal programma "Electro Dermal Activity and Heart Frequency", sviluppato da Elemaya Instruments, sono curve (Fig. 13) che rappresentano l'andamento di uno specifico parametro psicofisiologico nel tempo.

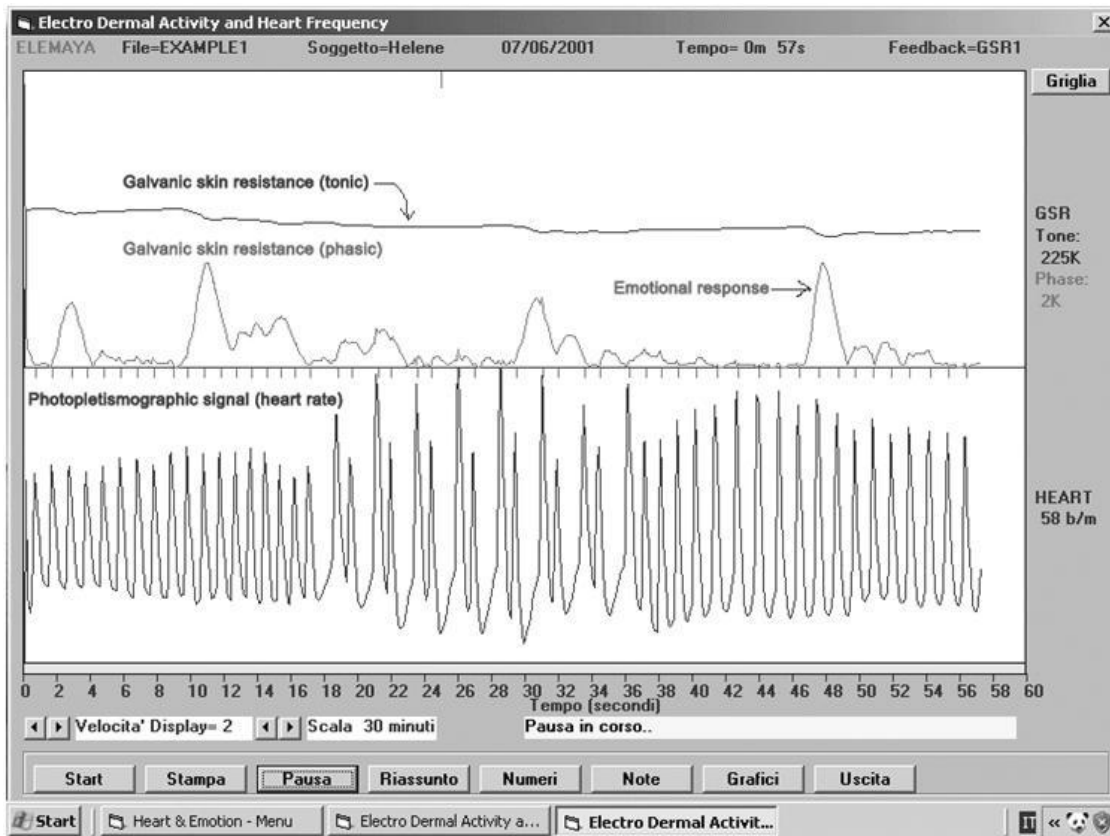


Figura 13. Schermata del software "Electrodermal activity and Heart Frequency", utilizzato per registrar i parametri psicofisiologici.

Dopo aver calcolato tutti i valori medi in ogni intervallo di tempo per ogni soggetto e per ogni condizione, i dati sono stati analizzati per mezzo di un software Statistica: i risultati (Fig. 14) mostrano una leggera variazione dei parametri fisiologici al variare delle condizioni d'illuminazione. Le variazioni nel GSR sono statisticamente significative, mentre gli effetti delle condizioni di illuminazione sul battito cardiaco non sono ben delineate, per cui è necessaria ulteriore ricerca.

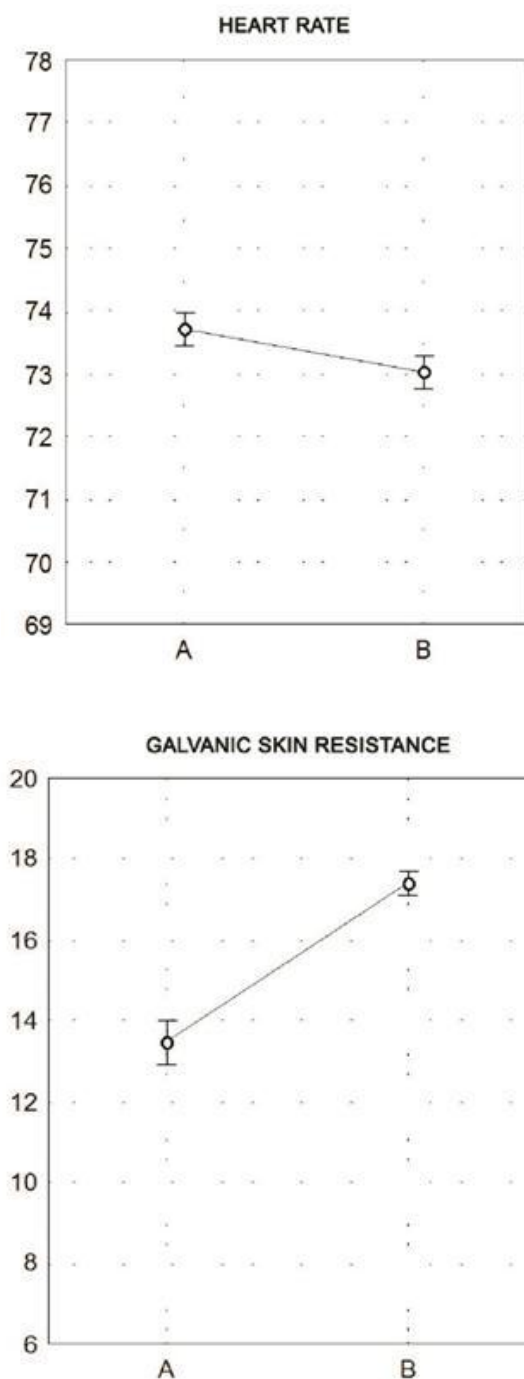


Figura 14. Risultati di HR e GSR fasico in condizioni di buio (A) e in condizione di luce artificiale (B).

Discussione

Il test effettuato è in fase di revisione in quanto la condizione di illuminazione A ricade nelle condizioni di visione mesopica [71], mentre la condizione di illuminazione B ricade nel campo della visione fotopica. La visione fotopica si ha quando il livello di luminanza è superiore a 1cd/m²: in questa condizione il picco di sensibilità è a 555nm e la percezione del colore è pienamente attiva poiché i coni lavorano come fotoricettori. Al contrario, la visione scotopica si ha in condizioni di scarsa illuminazione (luminanza compresa tra 10⁻⁶ e 10⁻² cd/m²): in questo caso funzionano quasi esclusivamente i bastoncelli, il picco di sensibilità è spostato verso il blu, con il picco a 507nm, mentre è fortemente ridotta la percezione del colore. Per livelli di luminanza intermedi vengono utilizzati sia i coni che i bastoncelli: questa condizione è

chiamata visione mesopica, e non è stata analiticamente compresa fino al 2010, quando la CIE ha pubblicato un documento su come è tecnicamente possibile passare dalla visione scotopica a quella fotopica. Questo documento potrebbe consentire di prendere quantitativamente in considerazione le differenze tra i tre tipi di visione e sarà impiegato per le ricerche future sulle differenti condizioni visive.

L'esperimento è stato svolto non prendendo in considerazione questo aspetto, accettando l'ipotesi di uguale condizione e le approssimazioni che ne conseguono. I test successivi saranno orientati ad una comprensione più profonda delle differenti sensazioni evocate in un essere umano dallo stesso ambiente in diverse condizioni percettive.

Un'ulteriore fattore da prendere in considerazione è che il test psicofisiologico somministrato non era randomizzato: dopo la prima somministrazione, i soggetti tendevano a intuire la sequenza delle immagini e ciò potrebbe aver causato una diminuzione dell'attenzione durante il protocollo. Nonostante ciò, i soggetti hanno mostrato ugualmente reazioni diverse in condizioni luminose diverse: questo risultato rafforza ulteriormente l'importanza dell'ambiente sulle reazioni umane.

TEST n.2 (in ambiente reale)

Nel corso della seconda sessione sperimentale, sono stati effettuati dei test che miravano a verificare ed approfondire i risultati ottenuti con il primo test, ovvero l'eventuale influenza del parametro "sorgente luminosa" sulle reazioni psicofisiologiche dei soggetti ad un test di risposta emotiva precedentemente elaborato e già somministrato nel laboratorio ad altri soggetti.

Per la realizzazione dell'esperimento, è stato necessario costruire all'interno del laboratorio un zona di somministrazione dei test (box), in cui i parametri relativi alla luce ambientale fossero controllabili facilmente; ciò è stato ottenuto realizzando il box con teli di stoffa mobili, che permettessero con la loro movimentazione, assieme all'utilizzo del sistema di frangisoli delle finestre e la possibilità di escludere totalmente la luce naturale ricorrendo a pesanti fogli neri di polietilene, la creazione di diversi scenari illuminotecnici. Il box delimita al suo interno un piccolo spazio contenente uno schermo pc con tastiera, una sedia con relativa scrivania e nel soffitto due tubi fluorescenti Philips modello TDL36W/830.

Valori di baseline

La sperimentazione ha lo scopo di verificare il protocollo di misura elaborato e lo sviluppo delle successive attività di analisi per la valutazione del ruolo dell'ambiente sulla reazione psicofisiologica. Il presente test risulta essere un approfondimento del test n.1 precedentemente presentato.

I soggetti, della stessa tipologia del test 1, sono stati reclutati sulla base di conoscenze personali e sono stati sottoposti a 10 minuti di baseline prima dell'inizio dei test. Durante tale periodo sono rimasti nella cabina, seduti in silenzio di fronte allo schermo bianco del computer, con le finestre schermate e in sola luce artificiale, mentre il programma "STRESS ANALYSIS" di Elemaya Instruments forniva ogni 30 secondi i seguenti parametri: resistenza galvanica cutanea fasica e tonica, battito cardiaco, variabilità del battito cardiaco, attività del simpatico e del parasimpatico. Alla fine della registrazione dei valori di baseline (Tab. 2), ai soggetti è stato somministrato il primo test.

Per la registrazione delle grandezze psicofisiologiche (GSR tonico e fasico e HR) è stato utilizzato lo strumento precedentemente descritto.

Il medesimo test psicofisiologico è stato somministrato allo stesso soggetto (metodologia within-subjects) in 4 condizioni differenti di illuminazione all'interno della cabina:

1. buio (illuminamento sull'occhio: 10 lux)
2. solo luce artificiale (illuminamento sull'occhio: 460lux)
3. luce artificiale e luce naturale (illuminamento variabile >550lux)
4. luce naturale (illuminamento variabile).

Al fine di avere informazioni sullo stato d'animo dei soggetti, utile ai fini interpretativi dei risultati sperimentali, a ognuno dei soggetti è stato richiesto di descrivere su di un foglio di carta il proprio stato d'animo con uno o più aggettivi prima e dopo ciascuno dei quattro test previsti. (Fig. 15); tale scelta è stata condizionata dalla necessità di semplificare le procedure di misura, che si sarebbero complicate e allungate, con perdita di attenzione e motivazione da parte dei soggetti, con l'utilizzazione di una scala grafica (Visual analogue scale) oggettivamente elaborabile.

Tabella 2. Valori di baseline di un soggetto prova

GSR (Kohms)	RCF (Kohms)	HRn	HRV	simpatico	parasimpatico
131	5	90	32	6	4,5
127	3	92	36	6,4	4
134	1	87	52	6,7	6,2
147	0	92	26	5,6	4,2
156	2	89	32	6,1	3,9
150	1	93	21	4,1	5
149	1	97	35	6,1	5,2
152	4	92	20	4,6	4,5
147	4	90	24	5,4	4,4
137	2	92	28	5,6	4,5
128	4	94	46	5,9	6,5
132	3	95	24	5,5	3,8
120	6	90	42	6,3	5,7
120	2	87	60	7,3	5,9
117	2	90	36	5,6	5,9
135	0	96	20	5	3,6
131	3	95	29	5,9	4
125	4	95	24	5,4	3,8
122	0	96	27	5,6	4,5
116	5	90	54	6,3	6,8

Stati d'animo			note
buio	prima	agitato	il riflesso sullo schermo rende difficile concentrarsi sulle immagini troppa luce
artificiale	dopo	confuso	
	prima	tranquillo	
art+naturale	dopo	distratto	
	prima	affaticato	
naturale	dopo	stanco	
	prima	tranquillo	
	dopo	tranquillo	

Figura 15. Esempi di questionario sullo stato psicofisico dei soggetti prima e dopo le prove. I soggetti erano liberi di scrivere note.

Comunque, al fine di poter disporre d'informazioni oggettive elaborabili sullo stato d'animo, è stato utilizzato il SELF ASSESSMENT MANIKIN (SAM, precedentemente descritto) su un soggetto di riferimento (soggetto zero) prima dello svolgimento del protocollo di misurazione; tale test è stato somministrato in condizione di sola luce artificiale, e di contemporanea presenza di luce naturale e artificiale. Dai grafici riferiti al soggetto zero, si notano alcuni mutamenti a seconda della condizione ambientale:

- nella condizione di luce artificiale, l'attivazione assume i valori minori (Fig. 16);
- nella condizione di luce naturale schermata la valenza risulta minima e l'attivazione massima (Fig. 17).

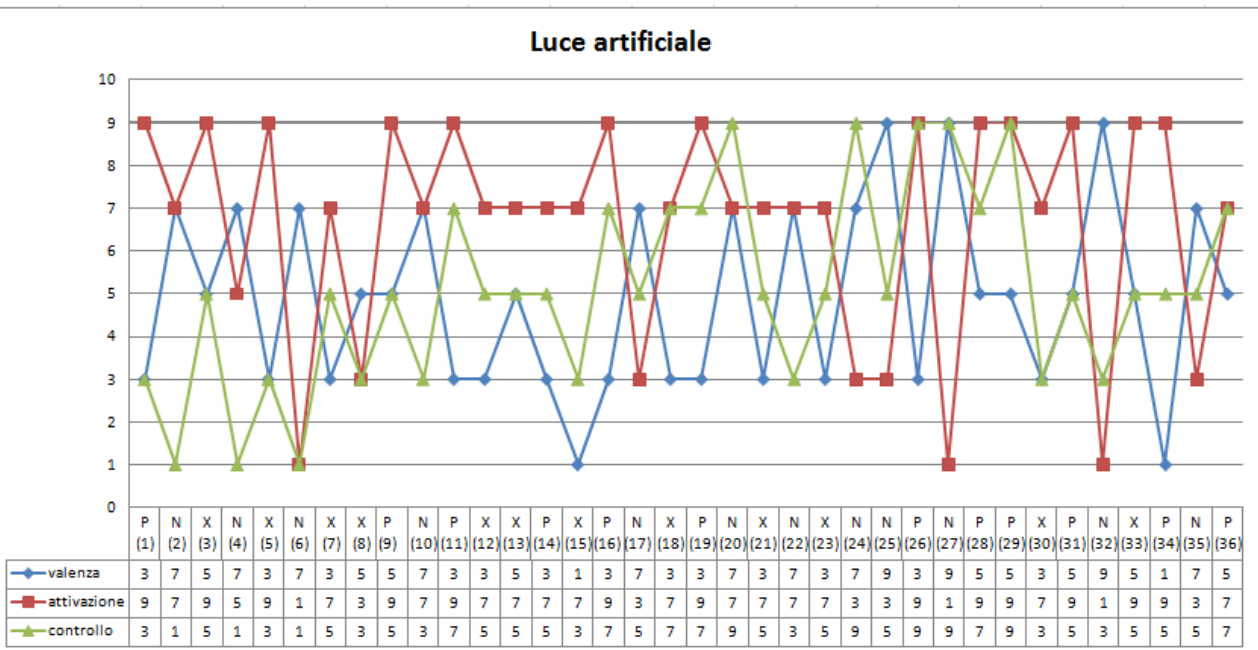


Figura 16. Elaborazione questionario SAM: la condizione di luce artificiale presenta i punteggi più bassi per l'attivazione.

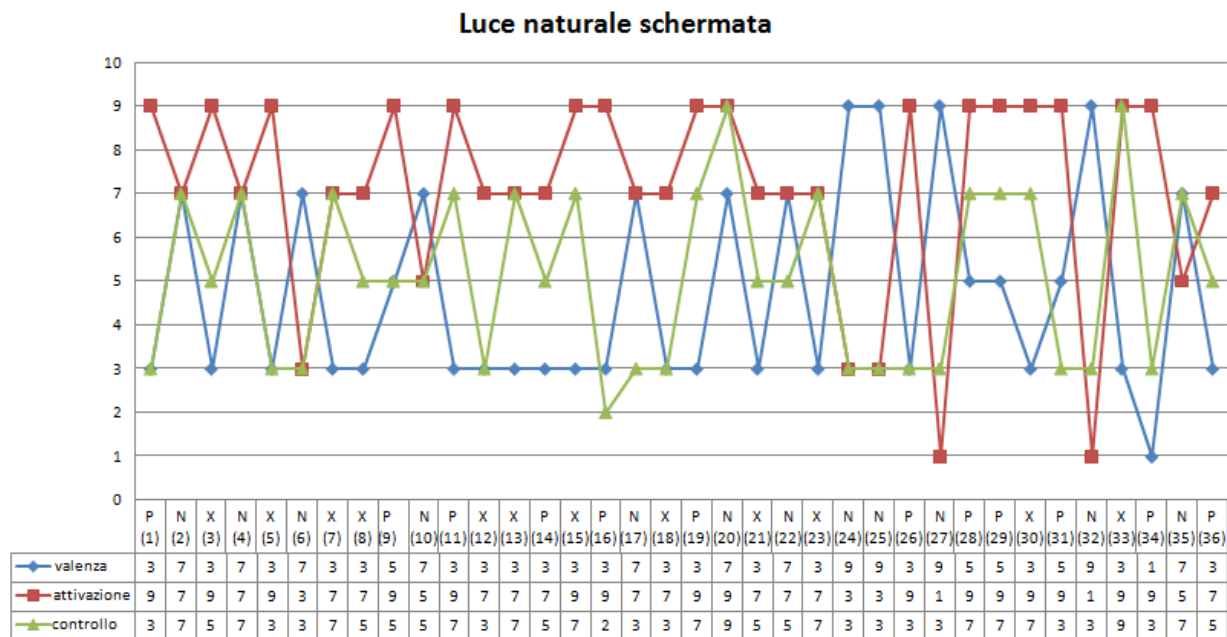


Figura 17. Elaborazione questionario SAM per luce naturale schermata da lamelle frangisole: la condizione evidenzia i punteggi minimi per la valenza e i punteggi massimi per l'attivazione.

Analisi dati

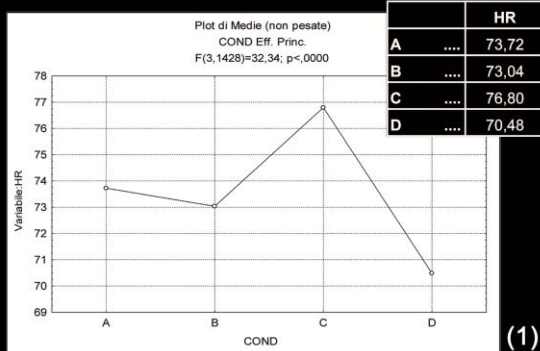
I file registrati dal programma possono essere salvati come files .txt da aprire con un elaboratore di testi. Inserendo il pattern temporale di assenza di stimolo e stimolo, si può procedere al calcolo della media di GSR tonico e fasico e HR in ognuno dei periodi di attività, per un totale di 216 valori per ogni soggetto per ogni test. I valori calcolati si analizzano sulla base della valenza (negativa, neutra o positiva) dello stimolo. Facendo questa operazione per ciascuna delle 4 condizioni ambientali di un soggetto, si può confrontare il suo comportamento in ciascuna di esse.

I grafici (Fig. 18) mostrano l'elaborazione dei dati raccolti per i parametri HR (battito cardiaco) e GSR fasico. Il grafico (1) evidenzia come le reazioni variano in maniera consistente al variare della condizione ambientale. I grafici (3), (5), (7) mostrano che la condizione ambientale è molto più influente della tipologia dello stimolo (positivo, negativo o neutro) sulla reazione psicofisiologica dei soggetti: le differenze per tipologia di slide, infatti, non si scostano molto dalla media fatta su tutte le slide. Ci si aspetterebbe che a un aumento del battito cardiaco corrispondesse una diminuzione della resistenza cutanea, ma ciò avviene solo nelle condizioni A e B: nella condizione C si ha un'alta frequenza cardiaca ed un'alta resistenza galvanica cutanea. Nei grafici (2), (4), (6) si nota infine che nelle condizioni B e C ci sono variazioni significative legate al tipo di slide.

Nei progetti di ricerca semi-sperimentali, realizzati tramite esperimenti seriali, l'analisi della varianza è un importante strumento per capire le differenze statistiche medie tra due popolazioni di dati differenti, comunque queste popolazioni siano individuate e discriminate dal ricercatore. Quando siano riscontrabili delle differenze medie fra le due popolazioni, è possibile sviluppare ragionamenti comparativi più precisi fra i due gruppi. Le differenze statistiche sono stimate con un'analisi ANOVA, in cui la comparazione fra le misure della media e della varianza (od errore casuale) riscontrate nelle due popolazioni consente di stabilire se la differenza fra le due popolazioni di dati è significativa o meno.

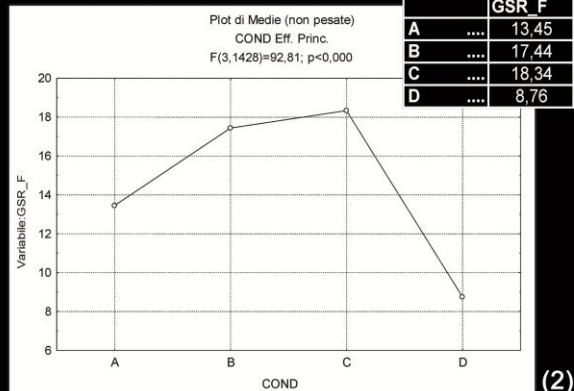
In Tab. 3 sono riportati i valori della varianza relativi all'HR. Se la varianza è molto piccola ($<0,05$) il risultato è significativo, mentre se è prossima a 1 il risultato è molto scarso. In arancione sono evidenziati i dati significativi, in azzurro chiaro quelli non significativi. Le differenze trovate sono quindi statisticamente significative.

HR
effetto generale condizione



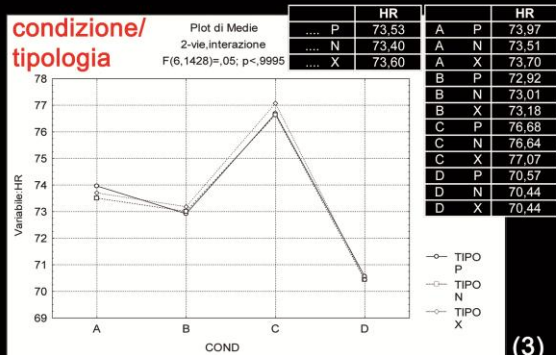
(1)

GSR fasico
effetto generale condizione



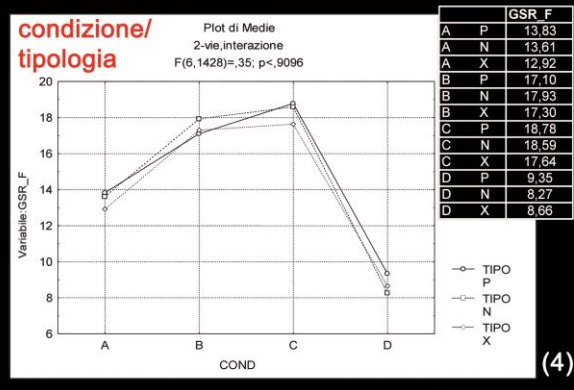
(2)

**condizione/
tipologia**



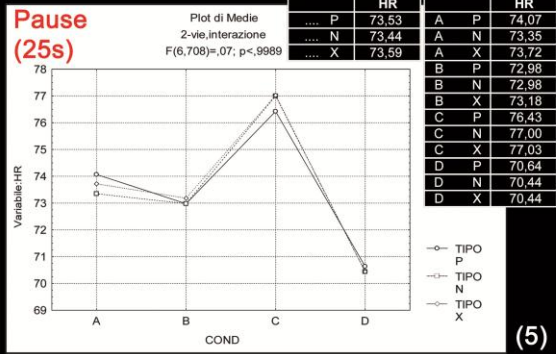
(3)

**condizione/
tipologia**



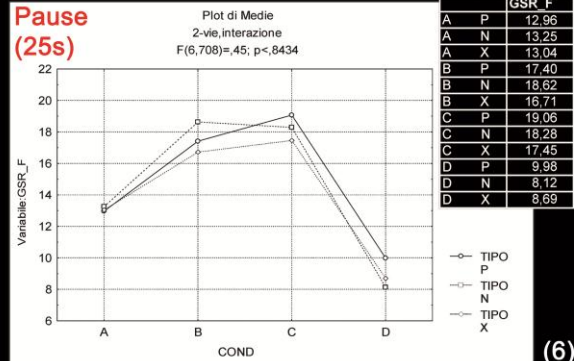
(4)

controllo su tipologia slide (non significatività)



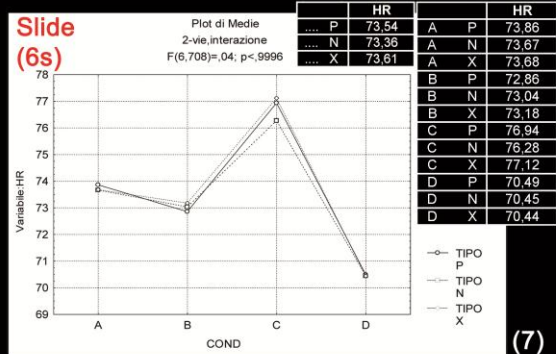
(5)

**Pause
(25s)**



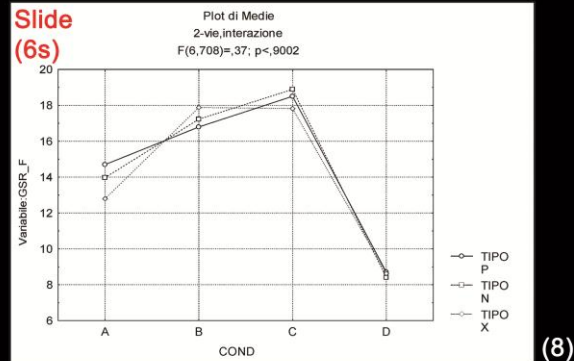
(6)

**Slide
(6s)**



(7)

**Slide
(6s)**



(8)

Figura 18. Esempi di elaborazione di dati e risultati.

Tabella 3. Valori di varianza relativi ad HR

	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}
	73,86	73,66	73,68	72,86	73,03	73,18	76,93	76,27	77,11	70,49	70,45	70,44
A {1} P		0,90	0,91	0,53	0,60	0,67	0,05	0,13	0,04	0,03	0,03	0,03
A {2} N	0,90		0,99	0,61	0,69	0,76	0,04	0,10	0,03	0,05	0,04	0,04
A {3} X	0,91	0,99		0,60	0,68	0,75	0,04	0,10	0,03	0,04	0,04	0,04
B {4} P	0,53	0,61	0,60		0,91	0,84	0,01	0,03	0,01	0,14	0,13	0,13
B {5} N	0,60	0,69	0,68	0,91		0,93	0,01	0,04	0,01	0,11	0,10	0,10
B {6} X	0,67	0,76	0,75	0,84	0,93		0,02	0,05	0,01	0,09	0,09	0,09
C {7} P	0,05	0,04	0,04	0,01	0,01	0,02		0,68	0,91	0,00	0,00	0,00
C {8} N	0,13	0,10	0,10	0,03	0,04	0,05	0,68		0,60	0,00	0,00	0,00
C {9} X	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,91	0,60		0,00	0,00	0,00
D {10} P	0,03	0,05	0,04	0,14	0,11	0,09	0,00	0,00	0,00		0,98	0,97
D {11} N	0,03	0,04	0,04	0,13	0,10	0,09	0,00	0,00	0,00	0,98		1,00
D {12} X	0,03	0,04	0,04	0,13	0,10	0,09	0,00	0,00	0,00	0,97	1,00	

Oltre alla risposta generale dei soggetti nelle quattro condizioni ambientali, si ritiene opportuno per quanto possibile fornire dati relativi al comportamento dei soggetti riguardo ad alcune slide specifiche, divise per tipologia (negativo, neutro, positivo) (Fig. 19-21). La diversità nelle risposte alle cosiddette “immagini negative” può essere legata al fatto che sotto questa denominazione vengono raccolte immagini che suscitano emozioni molto diverse: pietà, impressione, disgusto, paura. Le immagini presentate sono state “standardizzate”: ciò vuol dire che, sottoposte al giudizio di gran numero di persone, sono risultate avere valenza positiva, negativa, neutra.

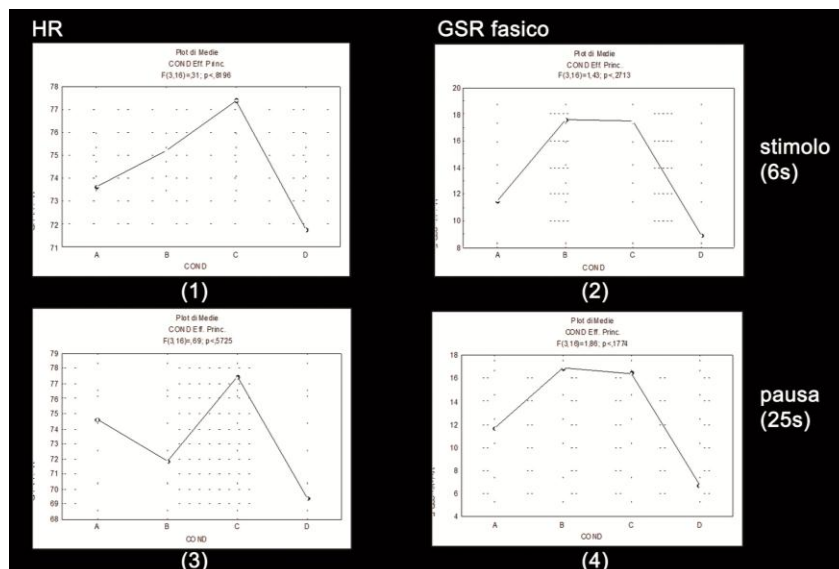


Figura 19. Valori di HR (colonna di sinistra) e GSR fasico (a destra) per il periodo di stimolo (in alto) e di pausa successiva per immagine a valenza negativa.

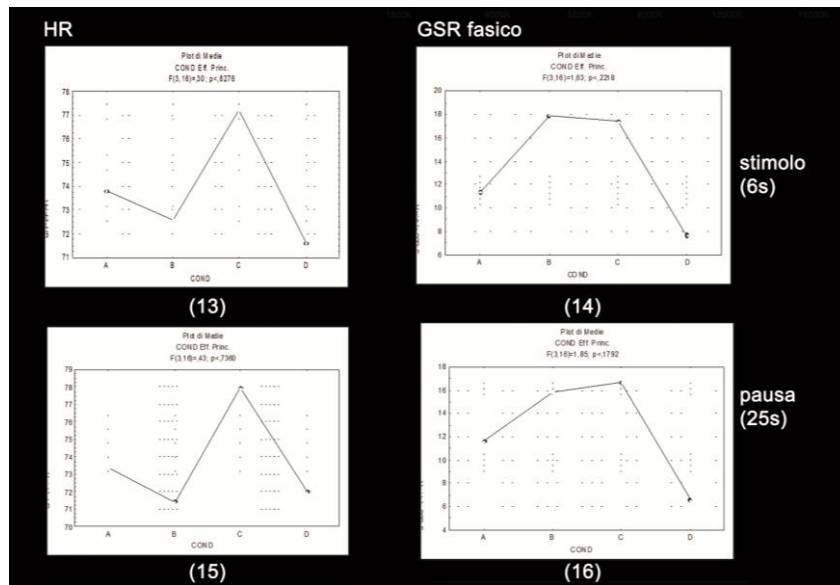


Figura 20. Valori di HR (colonna di sinistra) e GSR fasico (a destra) per il periodo di stimolo (in alto) e di pausa successiva per l'immagine a valenza neutra a sinistra.

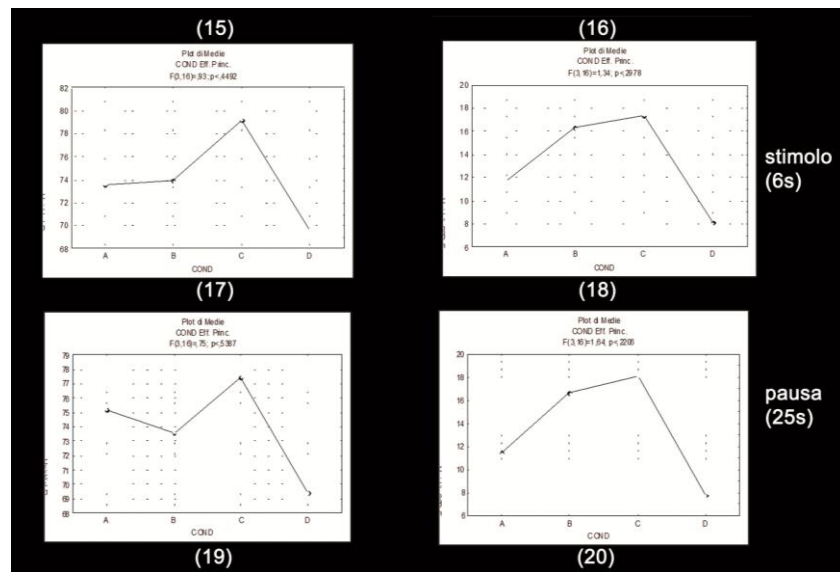


Figura 21. Valori di HR (colonna di sinistra) e GSR fasico (a destra) per il periodo di stimolo (in alto) e di pausa successiva per l'immagine a valenza positiva a sinistra.

Confrontando le risposte per singola slide con l'andamento complessivo delle reazioni psicofisiologiche nelle diverse condizioni, si nota che queste sono decisamente sovrapponibili. Questa è un'ulteriore dimostrazione del fatto che lo stato psicofisiologico è influenzato in maniera molto più consistente dalla condizione ambientale che non dalla tipologia (positiva, neutra o negativa) dello stimolo emozionale a cui i soggetti sono esposti.

Limiti del protocollo

Il test psicofisiologico somministrato non è ancora in questa fase stato randomizzato, per cui i soggetti già alla seconda somministrazione conoscevano le immagini, nonostante la sequenza di presentazione potesse essere alterata. Per questo alle successive ripetizioni del test è sicuramente diminuita l'attenzione. Altri fattori di disturbo sono costituiti dai rumori provenienti dal corridoio adiacente il laboratorio: questi rumori

hanno alle volte provocato reazioni nei soggetti durante le fasi di registrazione. Infine l'elevata temperatura registrata in alcune giornate ha causato un forte aumento della sudorazione dei soggetti, esasperata dall'assenza di ventilazione nella cabina, e quindi ha influito in maniera sostanziale sulla registrazione della resistenza elettrica cutanea.

Conclusioni

Lo studio è orientato a investigare le relazioni tra reazioni psicofisiologiche umane e differenti condizioni di illuminazione. Il risultato atteso prevede che ad un maggiore livello di illuminamento, precedentemente collegato ad un maggiore livello di allerta, si associ una risposta emotiva maggiore. In particolare, la finalità è quella di evidenziare sperimentalmente l'influenza della luce sulle reazioni umane. Anche se i risultati di questi test non possono essere considerati statisticamente significativi, perché le variazioni dei parametri non sono macroscopiche, i dati indicano comunque in modo deciso una correlazione tra condizioni di illuminazione e reazione degli esseri umani, e motivano quindi allo svolgimento di altri test che integreranno i risultati di questa esperienza. I risultati preliminari suggeriscono che esiste una relazione tra i livelli di illuminamento e le risposte emotive. Le ragioni di questa differenza non sono chiare: è necessaria ulteriore ricerca per comprendere il ruolo giocato dal sistema circadiano, gli effetti della luce sull'allerta e gli altri fattori simultanei e collaterali in questo fenomeno.

Comprendere l'influenza dell'illuminazione ambientale sulle reazioni umane è cruciale perché può condurre verso nuove regole per il "lighting design" a seconda delle caratteristiche e delle funzioni di un ambiente costruito. Finora, ciò che è stato scoperto ha portato alla comprensione dell'importanza della luce ambientale per le reazioni fisiologiche sulle persone rispetto a differenti tipi d'immagine: i risultati di questo test devono essere intesi semplicemente come un punto di partenza per ulteriori sperimentazioni, in particolare su sorgenti luminose con differente spettro:

- sorgenti LED bianche di differenti CCT;
- sorgenti LED monocromatiche;
- altre sorgenti luminose (lampade fluorescenti, lampade alogene...), caratterizzate da differenti spettri;
- luce naturale, modificando una delle pareti della cabina.

Si ritiene importante approfondire la conoscenza del ruolo della direzione della luce perché, come precedentemente menzionato, la densità di fotoricettori circadiani è piuttosto differente tra la retina superiore e quella inferiore. E' inoltre opportuno studiare il ruolo della distribuzione spettrale di diverse sorgenti luminose perché il fenomeno di opposizione spettrale non è stato ancora completamente compreso e tradotto in una buona pratica di illuminazione.

Riferimenti bibliografici

- [1] ENEA, Report RdS/2011/197
- [2] Commission International de l'Eclairage, "Light as a true visual quantity: principles of measurement" Paris: Commission Internationale de l'Eclairage, 1978
- [3] Commission Internationale de l'Eclairage: CIE Report 158:2004 "Ocular Lighting Effects on Light Exposure and Human Physiology and Behaviour" Vienna, CIE
- [4] Veitch JA. Principles of healthy lighting: highlights of IE TC6-11's forthcoming report, final report, The 5th international LRO lighting research symposium e light and human health (report no. 1009370) November 3e5, 2002. Palo Alto,CA: Electric Power Research Institute; 2004.
- [5] Veitch JA. Lighting for well-being: a revolution in lighting? Proceedings of the 2nd CIE expert symposium on lighting and health, Ottawa, Ontario; Sept. 7-8, 2006. p. 56e61.
- [6] J. A. Veitch, "Healthful Lighting: What We Need to Know, NCQLP Luncheon, LightFair May 2008
- [7] Rea MS, editor. IESNA Lighting handbook: reference and application, 9th ed. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000
- [8] M. Figueiro, "Research MATTERS", www.iesna.org
- [9] J. Waterhouse, D. Minors, S. Folkard, D. Owens, G. Atkinson, I. Macdonald, T. Reilly, N. Sytnik, P. Tucker, (1998) *Light of domestic intensity produces phase shifts of the circadian oscillator in humans*, *Neuroscience Letters*, 245: 97-100
- [10] Brainard GC, Hanifin JP, Rollag MD, Greeson J, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Sanford B.(2001) *Human melatonin regulation is not mediated by the three cone photopic visual system*. *J Clin Endocrinol Metab* 86(1): 433-436
- [11] Rea MS, Bullough JD, Figueiro MG. (2001) *Human melatonin suppression by light: A case for scotopic efficiency*. *Neurosci Lett* 299(1-2): 45-48.
- [12] Provencio I, Rodriguez IR, Jiang G, Hayes WP, Moreira EF, Rollag M.D. Novel human opsin in the inner retina. *Journal of Neural Science* 2000; 20: 600-605
- [13] Hattar S, Liao HW, Takao M, DM, Yau KW. 2002. Melanopsin containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 295(5557): 1065-1070.
- [14] G. Glickman, J.P. Hanifin, M.D. Rollag, J.Wang, H. Cooper, G.C. Brainard, (2003), *Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans*, *J. Biol. Rhythms* 18 71–79
- [15] Berson DM, Dunn FA, Takao M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295(5557): 1070-1073
- [16] Hattar S, Lucas RJ, Mrosovsky N, Thompson S, Douglas RH, Hankins MW, Lem J, Biel M, Hofmann F, Foster RG, and Yau K-W., (2003), *Melanopsin and rod-cone photoreceptive systems account for all major accessory visual functions in mice*. *Nature* 424:76-81
- [17] Newman, L. A., Walker, M. T., Brown, R. L., Cronin, T. W. and Robinson, P. R., 2003. Melanopsin forms a functional short-wavelength photopigment. *Biochemistry*, 12734-12738, 2003
- [18] Gooley , J. J., Lu, J., Fischer, D. and Saper, C. B., 2003. A broad role for melanopsin in nonvisual photoreception. *Journal of Neuroscience*, 2003.
- [19] N. F. Ruby, T. J. Brennan, X. Xie, V. Cao, P. Franken, H. Craig Heller, B. F. O'Hara, (2002) "Role of melanopsin in circadian responses to light", *Science*. 298, 2211-2213
- [20] Hebert, M., Martin, S. K., Lee, C. and Eastman, C. I., 2002. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *Journal of Pineal Research*, 198-203, 2002.
- [21] M. Hebert, S. K. Martin, C. Lee , C. I. Eastman, "The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans" *J Pineal Res* 2002;33:198–203
- [22] Lockley, S. W., Brainard, G. C. and Czeisler, C. A., 2003. High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2003.
- [23] T. A. Lasko, D. F. Kripke , J. A. Elliot, "Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields" *J. Biol. Rhythms* 1999; 14: 122–125
- [24] M. Hébert, S. K. Martin, C. I. Eastman, (1999) *Nocturnal melatonin secretion is not suppressed by light exposure behind the knee in humans*, *Neuroscience Letters*, 274: 127-130
- [25] Eastman CI, Martin SK, Hebert M. 2000. Failure of extraocular light to facilitate circadian rhythm reentrainment in humans. *Chronobiol Int* 17(6): 807-826
- [26] Lockley S, Skene D, Thapan K, English J, Ribeiro D, Haimov I, Hampton S, Middleton B, von Schantz M, Arendt J. 1998. Extraocular light exposure does not suppress plasma melatonin in humans. *J Clin Endocrinol Metab* 83(9): 3369-3372.

- [27] D. Blask, L. Sauer, R. Dauchy, E. Ruhoff, H. Kopff, (1999), *Melatonin inhibition of cancer growth in vivo involves suppression of tumor fatty acid metabolism via melatonin receptor-mediated signal transduction events*. *Cancer Res* 59:4793-4701
- [28] Dauchy RT, Blask DE, Sauer LA, Brainard GC, Krause JA. 1999. Dim light during darkness stimulates tumor progression by enhancing tumor fatty acid uptake and metabolism. *Cancer Lett* 144:131-136
- [29] Brainard, G. C., Kavet, R. and Kheifets, L. I., 1999. The relationship between electromagnetic field and light exposures to melatonin and breast cancer risk: A review of the relevant literature. *Journal of Pineal Research*, 1999.
- [30] M. Moser, K. Schaumberger, E. Schernhammer, R. G. Stevens, "Cancer and rhythm", *Cancer Causes Control* (17), 2006, pp. 483-487
- [31] Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD. 2002. Circadian photobiology: An emerging framework for lighting practice and research. *Light Res Technol* 34(3): 177-190.
- [32] Badia P, Myers B, Boecker M, Culpepper, J. 1991. Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and Behavior. *Physiol Behav* 50(3): 583-588
- [33] M. S. Rea, J. D. Bullough, M. G. Figueiro (2001) *Human melatonin suppression by light: a case for scotopic efficiency*, *Neuroscience Letters*, 299: 45-48
- [34] McIntyre IM, Norman TR, Burrows GD, Armstrong SM. Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man. *Life Sci.* 1989; 45: 327-32
- [35] I.M. McIntyre, T.R. Norman, G.D. Burrows, T.M. Armstrong, Human melatonin suppression by light is intensity dependent, *J. Pineal Res.* 6 (1989) 149-156.
- [36] Lewy AJ, Wehr TA, Goodwin FK, Newsome DA, Markey SP. 1980. Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science* 210(4475): 1267-1269
- [37] Kronauer RE, Forger DB, Jewett ME. 1999. *Quantifying human circadian pacemaker response to brief, extended and repeated light stimuli over the phototopic range*. *J Biol Rhythms* 14(6): 500-515.
- [38] M.E. Jewett, D.W. Rimmer, J.F. Duffy, E.B. Klerman, R.E. Kronauer, C.A. Czeisler, Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients, *Am. J. Physiol.* 273 (1997) R1800-R1809
- [39] Kawaguchi, C., Tanaka, K., Isojima, Y., Shintani, N., Hashimoto, H., Baba, A., et al., 2003. Changes in light-induced phase shift of circadian rhythm in mice lacking PACAP. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2003.
- [40] R. Hut, *Light stimulation of the circadian system: temporal variation effects*. (2002) Abstract 062, Society for research and biological rhythms
- [41] V. L. Revell, J. Arendt, M. Terman, D. J. Skene, (2005), *Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths*. *Science*
- [42] M.G. Figueiro, J.D. Bullough, R.H. Parsons, M.S. Rea, Preliminary evidence for a change in spectral sensitivity of the circadian system at night, *Circadian Rhythms* 3 (2005) 14
- [43] S. Pauley, "Lighting for the Human Circadian Clock: Recent Research Indicates That Lighting Has Become a Public Health Issue", *Medical Hypotheses*, 63 (4), 2004, pp. 588-596
- [44] Eastman CI, Martin SK. How to use light and dark to produce circadian adaptation to night shift work. *Annals of Medicine* 1999;31:87e98.
- [45] Knez I, Kers C. Effects of indoor lighting, gender, and age on mood and cognitive performance. *Environment and Behavior* 2000;32(6):817e31.
- [46] Burgess HJ, Sharkey KM, Eastman CI. Bright light, dark and melatonin can promote circadian adaptation in night shift workers. *Sleep Medicine Review* 2002;6(5):407e20.
- [47] Van Bommel WJM, van der Beld JG. Lighting for work: a review of visual and biological effects. *Lighting Research and Technology* 2004;36:255e69.
- [48] A. Sasseville, N. Paquet, J. Sévigny, M. Hébert, (2006) *Blue blocker glasses impede the capacity of bright light to suppress melatonin production*, *Journal of Pineal Research*, 41: 73-78
- [49] A. J. Lewy, H. A. Kern, N. E. Rosenthal, T. A. Wehr "Bright artificial light treatment of a manic depressive patient with seasonal mood cycle", *Am. J. Psychiat.* 1982; 139: 1496-98
- [50] Koorengevel KM, Gordijn MC, Beersma DG, Meesters Y, den Boer JA, van der Hoofdaken RH, Daan S. 2001. Extraocular light therapy in winter depression: A double-blind placebo-controlled study. *Biol Psychiatry* 50(9): 691-698
- [51] M. G. Figueiro, M. S. Rea, J. D. Bullough, (2006) *Circadian effectiveness of two polychromatic lights in suppressing human nocturnal melatonin*, *Neuroscience Letters*, 406: 293-297
- [52] Daurat A, Aguirre A, Foret J, Gonnet P, Keromes A, Benoit O. Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-h constant routine. *Physiology and Behavior* 1993;53:929e36.
- [53] Monk TH, Buysse DJ, Reynolds CF, Berga SL, Jarrett DB, Kupfer DJ. 1997. Circadian rhythms in human performance and mood under constant conditions. *J Sleep Res* 6(1): 9-18

- [54] Cajochen C., Munch M., Kriebel S., Krauchi K., Steiner R., Oelhafen P., Orgu I S., and Anna Wirz-Justice, High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light, *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 90(3):1311–1316, 2005
- [55] P.T. Stone, “The effects of environmental illumination on melatonin, bodily rhythms and mood states: a review”, *Lighting Res. Technol.* 1999; 31: 71–79, P. R. Boyce, “The impact of light in buildings on human health, *Indoor Built Environ*, 2010 ;19;1:8–20
- [56] R. A. Baron, e M. S. Rea, “Lighting to Soothe the Mood”, *Lighting Design and Application*, 12, 1991, pp. 30-32
- [57] C. L. B. McCloughan, R. A. Aspinall, e R. S. Webbs, “The impact of Lighting on Mood”, *Lighting Research and Technology*, 31 (3), 1999, pp. 81-88
- [58] Partonen T, Lönnqvist J. Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people. *Journal of Affective Disorders* 2000;57(1e3):55e61
- [59] Rea MS, Bierman A, Figueiro MG, Bullough JD. A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health. *Journal of Circadian Rhythms* 2008;6(7):1e7.
- [60] M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman, C. R. Fay, M. S. Rea, “On light as an alerting stimulus at night”, *Acta Neurobiol Exp (wars)*, 67 (2), 2007, pp. 171-178
- [61] M. G. Figueiro, e M. S. Rea, “Preliminary Evidence That Both Red and Blue Lights Increase Nocturnal Alertness”, *BMC Neuroscience*, 10 (105), 2009
- [62] Figueiro M, Bierman A, Plitnick B, Rea M. Preliminary Evidence that both blue and red light can induce alertness at night. *BMC Neuroscience* 2009;10:105
- [63] Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *Journal of Neuroscience* 2001;21:6405-12
- [64] Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A. A model of phototransduction by human circadian system”, *Brain Res. Rev.* 50 (2):213-28, 2005.
- [65] M. G. Figueiro, J. D. Bullough, H. R. Parsons, M. S. Rea, “Preliminary Evidence for Spectral Opponency in the Suppression of Melatonin by Light in Humans”, *NeuroReport* 15 (2), 2004, pp. 313-316
- [66] Kozakov R, Franke S, Schöpp H. Approach to an effective biological spectrum of a light source. *Leukos* 2008;4(4):255e63.
- [67] Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology* 2001;535:261-7
- [68] L. Bellia, F. Bisegna, G. Spada, *Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions*, Buildign and Environment, 2011
- [69] Boyce PR. Lemmings, light, and health. *Leukos* 2006;2(3):175-84.
- [70] M. Bradley, P. Lang, (1994) *Measuring emotion: the Self-Assessment Manikin and the Semantic Differential*, *J Behav Ther Exp Psychiatry*. 25 (1), 49-59
- [71] CIE (2010). Commission Internationale de L’Éclairage. Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance, No 191:2010

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività:

Dr. M. Barbalace: architetto e dottorando al terzo anno in Fisica Tecnica, si occupa dello studio delle interrelazioni tra le grandezze che caratterizzano la luce e alcuni parametri relativi al benessere psicofisiologico degli esseri umani, con particolare riferimento alla stimolazione circadiana indotta dall'ambiente visivo. E' impegnata sia in attività di laboratorio presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica DIAEE dell'università La Sapienza di Roma, dove si occupa di caratterizzazione spettrale di sorgenti tradizionali e innovative in ambiente controllato, sia sul campo, in campagne di misura relative a illuminazione stradale LED.

Prof. F. Gugliermetti: Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso SAPIENZA Università di Roma, Facoltà di Ingegneria, ha pubblicato più di duecento lavori scientifici in diversi settori di ricerca tipici della Fisica Tecnica (scambio termico, termotecnica, simulazione numerica della termofisica degli edifici, illuminazione naturale e artificiale, acustica, sostenibilità ambientale). Ha sviluppato buona parte della sua ricerca di base e applicata all'interno di gruppi di lavoro e organizzazioni nazionali e internazionali di cui è stato responsabile scientifico.

Prof. F. Lucchese: Ricercatore presso il Dipartimento di Psicologia Dinamica e Clinica - Sapienza Università di Roma. Docente di Metodologia della Ricerca, Psicometria e E-Learning presso la Facoltà di Medicina e Psicologia – Sapienza Università di Roma. Responsabile di progetti di ricerca sull'uso di tecniche psicofisiologiche e psicometriche per la valutazione del comportamento.

Prof. F. 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.).