



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro

L. Bellia, A. Pedace, G. Barbato



CARATTERIZZAZIONE DELL'ILLUMINAZIONE NATURALE NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

L. Bellia, A. Pedace (Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II)
G. Barbato (Dipartimento di Psicologia, Seconda Università degli Studi di Napoli)

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

Progetto: C.1. Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

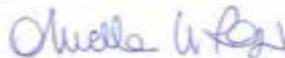
Obiettivo: c. Sviluppo dei prodotti efficienti per l'illuminazione – c.1 Progettazione e sperimentazione di installazioni a LED

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro"

Responsabile scientifico ENEA: Ornella Li Rosi



Responsabile scientifico Università degli Studi di Napoli Federico II: prof. Laura Bellia



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 EFFETTI NON VISIVI.....	6
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	8
3.1 METODOLOGIA.....	8
3.2 MODELLO DI FOTOTRASDUZIONE CIRCADIANA.....	10
4 RISULTATI.....	11
4.1 UFFICIO 1.....	11
4.2 UFFICIO 2.....	13
4.3 UFFICIO 3.....	15
5 CONCLUSIONI.....	17
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	18
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	20

Sommario

Il presente report si inserisce nell'ambito delle ricerche svolte a livello internazionale sul tema degli effetti della luce sugli esseri umani. È stato infatti dimostrato da numerose ricerche che la luce non è soltanto responsabile della visione ma è anche in grado di indurre altre risposte nel nostro organismo che prendono il nome di risposte non visive. Tra di esse rientrano gli effetti sull'umore, sulle performance e sul sistema circadiano: quest'ultimo controlla una serie di processi biologici all'interno del nostro organismo. Dato lo stretto legame tra gli effetti non visivi della luce e la salute ed il benessere delle persone è estremamente importante valutare tali effetti, soprattutto in quegli ambienti in cui gli individui trascorrono gran parte del tempo, come i luoghi di lavoro, le scuole, gli ospedali...

La risposta del sistema circadiano non è istantanea e dipende dall'ora del giorno, dalla durata e dall'intensità dello stimolo e dalla luce ricevuta durante le ore precedenti. È stato inoltre dimostrato come sulla retina siano presenti dei fotorecettori che a loro volta inviano segnali all'organismo per la regolazione delle diverse attività "circadiane", la cui sensibilità spettrale è differente da quella che produce la visione. Data la diversa sensibilità rispetto alla visione, è necessario analizzare le caratteristiche spettrali delle radiazioni che arrivano agli occhi degli occupanti di un ambiente per calcolare la "luce circadiana" e gli effetti che questa può produrre sugli individui, pertanto è necessario misurare l'irradianza spettrale a livello degli occhi. Questo approccio, che rientra in una più ampia visione della qualità dell'illuminazione e dell'efficienza energetica, modifica radicalmente il classico schema progettuale illuminotecnico secondo il quale, anche in accordo con la normativa per l'illuminazione dei luoghi di lavoro, devono essere controllati gli illuminamenti e le uniformità sui compiti visivi e sulle diverse superfici che vengono osservate. Recentemente sono stati proposti diversi modelli per la valutazione dello stimolo circadiano. Tuttavia, dato lo stato attuale della conoscenza delle risposte non visive, non è possibile definire delle linee guida o dei criteri progettuali.

La ricerca qui illustrata ha come oggetto la valutazione degli stimoli circadiani e della qualità della luce incidente agli occhi in uffici con diversi orientamenti, in cui è presente la luce naturale. Le sperimentazioni sono state condotte a Napoli in diverse stagioni (estate, autunno, inverno e primavera) in tre uffici esposti a Sud, Est ed Ovest. Si è applicato lo stesso protocollo di misura anche nella sede ENEA di Ispra in due uffici esposti a Nord e a Sud. In questo report viene descritta la metodologia utilizzata e sono riportati i risultati ottenuti per Napoli. L'obiettivo finale è quello di effettuare dei confronti sulla qualità della luce in uffici con differenti orientamenti ed al variare delle stagioni nella località di Napoli, valutando le conseguenti stimolazioni circadiane. Un ulteriore obiettivo è quello di predisporre un confronto tra località a diverse latitudini e con differenti climi luminosi, per individuare possibili analogie e diversità che in futuro potranno risultare utili nella pratica progettuale.

1 Introduzione

Negli ultimi anni l'attenzione nei confronti della luce, sia naturale che artificiale, è notevolmente cresciuta soprattutto per la necessità di ridurre i consumi energetici [1]. Una corretta progettazione del sistema di illuminazione di un edificio, dell'accesso della luce naturale e dell'integrazione tra luce naturale ed artificiale possono infatti determinare significativi risparmi energetici.

Tuttavia vi sono altre motivazioni, ancora poco conosciute, che dovrebbero spingere il mondo della progettazione verso una maggiore attenzione allo studio della luce già nelle prime fasi di progetto [2,3,4]. Numerose ricerche hanno infatti dimostrato che la luce non soltanto ci permette di vedere ma è anche capace di influenzare e determinare una serie di risposte da parte del nostro organismo, denominate effetti non visivi della luce o risposte non visive proprio per distinguerle dagli effetti legati alla visione. Ad esempio, la luce è in grado di accelerare il battito cardiaco ed innalzare la temperatura corporea, sopprimere la produzione di melatonina (cioè ridurre i suoi livelli), aumentare la vigilanza [5,6,7,8].

Inoltre tra i più importanti effetti non visivi della luce vi è la capacità di regolare il sistema circadiano, quest'ultimo è una sorta di orologio collocato nel nostro cervello che regola una serie di processi biologici, denominati per l'appunto ritmi circadiani, che si ripetono con un ciclo di circa 24 ore [9,10,11]. Tra luce e sistema circadiano vi è una stretta relazione, infatti per mantenere questo ciclo di 24 ore il sistema circadiano ha bisogno di sincronizzarsi ogni giorno attraverso un'adeguata esposizione alla luce [12]. Inoltre, questo meccanismo si è sviluppato nel corso di millenni e risulta particolarmente adattato alla luce naturale in quanto, fino all'introduzione della luce elettrica circa un secolo fa, essa era la principale sorgente luminosa. L'impatto di uno stimolo luminoso sui ritmi circadiani dipende da una serie di fattori, quali ad esempio la sua intensità e distribuzione spettrale, la durata e anche il momento in cui avviene l'esposizione alla luce [13]. Mantenere il sistema circadiano sincronizzato è estremamente importante per la nostra salute ed il benessere [14,15]; oggi queste alterazioni dei ritmi circadiani sono molto più frequenti rispetto al passato perché le persone trascorrono la gran parte della loro giornata in luoghi chiusi in cui spesso non vi è un apporto di luce naturale sufficiente a garantirne la sincronizzazione. In aggiunta, con l'avvento della luce elettrica siamo esposti alla luce anche in orari in cui normalmente il nostro sistema circadiano non dovrebbe esserlo [16]. Inoltre, attualmente l'illuminazione viene progettata per garantire una buona visione ma non per aiutare la sincronizzazione dei ritmi circadiani ed evitare alterazioni degli stessi.

Risulta pertanto evidente l'importanza di introdurre la valutazione degli effetti della luce sul sistema circadiano nella pratica progettuale.

Negli ultimi anni, a partire dai profili spettrali di soppressione di melatonina negli esseri umani pubblicati da Brainard et al. [18] e Thapan et al. [19], sono stati sviluppati diversi modelli per valutare l'impatto circadiano di uno stimolo luminoso.

Alcuni di questi modelli si basano sulla proposta di una funzione di sensibilità circadiana, chiamata $C(\lambda)$, in analogia con le funzioni di sensibilità fotonica $V(\lambda)$ e scotopica $V'(\lambda)$ normalmente utilizzate in ambito illuminotecnico. Questo tipo di approccio è sicuramente molto semplice da applicare nella pratica progettuale, ed esempi di modelli di questo tipo sono quelli proposti da Gall et al. [20], Pechacek et al. [21], Gochenour et al. [22] e Wandachowics [23].

L'altro approccio si basa sull'assunto che la risposta umana alla luce non segue la legge dell'additività ed è quindi difficilmente rappresentabile con funzione di sensibilità come $V(\lambda)$; i modelli proposti da Rea et al. [24,25,26] e Lucas et al. [27] sono esempi di questo secondo approccio.

Allo stato attuale della conoscenza sul funzionamento del sistema circadiano nessuno di questi modelli può dirsi pienamente esplicativo degli effetti non visivi della luce; ad ogni modo, in attesa di ulteriori passi in avanti della ricerca in questo ambito, risulta necessario cominciare ad introdurre nella pratica progettuale l'analisi delle caratteristiche della luce a livello degli occhi degli occupanti di un ambiente.

Pertanto in questo report sono riportati i risultati di misurazioni di illuminamento, radianza spettrale ed irradianza spettrale effettuate durante la primavera, l'estate, l'autunno e l'inverno a livello degli occhi degli utenti di tre uffici, esposti a Sud, Est ed Ovest, localizzati a Napoli. Inoltre è stato applicato il modello di fototrasduzione circadiana proposto da Rea et al. [26] allo scopo di valutare gli effetti non visivi della luce.

Una possibile prosecuzione di questo progetto di ricerca può prevedere il confronto dei dati ottenuti per Napoli con quelli relativi a misurazioni effettuate con la stessa metodologia in uffici collocati ad Ispra.

Lo scopo finale è quello di evidenziare analogie e differenze tra i risultati ottenuti nelle diverse stagioni e per diversi orientamenti negli edifici localizzati a Napoli, e stabilire una metodologia di riferimento che possa costituire una base per ulteriori misurazioni in altri ambienti per arrivare alla realizzazione di un database e di linee guida per i progettisti.

2 Effetti non visivi

La luce solare e anche quella prodotta da fonti luminose artificiali hanno effetti importanti sulla omeostasi fisiologica e psichica, influenzando sia la percezione che il sistema circadiano [1].

Nella letteratura scientifica le caratteristiche della luce sono definite per ottenere una adeguata risposta visiva, ma la valutazione delle risposte non visive alle fonti luminose appare anch'essa necessaria per ottenere un adeguato benessere psicofisico.

La luce attraverso l'oscillazione esterna del fotoperiodo controlla infatti la sincronizzazione del nucleo soprachiasmatico, l'orologio biologico con un ritmo endogeno di 24 ore che regola il ritmo sonno veglia, il ritmo di secrezione degli ormoni e il ritmo della temperatura corporea [31,32].

Il nucleo soprachiasmatico è direttamente innervato dal tratto retino ipotalamico, una via che parte dalla retina e che è necessaria per l'entrainment dei ritmi circadiani al ritmo luce-buio esterno. Ogni giorno l'alternanza luce/buio sincronizza il sistema di oscillazione interno del nucleo soprachiasmatico ponendolo in fase con l'oscillazione esterna.

Il nucleo soprachiasmatico guida i ritmi circadiani dell'attività motoria, dell'introduzione di cibo, di acqua, del comportamento sessuale, della temperatura corporea, del sonno, e delle secrezioni di ACTH (Adreno-Cortico-Tropic-Hormone), prolattina, melatonina, e gonadotropine.

La secrezione di melatonina da parte della ghiandola pineale, che è appunto controllata dall'oscillazione del nucleo soprachiasmatico in risposta al buio, informa l'organismo del variare esterno della durata del periodo di luce-buio. Quest'informazione è inoltre assai importante negli animali, i cui sistemi biologici possono così riconoscere il variare delle stagioni (il fotoperiodo, la parte illuminata del giorno, è più breve in autunno-inverno, mentre si allunga in primavera-estate), e regolare funzioni come quelle legate alla riproduzione, all'ibernazione, e alla migrazione.

Il fatto che sia le specie animali superiori che gli organismi unicellulari utilizzino le variazioni nella durata di secrezione di melatonina come segnale per le variazioni stagionali della durata della notte sottolinea l'estrema antichità in termini evolutivi del meccanismo alla base della secrezione di melatonina.

La naturale alternanza tra veglia e sonno (luce e buio) è dunque il principale ritmo circadiano della specie umana, connotando inoltre l'alternanza tra periodi di attività e periodi di riposo, una organizzazione condivisa con tutte le specie viventi, che riflette il fatto che l'evoluzione ha definito orologi che permettono a tutti gli organismi viventi di seguire il ritmo del sole.

Il regolare pattern di 24 ore del ritmo sonno veglia viene mantenuto e sincronizzato dalla periodica esposizione giorno/notte (luce on/luce off) [33], ma il momento in cui avviene l'esposizione, l'intensità luminosa e la distribuzione spettrale della fonte luminosa possono indurre alterazioni del pattern delle 24 ore [34].

L'esposizione ad esempio alla luce artificiale di sera o nelle ore notturne può ritardare l'inizio del sonno, sopprimendo la secrezione della melatonina [35], pertanto uno dei marker più utilizzati per valutare l'impatto della luce sul sistema circadiano è la variazione dei livelli di melatonina nel sangue o nella saliva a seguito dell'esposizione ad uno stimolo luminoso. La melatonina è una sostanza secreta dalla ghiandola pineale, che si trova nel nostro cervello e che regola il ciclo sonno-veglia; infatti al crescere dei suoi livelli nel sangue si avverte la sonnolenza e l'esigenza di dormire. In Figura 1 è riportato un esempio dell'andamento dei livelli di questa sostanza nel plasma durante una giornata e si può notare come il picco venga raggiunto proprio durante la notte.

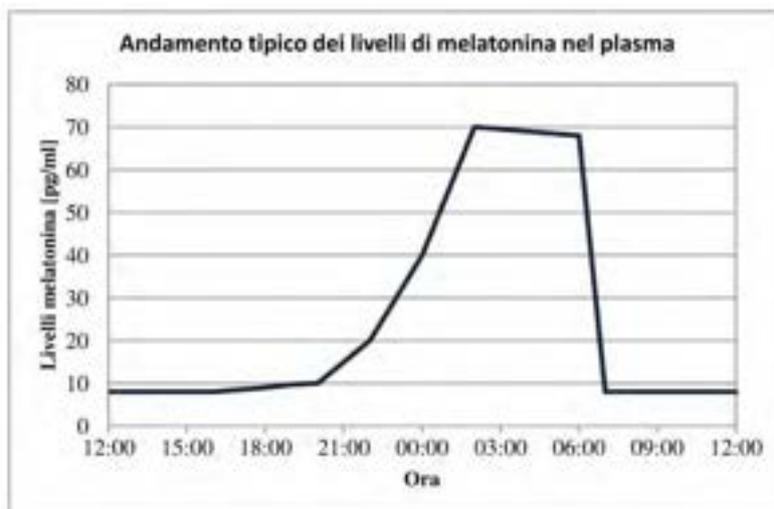


Figura 1. Andamento della melatonina nel plasma

Alcune ricerche hanno dimostrato come la luce con una prevalente emissione nelle piccole lunghezze d'onda (cioè con una tonalità di colore "fredda") sia in grado di sopprimere la melatonina, ovvero di ridurre i suoi livelli [17]. Questo, soprattutto se avviene nelle ore serali, può determinare uno spostamento in avanti del picco di melatonina con una conseguente alterazione del ciclo sonno-veglia e anche degli altri ritmi circadiani, in quanto si ritiene che l'andamento del ciclo sonno-veglia fornisca input anche per la regolazione degli altri cicli circadiani.

Alterazioni dei ritmi circadiani e della loro relazione di fase con i ritmi esterni possono produrre significative modificazioni dell'omeostasi psicofisiologica, contribuire alla patofisiologia di diverse patologie [36, 37], indurre disturbi del sonno, e svolgere un ruolo nella patofisiologia di disturbi psichiatrici.

La presenza di disturbi dei ritmi sonno veglia è un elemento che infatti fortemente caratterizza i disturbi psichiatrici, costituendone in alcuni casi sintomi prodromici o sintomi d'esordio. Alterazioni circadiane sono tipiche del disturbo depressivo, sintomi caratterizzanti la depressione sono infatti le difficoltà dell'addormentamento, la frammentazione del sonno, l'occorrenza di risveglio precoce, condizione nella quale il paziente lamenta di svegliarsi assai presto e di non riuscire più a riaddormentarsi. La sintomatologia depressiva è inoltre più intensa al mattino, mostrando una attenuazione nelle ore serali [38].

Nei pazienti con disturbi affettivi stagionali (seasonal affective disorder - SAD) è inoltre ipotizzata una alterazione della sensibilità dei sistemi circadiani alla luce, la durata del periodo notturno della secrezione della melatonina in questi pazienti è aumentata d'inverno rispetto all'estate. Sembrerebbe che coloro che soffrono di disturbo stagionale producano un segnale del cambio della stagione, un segnale che nei soggetti normali non è presente, probabilmente "oscurato" dalla luce artificiale. E' ipotizzabile che i pazienti SAD abbiano conservato una maggiore sensibilità alle variazioni naturali di fotoperiodo e che in questi soggetti la luce artificiale d'ambiente, che sopprime il segnale invernale nei soggetti normali, non è capace di intervenire sull'oscillatore circadiano, necessitando cioè di un segnale rinforzato come è quello ottenuto con la fototerapia [39].

Risulta dunque evidente che i sistemi fisiologici e psichici interagiscono con l'ambiente fisico luminoso esterno, che svolge un significativo ruolo di organizzatore e segna tempo; si dimostra pertanto necessaria la codifica di elementi che ne possano definire le caratteristiche salienti per una corretta esposizione (e "non esposizione") alle fonti luminose che rispettino la naturale necessità di sincronizzazione giorno/notte, attività/riposo (luce-buio).

3 Descrizione delle attività svolte

3.1 Metodologia

Le misurazioni di illuminamento, radianza spettrale ed irradianza spettrale sono state effettuate in tre uffici con diverse esposizioni (Sud, Est e Ovest), situati al settimo piano di una delle sedi del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Gli uffici verranno da qui in poi denominati ufficio 1, ufficio 2 e ufficio 3 e le loro piante quotate sono riportate in Figura 2 insieme all'indicazione della rispettiva esposizione.

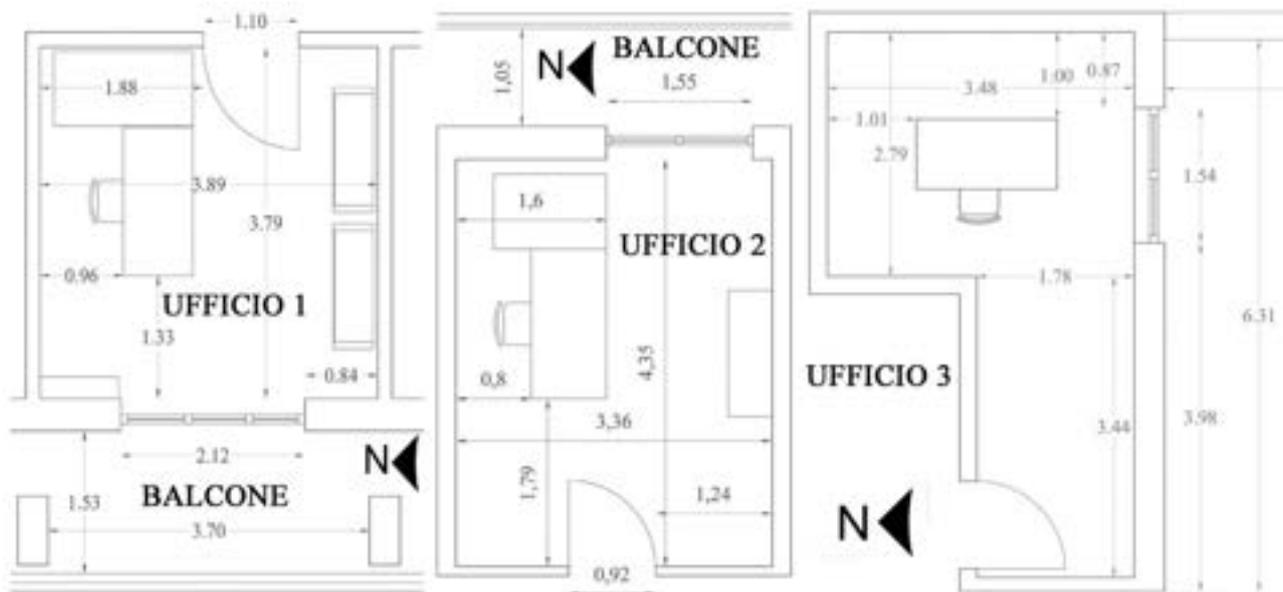


Figura 2. Piante quotate degli uffici

La strumentazione utilizzata per questa ricerca è composta dai seguenti strumenti prodotti dalla Konica Minolta: uno spettroradiometro modello CS 2000, un luxmetro modello T-10 e uno spettrofotometro modello CM-2600d . Utilizzando quest' ultimo strumento sono state misurate le caratteristiche ottiche delle superfici e degli arredi contenuti all'interno dei singoli uffici riportate in Figura 3.

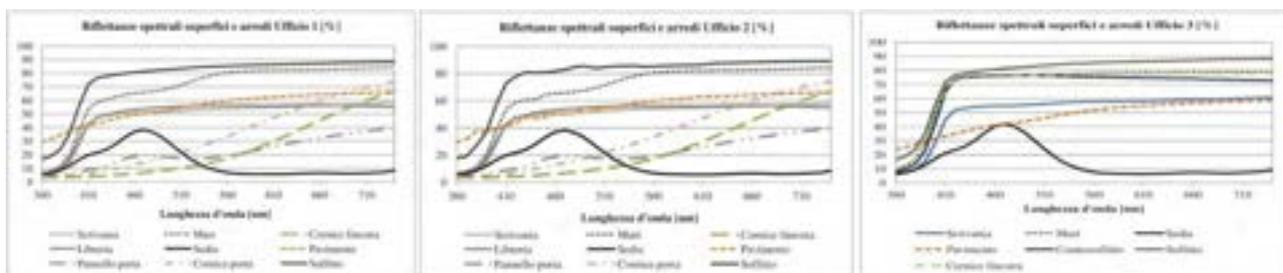


Figura 3. Riflettanze spettrali delle superfici e degli arredi dei tre uffici

Le caratteristiche tecniche di ciascuno strumento sono riportate in dettaglio sul sito della Konica Minolta [28,29,30]. Durante ciascuna stagione le misurazioni sono state effettuate in diversi giorni ogni ora dalle 10:00 alle 18:00 (in inverno e in primavera sono state interrotte prima a causa del sopraggiungere del tramonto). I dati relativi a giornate con la stessa condizione di cielo (sereno, coperto o parzialmente nuvoloso) sono state mediate per ottenere per ciascuna stagione ed ufficio degli andamenti rappresentativi di ognuna delle condizioni di cielo precedentemente elencate.

Tra i dati raccolti per ciascun giorno di misurazione vi sono:

- illuminamenti globali all'esterno (misurati sul tetto dell'edificio) e sulla scrivania

- temperature di colore del cielo
- distribuzioni spettrali del cielo.

Occorre precisare che le misurazioni sono state effettuate durante lo stesso periodo ma in giorni diversi per ogni ufficio, e quindi gli illuminamenti globali esterni verranno riportati per ogni ufficio in quanto relativi ai giorni in cui sono avvenute le misurazioni in quel dato ufficio.

Per quanto riguarda le misurazioni a livello degli occhi, lo spettroradiometro è stato posizionato alla stessa altezza della testa di una persona seduta alla scrivania (1.20 m) e le misure sono state effettuate ogni ora con diversi angoli di inclinazione dello strumento: 0°, 15° e 45° sul piano verticale e 45° a destra e a sinistra sul piano orizzontale (Figura 4), allo scopo di simulare i movimenti della testa di una persona.



Figura 4. Angoli di inclinazione dello spettroradiometro utilizzati per le misure a livello degli occhi

I dati raccolti a livello degli occhi per ciascuna delle inclinazioni precedentemente illustrate includono:

- illuminamenti
- temperature di colore
- irradianze spettrali.

Queste ultime, misurate ogni ora con ciascuno degli angoli di inclinazione precedentemente indicati, sono state mediate per ottenere delle irradianze medie a livello degli occhi, che sono state poi utilizzate per

calcolare la corrispondente soppressione di melatonina tramite il modello di fototrasduzione circadiana proposto da Rea [26] e illustrato in dettaglio nel paragrafo seguente.

3.2 Modello di fototrasduzione circadiana

Per fototrasduzione si intende il processo attraverso cui l'assorbimento di luce da parte di una cellula provoca una determinata risposta. Nel caso della fototrasduzione circadiana si tratta ovviamente di risposte legate al sistema circadiano. Come già specificato nell'introduzione, nel corso degli anni sono stati proposti diversi modelli per la valutazione della risposta circadiana relativa ad un determinato stimolo luminoso. In questo report verrà applicato il modello sviluppato da Rea et al. [24,25,26]. Esso è stato pubblicato per la prima volta nel 2005 ed è stato successivamente modificato nel corso degli anni in base all'avanzamento delle scoperte in questo campo. Tale modello si basa sulle conoscenze attuali e sui profili spettrali di soppressione di melatonina pubblicati da Brainard et al. [18] e Thapan et al. [19].

La sensibilità circadiana descritta dal modello non dipende solo dalla sensibilità spettrale delle cellule gangliari che contengono melanopsina (indicate con l'acronimo ipRGC, intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells), ma anche dalla sensibilità spettrale combinata degli altri fotorecettori presenti sulla retina che intervengono con meccanismi opposti. Pertanto nel modello entra in gioco la sensibilità dei coni S che si "oppone" a quella dell'azione combinata dei coni L ed M (canale blu-giallo), ed anche la sensibilità dei bastoncelli. Le funzioni di sensibilità che coinvolgono i coni sono rapportate al fattore di trasmissione spettrale della macula.

L'applicazione del modello comprende due fasi:

1) Calcolo della "luce circadiana". La luce circadiana è calcolabile mediante l'irradianza spettrale misurata in corrispondenza degli occhi, applicando la seguente relazione:

$$\text{se } \int \frac{S_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda - k \int \frac{V_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda \geq 0$$

$$CL_A = 1622 \left[\int Mc_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda - k \int \frac{V_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{rodSat}} \right) \right) \right]$$

$$\text{se } \int \frac{S_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda - k \int \frac{V_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda < 0$$

$$CL_A = 1622 \int Mc_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda$$

dove

CL_A = luce circadiana (integrale dell'irradianza spettrale opportunamente pesata in modo da tenere conto della sensibilità circadiana ed espressa in W/m^2). La costante 1622 è posta in modo da far sì che ad un illuminamento agli occhi di 1000 lux prodotto dalla distribuzione spettrale di un corpo nero a 2856 K, corrispondano $1000 W/m^2$ di luce circadiana;

Mc_{λ} = curva di sensibilità del recettore contenente melanopsina, che considera anche il fattore di trasmissione spettrale del cristallino;

S_{λ} = curva di sensibilità dei coni S;

mp_{λ} = fattore di trasmissione spettrale della macula;

E_{λ} = irradianza spettrale misurata all'occhio;

V_{λ} = curva di sensibilità fotopica;

V'_{λ} = curva di sensibilità scotopica;

$rodSat$ = costante di saturazione per lo "sbiancamento" del fotopigmento secreto dai bastoncelli = $6.5 W/m^2$

$k = 0.2616$;

$$a_{b-y} = 0.6201;$$

$$a_{rod} = 3.2347.$$

2) Calcolo dello stimolo circadiano

Una volta calcolata la luce circadiana (CL_A) si può calcolare lo stimolo circadiano corrispondente (CS) tramite la seguente equazione:

$$CS = 0.75 - \frac{0.75}{1 + \left(\frac{CL_A}{215.75}\right)^{0.864}}$$

CS = efficacia relativa di una radiazione nel fornire stimolo al sistema circadiano, espresso in termini di soppressione di melatonina.

CS può anche essere espresso in termini percentuali e, come si può osservare, non è funzione lineare della luce circadiana e tende ad un valore massimo di 0.75 (75%). Nella pratica un valore del 50% corrisponde ad un'elevata risposta in termini di soppressione di melatonina.

Osservazione: il termine CS (Circadian Stimulus) utilizzato dagli autori del modello risulta non troppo adeguato, in quanto CS, più che uno stimolo, rappresenta la risposta del sistema in termini di soppressione di melatonina.

4 Risultati

In questa sezione si riportano i risultati relativi a ciascuno degli uffici.

4.1 Ufficio 1 (esposizione a ovest)

In Figura 5 sono riportati i valori della temperatura di colore del cielo e a livello degli occhi, gli illuminamenti globali esterni e quelli sulla scrivania ottenuti facendo una media di tali valori relativi a più giornate con cielo sereno per ciascuna stagione.

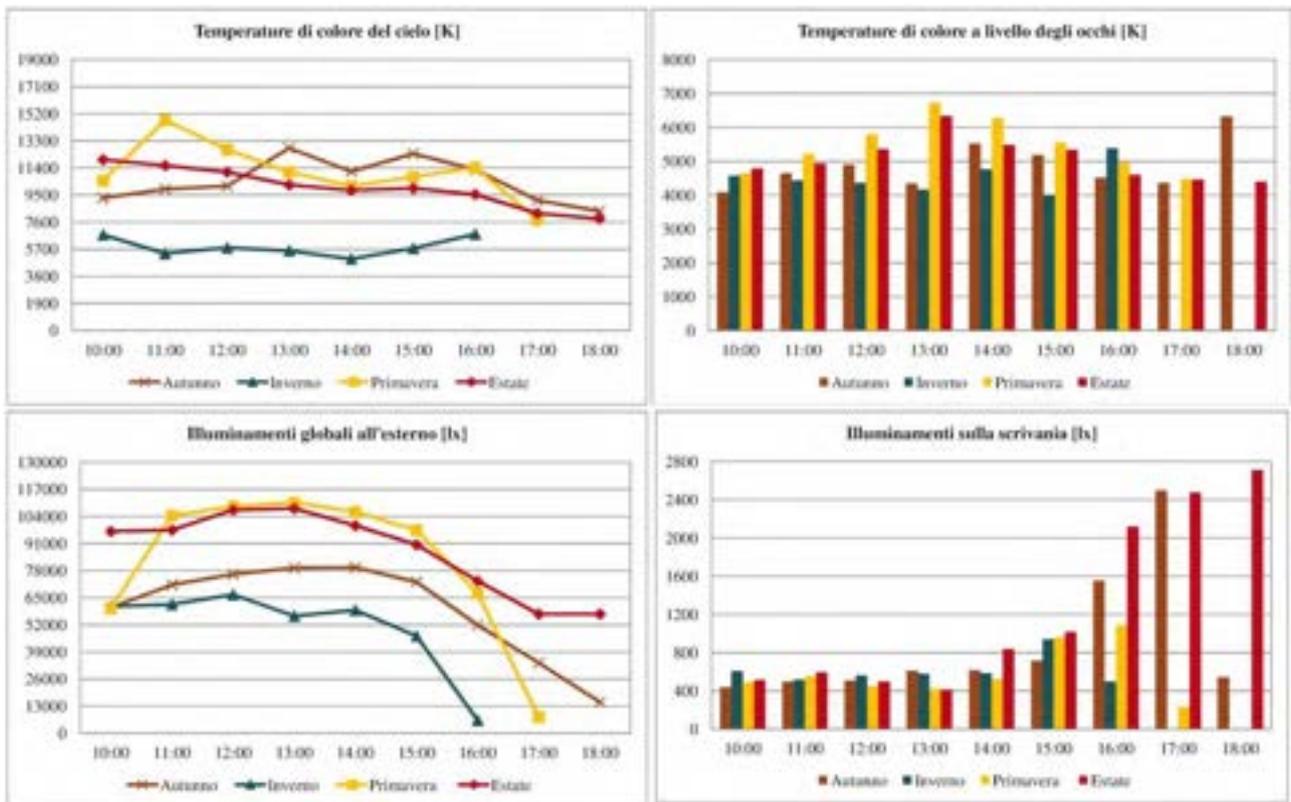


Figura 5. Temperature di colore del cielo e a livello degli occhi, illuminamenti globali esterni e sulla scrivania

Si può notare come gli andamenti delle temperature di colore del cielo in autunno, primavera ed estate siano abbastanza simili mentre quelli relativi all'inverno mostrano valori più bassi. Per quanto riguarda le temperature di colore a livello degli occhi, per tutte le stagioni i valori sono generalmente compresi tra circa 4000 K e 6000 K e soltanto in alcuni orari le temperature di colore sono maggiori di 6000 K.

Gli illuminamenti globali all'esterno mostrano andamenti simili e l'unica variazione tra le diverse stagioni è in termini di valori registrati; in altre parole i valori massimi sono quelli relativi alla primavera e all'estate mentre i più bassi sono quelli invernali. E' interessante osservare che gli illuminamenti sulla scrivania raggiungono i valori massimi durante il pomeriggio in quanto l'ufficio 1 è esposto ad ovest, si noti anche che in autunno ed in estate si registrano i valori più elevati in assoluto.

Gli andamenti degli illuminamenti agli occhi, dei valori di CL_A e CS calcolati con il modello precedentemente illustrato sono invece riportati in Figura 6.

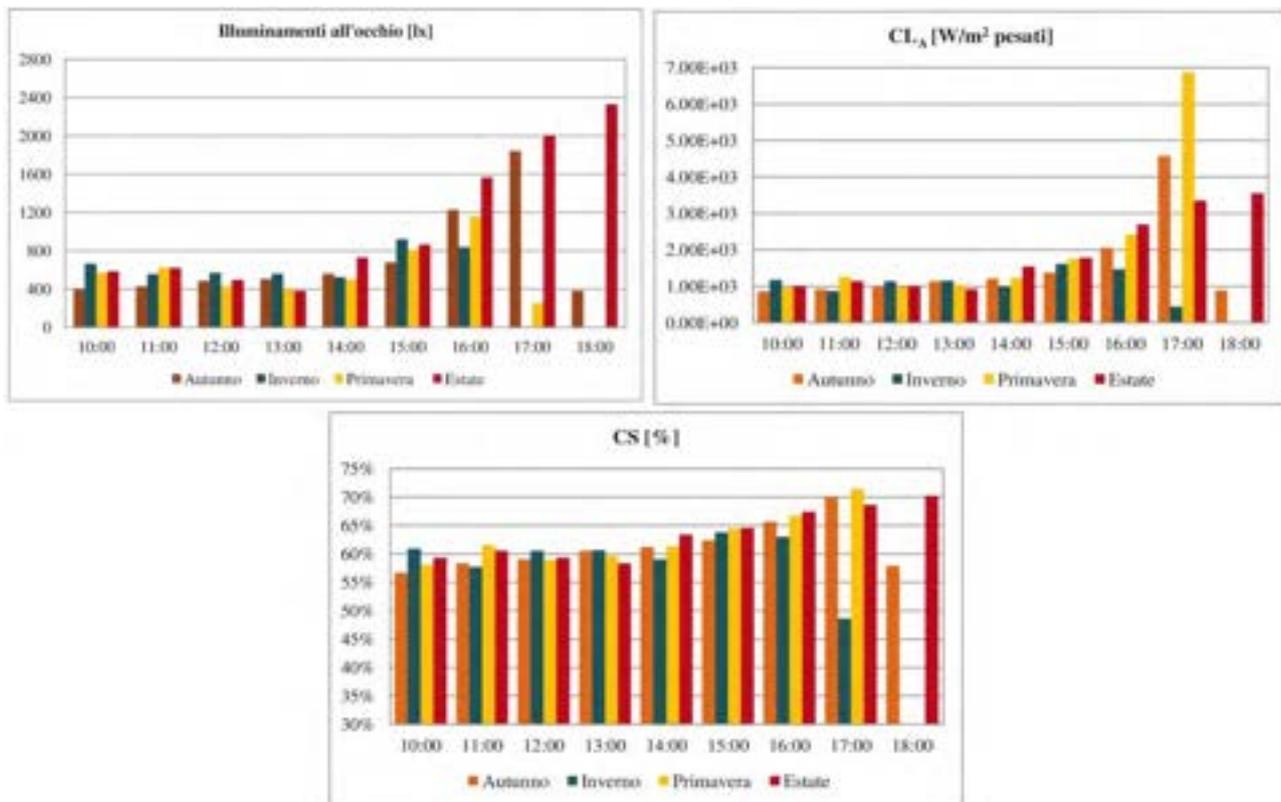


Figura 6. Illuminamenti all'occhio, CL_A e CS

Per quanto riguarda gli illuminamenti agli occhi valgono le stesse osservazioni fatte per quelli sulla scrivania. Gli andamenti dei valori di CL_A e CS tendono a ricalcare quelli degli illuminamenti agli occhi.

4.2 Ufficio 2 (esposizione ad est)

In Figura 7 sono riportati i valori delle temperature di colore del cielo e agli occhi, degli illuminamenti globali esterni e sulla scrivania misurati per l'ufficio 2.

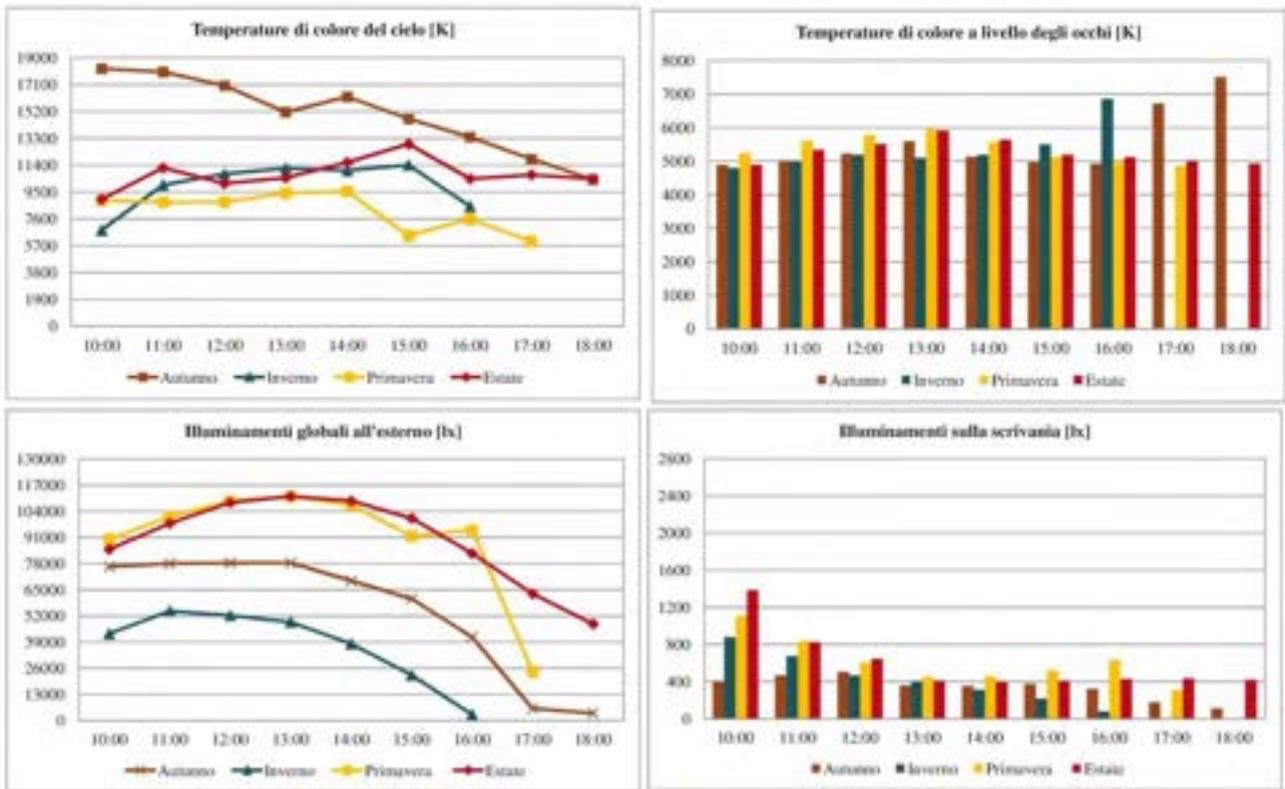


Figura 7. Temperature di colore del cielo e a livello degli occhi, illuminamenti globali esterni e sulla scrivania

Per quanto riguarda le temperature di colore del cielo i valori più elevati sono quelli relativi all'autunno, mentre quelli relativi all'estate, all'inverno e alla primavera sono simili. Le temperature di colore agli occhi sono invece più elevate rispetto a quelle registrate per l'ufficio 1 e generalmente comprese tra circa 5000 K e 6000 K anche se si riscontrano dei picchi intorno ai 7000 K e oltre nelle ultime ore di misurazione. Per gli andamenti degli illuminamenti globali all'esterno valgono le stesse osservazioni fatte per quelli relativi all'ufficio 1. Gli illuminamenti sulla scrivania mostrano i valori durante le prime ore del mattino visto che l'ufficio 2 ha un'esposizione ad est.

In Figura 8 si riportano gli illuminamenti agli occhi ed i valori di CS e CL_A.

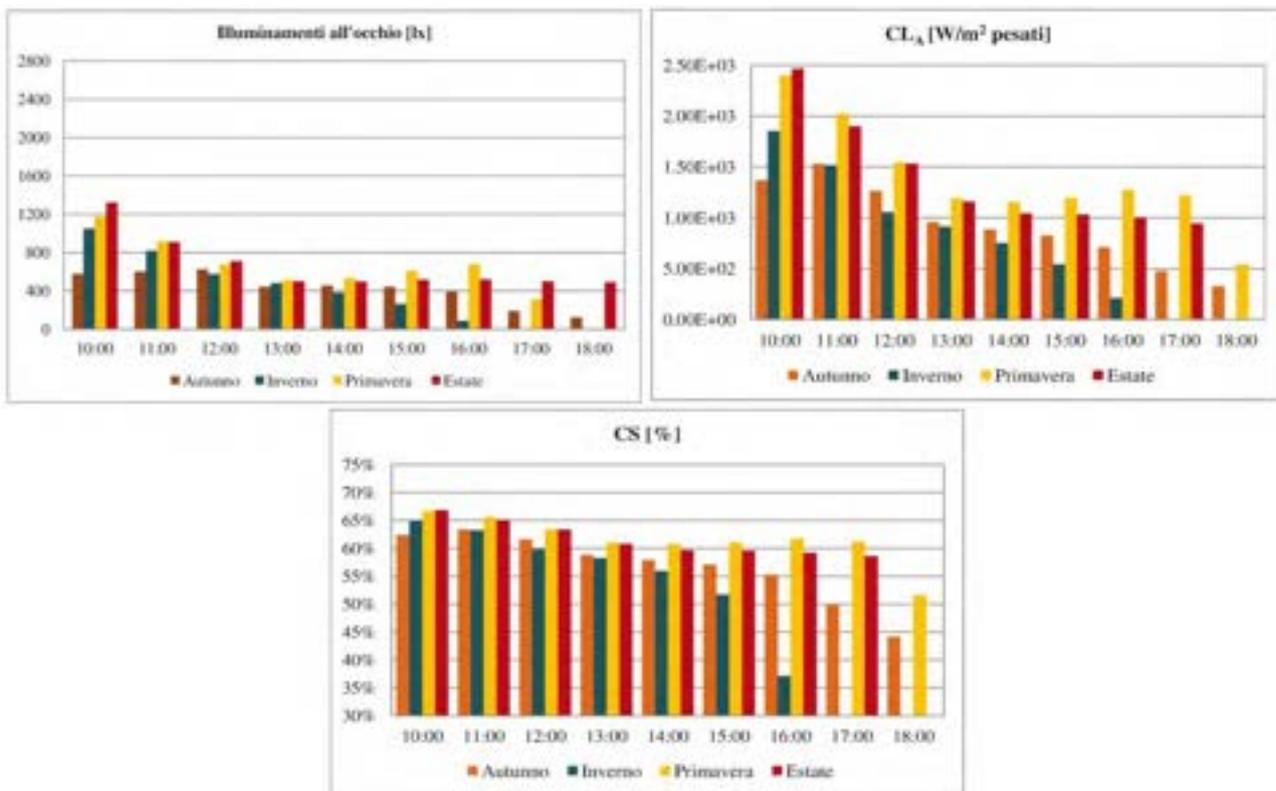


Figura 8. Illuminamenti all'occhio, CL_A e CS

Gli illuminamenti all'occhio mostrano gli stessi andamenti di quelli alla scrivania; per quanto concerne i valori di CL_A e CS i loro andamenti ricalcano quelli degli illuminamenti all'occhio.

4.3 Ufficio 3 (esposizione a sud)

In Figura 9 sono riportati i valori delle temperature di colore del cielo e agli occhi, gli illuminamenti globali esterni e quelli sulla scrivania misurati per l'ufficio 3.

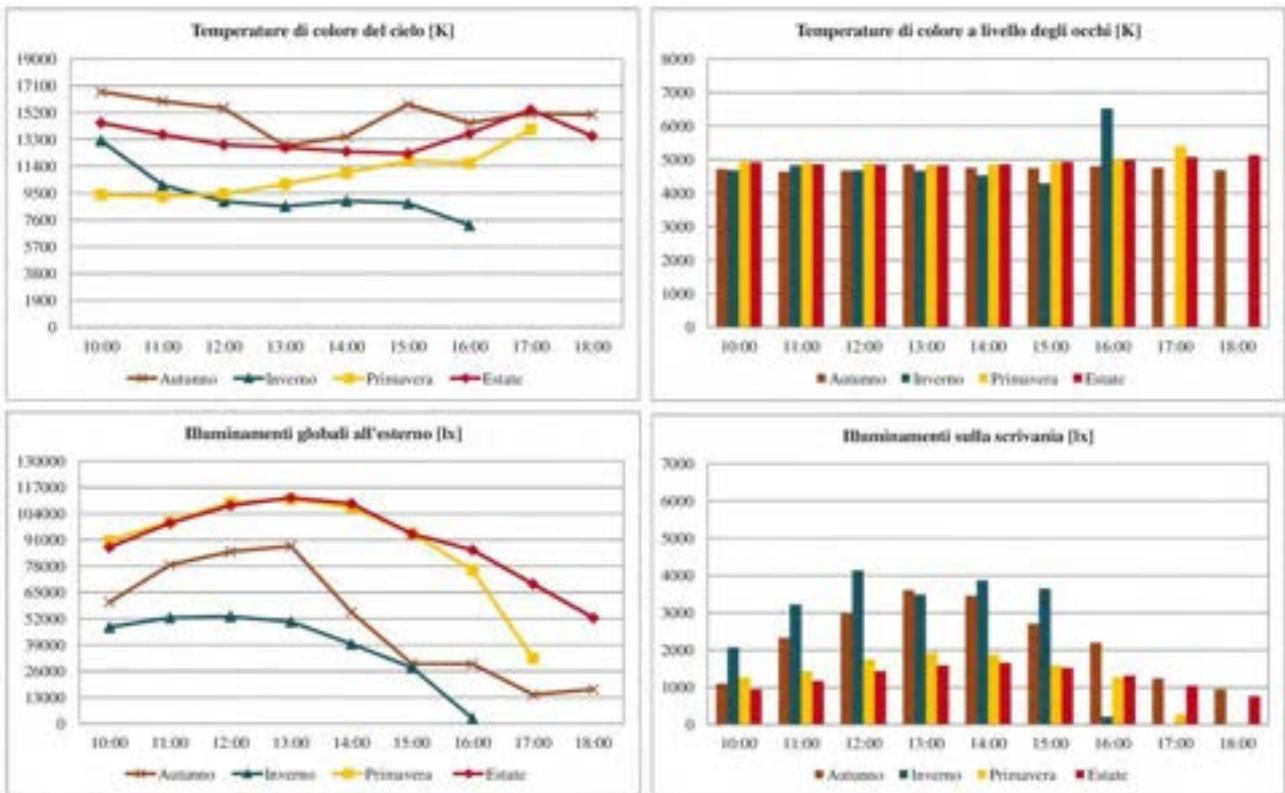


Figura 9. Temperature di colore del cielo e a livello degli occhi, illuminamenti globali esterni e sulla scrivania

Le temperature di colore del cielo mostrano i valori più alti in autunno mentre i più bassi sono stati rilevati durante l'inverno. Le temperature di colore a livello degli occhi non mostrano grosse variazioni tra le stagioni e nei diversi orari e sono comprese tra poco più di 4000 K e 5000 K, soltanto in inverno alle 16:00 e in primavera alle 17:00 i valori sono maggiori di 5000 K.

Per quanto riguarda gli illuminamenti globali all'esterno valgono le stesse osservazioni fatte in precedenza per gli altri due uffici. Per gli illuminamenti sulla scrivania, contrariamente a quanto riscontrato per gli altri due uffici, i valori più elevati sono quelli autunnali ed invernali. Questo risultato dipende dall'esposizione dell'ufficio (Sud) e durante queste due stagioni l'altitudine solare è minore e quindi la luce riesce a penetrare maggiormente all'interno dell'ufficio.

In Figura 10 sono riportati gli illuminamenti agli occhi ed i valori di CL_A e CS.

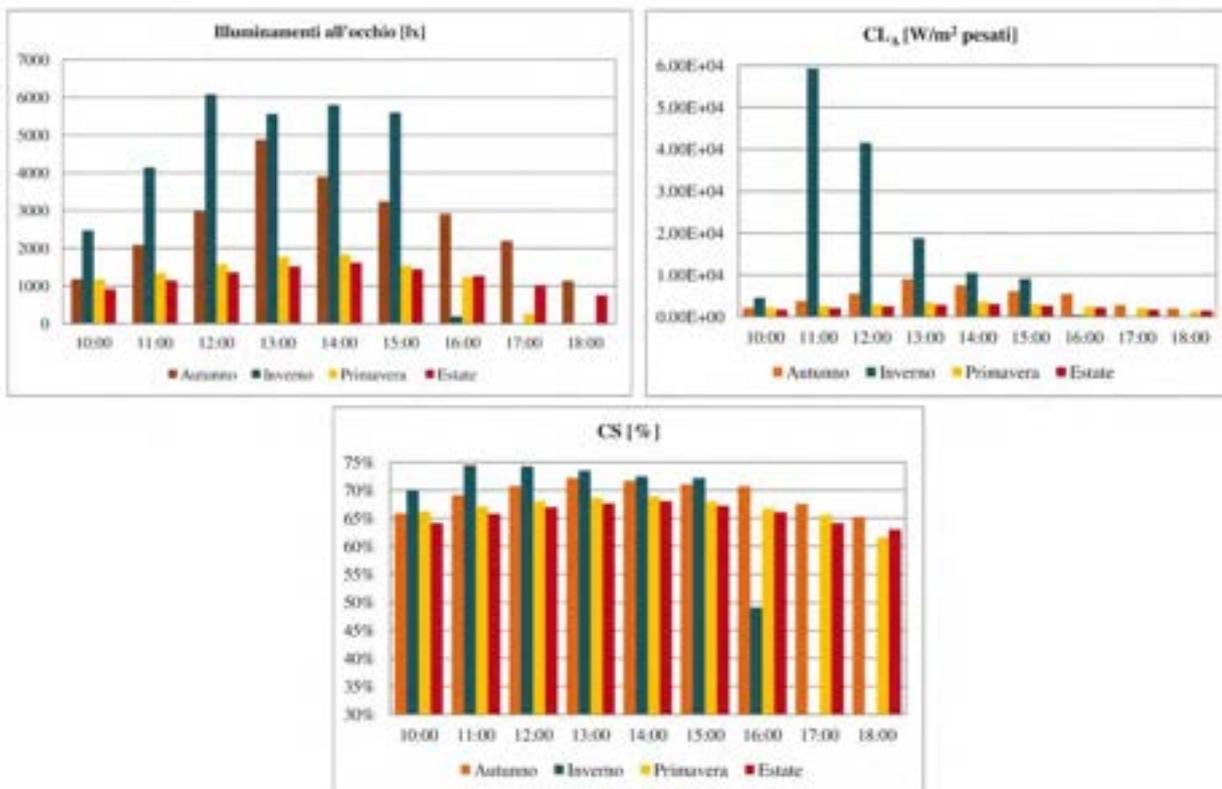


Figura 10. Illuminamenti all'occhio, CL_A e CS

Gli andamenti degli illuminamenti agli occhi riflettono quelli degli illuminamenti sulla scrivania ed i valori più elevati sono registrati durante l'inverno. Per quanto riguarda i valori di CS e CL_A i valori massimi sono stati calcolati per l'inverno e sono inoltre più elevati di quelli relativi agli uffici 1 e 2.

5 Conclusioni

La scoperta delle cellule gangliari intrinsecamente fotosensibili (ipRGC) ed i conseguenti studi sugli effetti della luce sui ritmi circadiani mette in discussione le attuali metodologie e procedure adoperate per la progettazione ed il dimensionamento dei sistemi di illuminazione, con particolare riferimento ai luoghi di lavoro. Allo stato delle attuali conoscenze, da un lato si sono effettuate notevoli scoperte delle quali si può cominciare a tener conto, dall'altro mancano ancora importanti tasselli, sia per quanto riguarda la comprensione dei meccanismi di causa-effetto, sia per la definizione di grandezze quantitative da introdurre ed adottare nella pratica progettuale. A differenza del meccanismo della visione per il quale ad ogni stimolo visivo corrisponde immediatamente una sensazione luminosa, fatti salvi i fenomeni di adattamento, gli effetti della luce sui ritmi circadiani non sono istantanei e dipendono da varie condizioni: l'orario in cui la luce viene somministrata, la durata, l'intensità e la precedente "storia" (quanta luce è stata somministrata nelle ore precedenti). Anche la distribuzione spettrale della radiazione luminosa che incide sugli occhi ha la sua importanza, come si evince dai modelli di calcolo proposti, e questo aspetto sposta l'attenzione verso una attenta scelta dello spettro emesso dalle sorgenti di luce artificiale da un lato e verso un attento controllo della luce naturale, considerandone anche la distribuzione spettrale, dall'altro. La luce naturale all'interno degli ambienti, che negli ultimi anni è sempre più richiesta nei luoghi di lavoro, sia per motivi di risparmio energetico che per la sua qualità che consente di svolgere al meglio i compiti visivi, può assumere un ruolo significativo anche per quanto riguarda gli aspetti circadiani. L'approccio qui proposto, che si dovrebbe integrare in una più ampia valutazione della qualità dell'ambiente luminoso, sposta l'attenzione dei progettisti dalle zone corrispondenti ai compiti visivi in cui, in accordo con gli standard normativi, occorre garantire assegnati valori di illuminamento, verso grandezze da valutare in corrispondenza degli occhi degli osservatori. Le sperimentazioni qui riportate hanno come finalità da un

lato quella di proporre e mettere a punto una procedura di misura della luce naturale in corrispondenza di postazioni di lavoro in ambienti con diversi orientamenti, dall'altro di valutare, in tipiche giornate con cielo sereno, le variazioni che si rilevano, in termini di soppressione di melatonina e quindi di impatto circadiano, al variare delle stagioni.

I risultati conseguiti consentono di trarre interessanti considerazioni:

- Le variazioni stagionali riscontrate nei tre uffici sono differenti in quanto dipendono dall'orientamento delle finestre e spesso non seguono l'andamento degli illuminamenti su piano orizzontale misurati all'esterno. Ad esempio per l'orientamento verso Sud, i massimi valori, conseguiti a metà della giornata, si ottengono nella stagione invernale, in quanto il disco solare è più basso e gli illuminamenti all'interno sono più elevati.
- Le variazioni giornaliere sono fortemente legate all'orientamento. Per l'ufficio esposto ad Est si riscontrano stimoli circadiani più elevati nelle ore del mattino, per quello esposto ad Ovest ciò si verifica nel pomeriggio; pertanto tale orientamento potrebbe non favorire i naturali ritmi circadiani.
- In condizioni di cielo sereno i valori di CS sono sempre molto elevati, tranne che nelle ore corrispondenti al tramonto del sole. Ciò significa che gli occupanti degli ambienti, in tali condizioni, possono fare a meno di integrazioni di illuminazione artificiale per sincronizzare i ritmi circadiani, indipendentemente dai valori di illuminamento sul compito visivo.
- In tutti gli uffici gli illuminamenti rilevati in corrispondenza degli occhi e quelli misurati sulla scrivania sono confrontabili e presentano lo stesso andamento.
- La distribuzione spettrale della radianza della porzione di cielo vista dalla finestra cambia al variare dell'ora del giorno e della stagione, nonché dall'orientamento. I valori sono compresi in un intervallo molto ampio: da poco più di 5000 K fino ad oltre 18000 K.
- La distribuzione spettrale dell'irradianza in corrispondenza degli occhi presenta anch'essa delle variazioni al variare dell'ora del giorno, della stagione e dell'orientamento, ma le variazioni, espresse sinteticamente in termini di temperatura di colore, sono molto più contenute e nella quasi totalità dei casi comprese tra i 4000 K ed i 6000 K.
- Sia l'ambiente esterno che quello interno possono modificare la distribuzione spettrale della radiazione proveniente dalla volta celeste. In altre parole la geometria, le dimensioni ed il colore delle ostruzioni esterne e le caratteristiche delle finiture dell'ambiente interno possono modificare lo spettro della radiazione che incide agli occhi.
- Nella sperimentazione presentata il vetro ha un comportamento neutro, ma sarebbe interessante indagare sull'influenza di vetri e più in generale di sistemi schermanti selettivi.
- I risultati ottenuti non sono generalizzabili e pertanto sono necessarie delle campagne di acquisizione dati, considerando anche altri climi luminosi e diverse condizioni meteo "tipiche" di diverse località.
- Se si confermasse una scarsa variabilità nella temperatura di colore agli occhi degli occupanti, si potrebbero proporre delle procedure semplificate per la stima della "luce circadiana" basate sull'utilizzo dei software attualmente disponibili.
- Il modello proposto da Rea non è l'unico e non è detto che in seguito ad ulteriori ricerche possa essere modificato: tuttavia è confermato che per affrontare questa tematica è necessaria la valutazione dell'irradianza spettrale agli occhi. La procedura di misura e le considerazioni sui parametri sintetici e sulle grandezze fotometriche rimangono quindi valide indipendentemente dalle future scoperte scientifiche.

6 Riferimenti bibliografici

1. P. Boyce, C. Hunter, O. Howlett. "The Benefits of Daylight Through Windows". Rensselaer Polytechnic Institute, Troy (USA), 2003.
2. L. Hescong. "Daylighting and human performance". ASHRAE Journal, 44 (6) (2002), 65-67.
3. S. H. A. Begemann, G. J. van den Beld, A. D. Tenner. "Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses". International Journal of Industrial Ergonomics, 20 (1997), 231-239.

4. J. A. Veitch, G. R. Newsham. "Lighting quality and energy-efficiency effects on task performance, mood, health, satisfaction, and comfort". *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27 (1998) 107–129.
5. 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, G. C. Brainard. "Measuring and using light in the melanopsin age". *Trends in Neurosciences*, 37(1) (2014), 1-9.
6. P. Badia, B. Myers, M. Boecker, J. Culpepper, J. R. Harsh. "Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior". *Physiology and Behavior*, 50 (1991), 583–588.
7. P. Mills, S. Tomkins, L. Schlangen. "The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance". *The Journal of Circadian Rhythms*, 5(2) (2007).
8. A. U. Viola, L. M. James, L. J. Schlangen, D. J. Dijk. "Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality". *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 34 (2008), 297–306.
9. D. C. Klein, R. Y. Moore, S. M. Reppert. "Suprachiasmatic nucleus: the mind's clock". New York: Oxford University Press, 1991.
10. T. Roenneberg, M. Merrow. "The network of time: understanding the molecular circadian system". *Current Biology*, 13(5) (2003), 198-207.
11. J. F. Duffy, C. A. Czeisler. "Effect of light on human circadian physiology". *Sleep Medicine Clinics*, 4 (2009), 165–177.
12. J. F. Duffy, K. P. Wright. "Entrainment of the human circadian system by light". *Journal of Biological Rhythms*, 20(4) (2005), 326-338.
13. J. J. Gooley, S. M. W. Rajaratnam, G. C. Brainard, R. E. Kronauer, C. A. Czeisler, S. W. Lockley. "Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light". *Science Translational Medicine*, 12 (2010); 31–33.
14. R. Stevens, D. Blask, G. Brainard, J. Hansen, S. Lockley, I. Provencio, L. Reinlib. "Meeting report: the role of environmental lighting and circadian disruption in cancer and other diseases". *Environmental Health Perspective*, 115 (9), 2007, 1357–1362.
15. S. Gery, H. P. Koeffler. "Circadian rhythms and cancer". *Cell Cycle*, 9(6) (2010), 1097-1113.
16. J. T. Doljansky, H. Kannety, Y. Dagan. "Working under daylight intensity lamp: an occupational risk for developing circadian rhythm sleep disorder?". *Chronobiology International*, 22(3) (2005), 22(3):597-605.
17. S. W. Lockley, Brainard GC, Czeisler CA. "High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light". *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 88 (2003), 4502–4505.
18. C. Brainard, J. Hanifin, J. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. D. Rollag. "Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor". *Journal of Neuroscience*, 21(16) (2001), 6405-6412.
19. K. Thapan, J. Arendt, D. Skene. "An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans". *Journal of Physiology*, 535(1) (2001), 261-267.
20. D. Gall, K. Bieske. "Definition and measurement of circadian radiometric quantities". *Proceedings of the 2004 CIE symposium on light and health: non visual effects*, September 30-2 October 2004 Vienna (Austria), 2004, 129-132.
21. C. S. Pechacek, M. Andersen, S. W. Lockley. "Preliminary method for prospective analysis of the circadian efficacy of (day)light with applications to healthcare architecture". *Leukos*, 5 (2008), 1-26.
22. S. Gochenour, M. Andersen. "Circadian effects of daylighting in a residential environment". *Proceedings of the Lux Europa 2009-11th European lighting conference*, September 9-11 2009 Istanbul (Turkey), 2009, 1-8.
23. K. Wandachowics. "Calculation of the circadian illuminance distribution with radiance". http://www.radiance-online.org/radiance-workshop5/2006_Radiance_Workshop/Presentations/Wandachowics-2_RW2006.pdf, 2006.
24. M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman. "A model of phototransduction by the human circadian system". *Brain Research Rev*, 50 (2005), 213-218.

25. M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough. "Circadian light". *Journal of Circadian Rhythms*, 8 (2) (2010).
26. M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner. "Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system". *Lighting Research & Technology*, 44 (2012), 386-396.
27. 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, G. C. Brainard. "Irradiance Toolbox". <http://www.eye.ox.ac.uk/team/principal-investigators/stuart-peirson/downloadstile-14/filetile-4/@download>.
28. "Specifiche principali spettroradiometro CS 2000" <http://www.konicaminolta.it/measuring-instruments/products/for-display-measurements/spectroradiometers/cs-2000/specifications.html>.
29. "Specifiche principali spettrofotometro CM-2600d" <http://www.konicaminolta.it/measuring-instruments/products/colour-measurement/spectrophotometers-portable/cm-2600d-2500d/specifications.html>.
30. "Specifiche principali luxmetro T-10" <http://www.konicaminolta.it/measuring-instruments/products/for-light-measurements/illuminance-meters/t-10-series/specifications.html>.
31. T. A. Wehr. Photoperiodism in humans and other primates: evidence and implications. *Journal of Biological Rhythms*, 16(4) (2001), 348-64.
32. I. Kwon, H. K. Choe, G. H. Son, K. Kim. Mammalian molecular clocks. *Experimental Neurobiology*, 20(1) (2011), 18-28.
33. T. A. Wehr, D. E. Moul, G. Barbato, H. A. Giesen, J. A. Seidel, C. Barker, C. Bender. Conservation of photoperiod response mechanism in humans. *American Journal of Physiology*, 265 (1993), 846-857.
34. J. M. Zeitzer, D. J. Dijk, R. E. Kronauer, E. N. Brown, C. A. Czeisler. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *Journal of Physiology*, 526 (2000), 695-702.
35. C. Cajochen, K. Krauchi, K. V. Danilenko, A. Wirz-Justice. Evening administration of melatonin and bright light: interactions on the EEG during sleep and wakefulness. *Journal Sleep Research*, 7 (1998), 145-157.
36. S. Rana, S. Mahmood. Circadian rhythm and its role in malignancy. *Journal of Circadian Rhythms*, 8(3) (2010).
37. M. S. Rea, A. Bierman, M. G. Figueiro, J. D. Bullough. A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health. *Journal of Circadian Rhythms*, 6(7) (2008).
38. F. K. Goodwin, K. Jamison. *Manic Depressive Illness*, (1990), Oxford University Press, New York.
39. T. A. Wehr, W. C. Jr Duncan, L. Sher, D. Aeschbach, P. J. Schwartz, E. H. Turner, T. T. Postolache, N. E. Rosenthal. A circadian signal of change of season in patients with seasonal affective disorder. *Archives of General Psychiatry*, 58 (2001), 1108-1114.

7 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Prof.ssa Laura Bellia. Dottore di ricerca e professore associato in Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, è docente di corsi di Fisica Tecnica Ambientale ed Illuminotecnica presso corsi di Laurea in Ingegneria ed Architettura. Svolge attività di ricerca, testimoniata da oltre 100 pubblicazioni su riviste e convegni internazionali e nazionali, nei settori dell'energetica, della termofisica dell'edificio e dell'illuminotecnica. Con riferimento a quest'ultima si occupa di illuminazione per i beni culturali, effetti non visivi della luce, qualità dell'ambiente luminoso con sorgenti LED, utilizzo della luce naturale per il risparmio energetico ed il benessere, efficienza energetica nell'illuminazione. Svolge attività di "referee" per prestigiose riviste internazionali di settore e per convegni internazionali.

Prof. Giuseppe Barbato. Giuseppe Barbato si è laureato in Medicina alla Università Federico II di Napoli nel 1983. Dopo la specializzazione in Psichiatria conseguita con lode nel 1987, nel 1991 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca. Ha svolto attività clinica e di ricerca al National Institute of Mental Health, Clinical

Psychobiology Branch, di Bethesda dal 1990 al 1992. Dal 1995 al 2002 è stato Ricercatore nel Corso di Laurea in Psicologia della Seconda Università di Napoli. Dal 2002 è Professore Associato di Psicobiologia e Psicologia Fisiologica presso la facoltà di Psicologia della Seconda Università di Napoli. E' responsabile del Servizio di Psicofisiologia Clinica del Dipartimento di Psicologia. Ha svolto e svolge attività di "referee" per: Journal of Neurophysiology, Journal of Applied Physiology, Biological Psychiatry, Perceptual and motor skills, Psychological Reports, Sleep, Journal of Affective Disorders, Journal of Sleep Research, Neuroscience Letters, Psychiatry Research, Journal of American Genetics, Clinical Endocrinology, Hormone and Metabolic Research. Con Norman Rosenthal e Giacomo Bonavoglio nel 2002 ha pubblicato per Longanesi il volume "Le stagioni e la mente".

Arch. Alessia Pedace. Dottoranda al terzo anno di studi presso il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici dell'Università degli Studi di Palermo. La sua attività di ricerca si svolge presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e riguarda la qualità dell'illuminazione negli ambienti interni, con particolare attenzione agli effetti non visivi della luce. E' autrice di oltre 20 pubblicazioni su riviste scientifiche e convegni nazionali ed internazionali.