



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Relazione relativa all'attività C: Realizzazione pilota di illuminazione
efficiente in una situazione applicativa complessa: implementazione
di nuove funzionalità

Valutazione metrologica del comfort visivo tramite misure video
fotometriche e colorimetriche e Rapporti di misura sulle situazioni
campione analizzate

Maurizio Rossi, Fulvio Musante, Daria Casciani



RELAZIONE RELATIVA ALL'ATTIVITÀ C: REALIZZAZIONE PILOTA DI ILLUMINAZIONE EFFICIENTE IN UNA SITUAZIONE APPLICATIVA COMPLESSA: IMPLEMENTAZIONE DI NUOVE FUNZIONALITÀ
VALUTAZIONE METROLOGICA DEL COMFORT VISIVO TRAMITE MISURE VIDEO FOTOMETRICHE E COLORIMETRICHE E RAPPORTI DI MISURA SULLE SITUAZIONI CAMPIONE ANALIZZATE

Maurizio Rossi, Fulvio Musante, Daria Casciani (Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

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

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Il rapporto comprende allegati



Accordo di collaborazione tra ENEA e Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO, nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009, Progetto 3.2 “Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica”, per una attività di ricerca dal titolo: “Advance LED Lighting Design nell'Illuminazione Pubblica “.

Relazione relativa all'attività C: Realizzazione pilota di illuminazione efficiente in una situazione applicativa complessa: implementazione di nuove funzionalità
Per il Dip. Indaco - Politecnico di Milano questa attività prevede:

- 1) Relazione scientifica sulla valutazione metrologica del comfort visivo tramite misure video fotometriche e colorimetriche.
- 2) Rapporti di misura sulle situazioni campione analizzate.

Allegati:

- Misure CCT. : misure della temperatura di colore effettuate con il Minolta CA2000

INDICE

| | |
|--|----|
| 1 Premessa | 2 |
| 2 Aspetti fisiologici | 2 |
| 3 Sistema circadiano e soppressione della melatonina | 3 |
| 4 L'opponenza spettrale circadiana | 6 |
| 5 Sorgenti con effetto circadiano | 10 |
| 6 Altri fattori della luce che influenzano il sistema circadiano | 11 |
| 6.1 Aspetti temporali della stimolazione luminosa del sistema circadiano | 12 |
| 7 Introduzione alla fotometria circadiana | 14 |
| 7.1 Le grandezze radiometriche circadiane | 14 |
| 7.2 Metodi di misura | 16 |
| 8 Indice di stimolazione circadiana proposto da Rea | 21 |
| 9 Caratteristiche tecniche del video fotometro LMK 2000 | 28 |
| 9.1 Caratterizzazione spettrale della risposta del video fotometro | 31 |
| 9.2 Problema della calibrazione e utilizzo di dati surrogate | 34 |
| 10 CA 2000 2D Color Analyzer | 40 |
| 11 Caratteristiche dello spettroradiometro utilizzato | 41 |
| 12 Luxmetro LMT Pocket Lux-2 | 43 |
| 13 Descrizione dell'ambiente test utilizzato | 43 |
| 13.1 Impianto di illuminazione artificiale | 44 |
| 13.2 Requisiti illuminotecnici come da norma UNI 12464 | 49 |
| 13.3 Elaborazioni delle misure di illuminamento | 55 |
| 13.4 Misura delle caratteristiche spettrali delle lampade | 55 |
| 13.5 Video terminale | 56 |
| 13.6 Valutazione circadiana | 58 |
| Bibliografia | 69 |

Milano, 12.9.2011

Il responsabile scientifico della ricerca
Prof. Maurizio Rossi
Politecnico di Milano



1 Premessa

Il presente lavoro si inserisce all'interno dell'attività C, "Realizzazione pilota di illuminazione efficiente in una situazione applicativa complessa: implementazione di nuove funzionalità", previsto dall'allegato tecnico all'accordo di collaborazione tra Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO, per attività di ricerca "Advance LED Lighting Design nell'illuminazione Pubblica".

Non è stato tuttavia possibile analizzare gli interventi di illuminazione realizzati nel Comune pilota¹ (individuato da ENEA), come previsto dall'allegato tecnico a causa della mancata realizzazione degli impianti da parte del comune stesso.

Sono state quindi considerate una serie di alternative, relative ad interni pubblici, e tra queste è stata scelta la biblioteca comunale quale ambiente di test su cui condurre le misure di confort visivo mediante l'impiego di immagini colorimetriche e video fotometriche.

La metodologia di misura, inizialmente sviluppata per applicazioni di illuminazione urbana in esterni è stata conseguentemente riadattata al nuovo campo applicativo, anche se il caso studio scelto non ha consentito di metterne in luce tutte le potenzialità (l'impianto di illuminazione dell'ambiente è piuttosto limitato e poco flessibile).

2 Aspetti fisiologici

In questa parte della ricerca si sono analizzati alcuni aspetti inerenti gli effetti della luce sulla fisiologia umana:

1. La luce ha un impatto diretto sulla attività della corteccia cerebrale, sulla temperatura corporeaⁱ e sulla frequenza cardiacaⁱⁱ.
2. È noto che luce consente di regolare la produzione dell'ormone melatoninaⁱⁱⁱ.
3. Vi sono molte ricerche che hanno posto in evidenza che il ritmo circadiano umano è influenzato dalla presenza di un nuovo meccanismo di fotoricezione scoperto nella retina^{iv,v}, questo sarebbe dovuto ad un fotopigmento che alcuni ricercatori hanno chiamato melanopsina^{vi}.
4. Alcune ricerche sono state dedicate ad analizzare come la luce può migliorare le prestazioni dei lavoratori turnisti notturni^{vii,viii}.
5. È stato dimostrato che la luce può avere un effetto anche sul livello di vigilanza soggettivo^{ix}.
6. La luce può influire positivamente sulla depressione stagionale^x che, particolarmente nei paesi nordici, colpisce molti soggetti nel periodo invernale quando è minore l'esposizione alle radiazioni solari.
7. La terapia luminosa può migliorare la qualità e durata del sonno in pazienti affetti da disturbi del sonno^{xi}.
8. Nel caso di patologie gravi come l'Alzheimer, la luce può migliorare le fasi di veglia e sonno dei malati^{xii}.
9. Si è osservato che la luce può accelerare la crescita di peso nei neonati prematuri^{xiii,xiv}.

¹ Il comune pilota è Marcallo con Casone in provincia di Milano



10. È stata dimostrata una relazione tra la regolazione della melatonina e lo sviluppo del tumore al seno^{xv,xvi}.

Il termine sistema circadiano è usato per descrivere gli effetti derivanti dalla conversione dell'energia luminosa da parte della retina in segnali neuronali che regolano importanti funzioni fisiologiche, come ad esempio il ritmo del sonno, la temperatura del corpo, la produzione di ormoni, ecc. Questo tipo di indagine è stata centro di interesse negli scorsi 15 anni in laboratori in tutto il mondo e lo sforzo di indagine ha prodotto la determinazione di una curva di sensibilità, che coinvolge alcuni specifici fotorecettori del sistema circadiano.

3 Sistema circadiano e soppressione della melatonina

In estrema sintesi, per gli scopi del design della luce, possiamo descrivere il sistema circadiano come composto dal nucleo soprachiasmatico (SCN) dell'ipotalamo che controlla l'orologio biologico del cervello. Gli impulsi nervosi prodotti dalla retina raggiungono l'SCN che genera il ciclo di oscillazione di 24 ore nell'attività neurale, la fase circadiana. Questo influenza anche la ghiandola pineale che produce la melatonina^{xvii}. La melatonina può essere rilevata nel sangue, nella saliva e nelle urine come fattore in grado di evidenziare lo stato dell'orologio biologico internoⁱⁱⁱ. Un aspetto fondamentale evidenziato da molta letteratura scientifica è che esclusivamente responsabilità della retina di tradurre la luce in stimolazioni nervose per il sistema circadiano. Infatti tutte le ricerche condotte per evidenziare effetti di questo tipo derivanti da stimolazioni extraoculari hanno dato esito negativo^{xviii,xix,xx,xxi,xxii}.

Nella comunità scientifica appare quindi evidente che dal punto di vista della stimolazione circadiana ci sono una serie di elementi che richiedono di essere definiti e misurati diversamente rispetto alla fotometria, in termini di quantità, spettro, distribuzione spaziale, temporizzazione e durata della esposizione^{xxiii}. Si evidenzia la necessità di definire una fotometria circadiana (per misurare lo stimolo biologico di soppressione della melatonina) con una curva di risposta differente da quella della visione fotopica umana $V(\lambda)$. Infatti se la luce è uno stimolo primario del sistema circadiano non è ancora completamente chiaro quali caratteristiche della luce influenzino il sistema circadiano. Alcune ricerche hanno mostrato che 500 lux di illuminazione con lampada fluorescente da ufficioⁱⁱⁱ possono essere meno efficaci nella soppressione della melatonina di una illuminazione differente^{xxiv} con soli 3,5 lux da LED. In definitiva la domanda che ci si deve porre è quale e quanta luce è necessaria per influire sul sistema circadiano?

Per questo scopo appare innanzitutto inadeguata la descrizione della luce in termini di semplici grandezze fotometriche (illuminamenti, luminanze). Tali grandezze sono infatti pesate secondo la curva di efficienza fotopica $V(\lambda)$ che è prevalentemente il risultato della sensibilità dei coni M (medie lunghezze d'onda, giallo) e L (lunghe lunghezze d'onda, arancio-rosso), che sono i più presenti nella parte centrale della retina, la Fovea. Ma questi fotorecettori sono poco influenti sul sistema circadiano come dimostrato da Rea^{xxv} e Brainard^{xxvi}. Proprio per questa ragione in molte ricerche degli anni scorsi è stata fatta confusione e sono state tratte



conclusioni contrastanti, dato che si valutava la luce solo in termini di sensibilità fotopica senza considerare la reale composizione spettrale della radiazione.

Si può affermare che il sistema circadiano è massimamente sensibile alle corte lunghezze d'onda (zona del blu) e che ciò è il risultato della combinazione dell'attività dei fotorecettori classici e altri scoperti solo di recente (ipRGCs)^{xxvii,xxviii} che alcuni ricercatori hanno chiamato melanopsina, che influenzano direttamente il sistema circadiano, quando esposti alla luce, senza contribuire al fenomeno della visione. La lunghezza d'onda del picco della risposta circadiana per la soppressione della melatonina, risulta spostata verso la regione del blu dello spettro del visibile, se confrontata con le risposte spettrali fotopica ($V(\lambda)$, che presenta un picco a 555 nm), mesopica (λ_{\max} risulta compreso tra la lunghezza d'onda di picco della risposta fotopica e quella scotopica), e scotopica ($V'(\lambda)$, con picco a 508 nm), tradizionalmente utilizzate in fotometria. Sulla base delle ricerche scientifiche ad oggi disponibili, sembra che la lunghezza d'onda del picco dell'attività circadiana debba collocarsi attorno ai 480 nm.

Un aspetto molto importante in merito alla capacità della luce di influire sul sistema circadiano è la sua distribuzione spettrale. Gli strumenti di misura fotometrica attualmente sul mercato sono tutti calibrati secondo la curva di sensibilità fotopica $V(\lambda)$, definita dalla CIE nel 1924 per la sola visione foveale con un angolo di 2° . Alcuni strumenti più avanzati possono anche considerare la visione scotopica $V'(\lambda)$ e l'osservatore standard supplementare definito dalla CIE nel 1964 con test di visione in un angolo di 10° che considera anche una limitata zona extrafoveale. In tutti i casi, comunque, questo tipo di descrizione fotometrica si basa prevalentemente sulla sensibilità spettrale dei coni M e L. Gli esperimenti condotti recentemente tramite l'utilizzo di sorgenti di luci monocromatiche^{xxvi,xlii} o a banda larga^{xxv,xxix} dimostrano che la sensibilità spettrale della soppressione della melatonina ha un comportamento sensibilmente diverso rispetto alla sensibilità spettrale fotopica.

Luminous Efficiency Functions

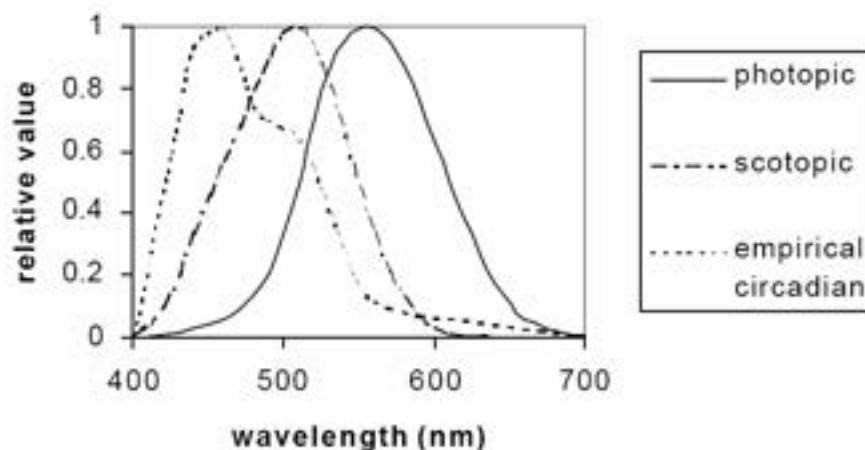


Figura 1 - Le curve di sensibilità fotopica, scotopica e circadiana.



In Figura 1 è riportata la funzione di sensibilità spettrale determinata empiricamente dai ricercatori: questa presenta un massimo nella zona dello spettro blu a 446 nm mentre è minima in corrispondenza di 560 nm (giallo) per il quale si ha invece la massima sensibilità della visione fotopica. Appare quindi evidente che, ad esempio, una intensa luce brillante prodotta da una lampada ad incandescenza ricca di radiazioni giallo-rosse e povera di blu, se da un lato ha una buona resa cromatica e consente anche una corretta funzione visiva, dall'altro contribuisce in modo minimo alla soppressione della melatonina e comunque molto meno di una daylight di uguale energia, Rea^{xxiii} riporta un fattore in base al quale la daylight è circa 2,22 volte più efficace della sorgente incandescente.

Gall^{xxx} propone invece una curva di sensibilità circadiana ottenuta direttamente dagli esperimenti di Brainrad^{xxvi} e Thapan^{xlii} lievemente differente da quella di Rea. Inoltre propone un metodo differente e più diretto per mettere in relazione le grandezze circadiane con quelle fotometriche tramite il fattore di effetto circadiano a_{cv} . Gall propone anche una Tabella 1 che pone in relazione il tipo di attività con fattore circadiano così ottenuto:

Tabella 1 Relazione tra a_{cv} e attività proposta da Gall

| Situazione/Attività | a_{cv} | Tonalità di luce |
|--|----------|-----------------------------|
| Momenti di tranquillità, relax, applicazioni non professionali private | < 0,4 | Bianco caldo < 3300K |
| Ufficio, industria, illuminazione stradale, negozi, mercati, speciali requisiti di illuminazione | 0,3÷0,8 | Bianco neutro 3300÷5300K |
| Concentrazione ottimale sul lavoro, sensazione di benessere in abbinamento a grandi sforzi visivi, terapie | > 0,7 | Luce diurna > 5300K |

Van Bommel^{xxxi, xxxii} pone in risalto il fatto che con l'avanzare dell'età peggiora la visione a causa dell'ingiallimento (diminuisce la trasmittanza totale) del cristallino (Figura 2) e quindi è necessario avere più luce per leggere. Il deterioramento del cristallino fa sì che ancora meno luce blu entri nell'occhio rispetto alle altre frequenze².

² Questo aspetto pone delle doverose riflessioni sulla capacità/possibilità di un prodotto per l'illuminazione di customizzarsi/adattarsi/regolarsi anche spettralmente in funzione dell'età del soggetto.

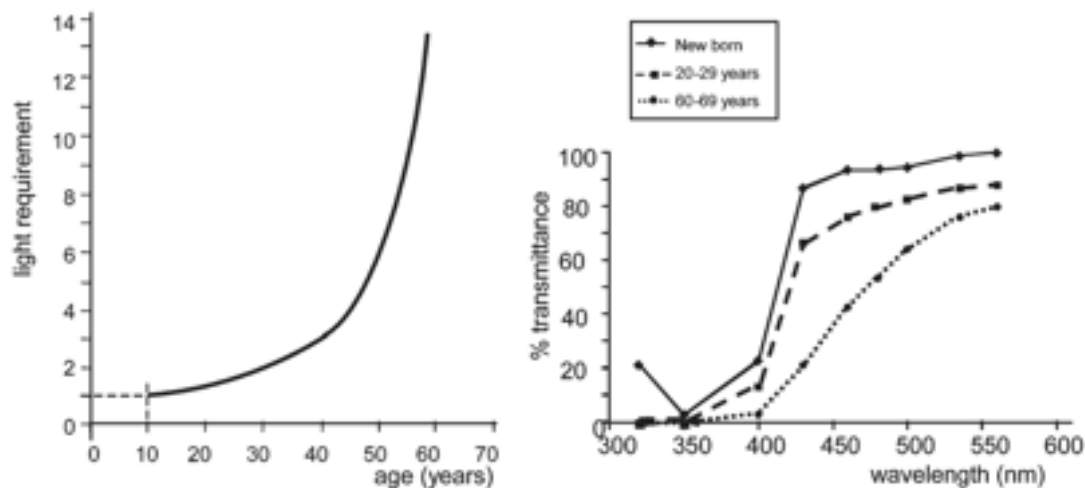


Figura 2 Qualità della visione rispetto all'età.

Il modello di sensibilità spettrale circadiana, presenta però una criticità: molti studiosi hanno creduto che, come per le luminanze, il sistema circadiano trattasse la luce in maniera strettamente additiva; cioè che si potesse a ragione sostenere che una unità di luminanza più una seconda unità, desse come risultato due unità. Ci si potrebbe quindi legittimamente chiedere se, sulla base delle conoscenze anatomiche e neurofisiologiche, il sistema circadiano processi la luce in maniera sotto-additiva, cioè che una unità più una seconda unità faccia meno di due; ciò accade ad esempio nel sistema visivo per la chiarezza; dove questo comportamento sotto-additivo, dipende da un meccanismo di opposenza dei canali cromatici.

Apparentemente il sistema circadiano condivide un meccanismo di opposenza spettrale dei neuroni (blu vs giallo) con i canali di visione dei colori ottenendo quindi un comportamento sotto-additivo degli stimoli in ingresso^{xxxiii}.

4 L'opponenza spettrale circadiana

In fotometria la legge di Abney per l'additività^{xxxiv} è stata utilizzata come ipotesi per il comportamento lineare della percezione della luminanza; l'additività significa che la luminanza totale di una luce non monocromatica, è la somma pesata delle radiazioni che la compongono alle diverse lunghezze d'onda. L'additività non si mantiene per tutte le condizioni di illuminazione; l'additività fallisce sia in condizioni di visione fotopica, sia in quelle di visione mesopica^{xxxv}; viene indicato come effetto Abney^{xxxvi} quando una luce bianca viene aggiunta a una luce monocromatica, l'occhio umano percepisce un cambiamento di tinta della radiazione risultante; l'aggiunta del bianco dovrebbe portare alla semplice de-saturazione del colore; in realtà ciò che si percepisce è una variazione della lunghezza d'onda dominante della radiazione monocromatica e di conseguenza una variazione della tinta e quindi la validità dell'intera legge viene meno^{xxxvii}.

In condizioni di visione fotopica, l'additività fallisce (chiamata sotto-additività) quando la brillantezza percepita è inferiore alla somma delle brillanze percepite per le singole componenti; il fenomeno sembra dovuto principalmente alle interazioni non



lineari cono-cono, chiamato effetto Helmholtz-Kohlarusch^{xxxviii}. Ad esempio mescolando una luce monocromatica rossa con una monocromatica verde di uguale brillantezza, può essere percepita come meno brillante delle due componenti prese singolarmente^{xxxix}.

La prima ricerca di Figueiro et al^{xi}, sullo studio del meccanismo di opponenza spettrale nella soppressione delle melatonina, ha comparato la soppressione della melatonina prodotta da una luce blu di un LED (light emitting diode) con quella ottenuta dall'impiego di una lampada ai vapori di mercurio (Hg). La luce blu del LED produceva un illuminamento di 18 lux ($29 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) sugli occhi del soggetto mentre la lampada ai vapori di Hg (175 W) produceva un illuminamento di ben 450 lux ($170 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) sugli occhi.

La potenza radiante della radiazione policromatica prodotta dalla lampada a vapori di Hg, era tale per cui ci si sarebbe aspettati una soppressione della melatonina uguale o superiore rispetto a quella ottenuta con la luce blu del LED se la legge di additività fosse stata soddisfatta nella risposta circadiana. I risultati hanno rivelato una statisticamente significativa differenza tra il LED e la lampada a vapori di Hg nella soppressione della melatonina, in cui il LED risulta avere un effetto di soppressione maggiore rispetto a quello della lampada a scarica in contrasto con il principio di additività. Ovvero all'aumentare della radiazione non blu diminuisce l'effetto circadiano della componente blu.

La funzione, ottenuta dal best fitting dei dati sperimentali ottenuti è mostrata alla Figura 3, dove si può notare un relativo buon accordo con la funzione di attività spettrale per la soppressione della melatonina proposta da Brainard et al.^{xli} e da Thapan et al^{xlii}.

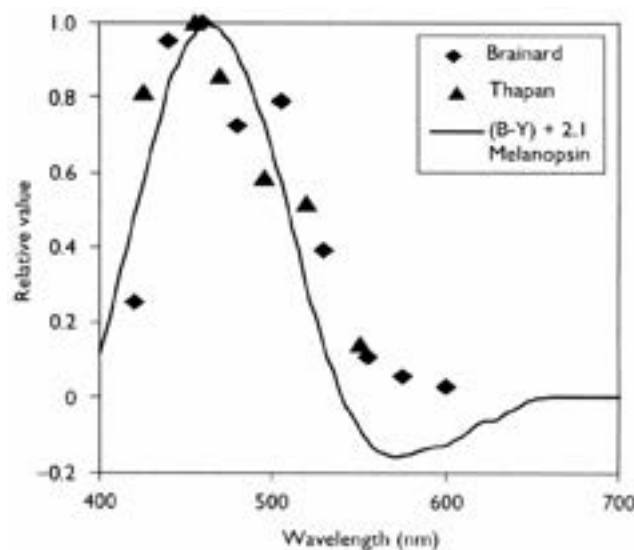


Figura 3 Ipotetica azione di opponenza spettrale e confronto con i precedenti risultati

La curva di sensibilità spettrale proposta da Brainard et al.^{xliii} e da Thapan et al^{xliiv} è stata sviluppata utilizzando sorgenti monocromatiche; i due ricercatori hanno selezionato lo stesso livello di soppressione della melatonina nel sangue (35% pari a



circa la metà del valore massimo da loro misurato) e hanno tracciato l'intensità relativa richiesta ad ogni lunghezza d'onda testata per ottenere il 35 % di riduzione del livello di melatonina nel sangue.

La conclusione sembra quindi essere che la maggiore soppressione della melatonina ottenuta dalla sorgente di minore emissione fotometrica, il LED, stia ad indicare l'esistenza di un meccanismo di opponenza e che gli studi fatti con sorgenti monocromatiche non possono essere generalizzati a normali sorgenti policromatiche utilizzate per l'illuminazione degli interni.

La verifica sperimentale dell'ipotizzato fenomeno dell'opponenza spettrale è stato oggetto di studi da parte del team di Rea^{xlv}: nello studio, alcuni uomini adulti sono stati esposti per 60 minuti a luce bianca, e di nuovo a quella stessa sorgente di luce con la componente gialla filtrata. In entrambe le condizioni, i soggetti risultavano esposti alla stessa quantità di luce blu. Il test è stato condotto durante la notte, con un monitoraggio del livello della melatonina nel sangue dei soggetti interessati, durante le esposizioni alle diverse sorgenti luminose. I ricercatori hanno scoperto che la soppressione notturna della melatonina è stata maggiore quando la luce gialla è stata filtrata. Dai risultati ottenuti, si è visto che una maggior quantità di luce (sorgente senza filtro) è stata meno efficace sul sistema circadiano nella soppressione della melatonina, rispetto alla stimolazione con banda del giallo arrestata, supportando l'ipotesi di opponenza spettrale quale caratteristica fondamentale di come la retina umana converte la luce in segnali neurali nel sistema circadiano umano.

Il primo modello di foto-trasformazione che tenesse in conto del meccanismo di opponenza spettrale è stato presentato da Rea ed al nel 2005^{xlvi}. Il modello si basa sulla sintesi di una vasta gamma di letteratura di neuroanatomia, elettrofisiologia, e psicofisica, e molto risalto è stato dato ai risultati ottenuti nella predizione della riduzione della melatonina nel sangue.

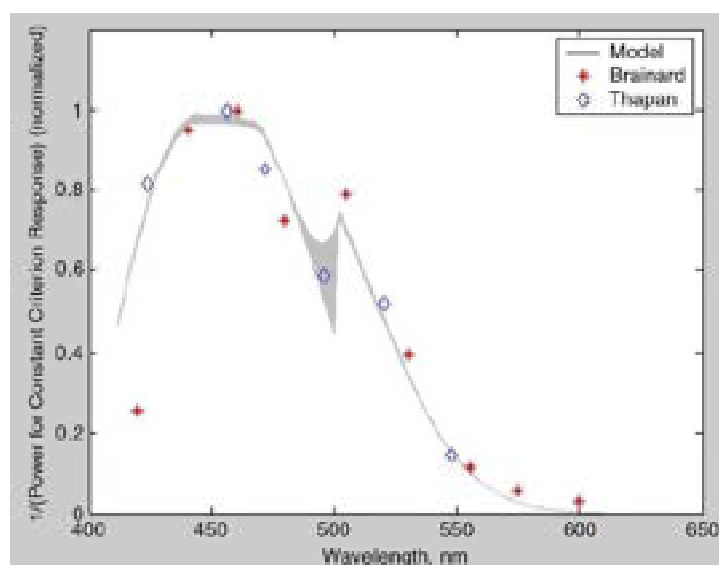


Figura 4 Predizione del modello proposto da Rea assumendo il criterio della riduzione del 35% della melatonina nel sangue Confronto tra la predizione fornita dal modello di Rea e i dati di Brainard e Thapan



La Figura 4 mostra lo sensibilità spettrale dell'attività circadiana ottenuta dal modello proposto da Rea; il modello è stato testato dallo stesso autore confrontando i dati di predizione con i risultati sperimentali ricavati utilizzando un gruppo di soggetti esposti a differenti livelli di illuminamento prodotti da due sorgenti policromatiche (lampade fluorescenti da 4.100K e 8.000K), mostrando un buon accordo tra valore di predizione e percentuale di soppressione della melatonina nel sangue.

La Figura 5 mette in relazione la previsione della soppressione della melatonina nel sangue con il livello di illuminamento per le due sorgenti esaminate: sullo stesso grafico sono poi riportati i valori di soppressione della melatonina misurati sui soggetti partecipanti al test in funzione del livello di illuminamento sulla retina.

Le curve continue sono state ottenute utilizzando la funzione logistica a 4 parametri proposta da Zeitner et al, che modella l'andamento della soppressione della melatonina dal livello di soglia a quello di saturazione^{xlvii}.

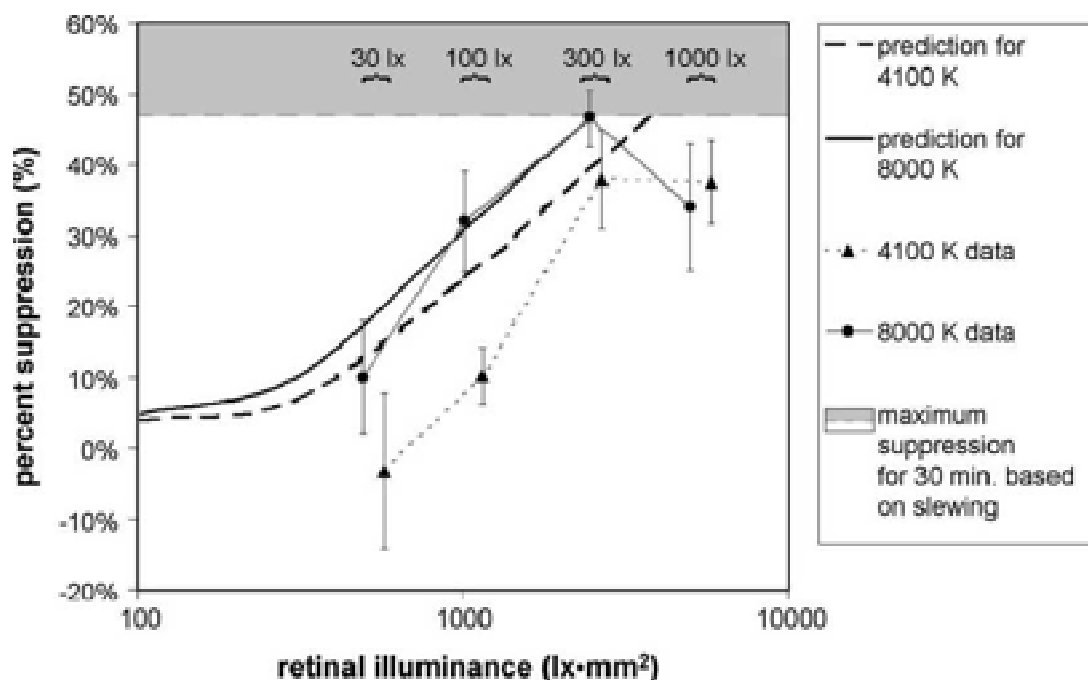


Figura 5 Predizione della soppressione della melatonina per 8 condizioni di illuminazione. La predizione è basata su (a) calcolo dello stimolo circadiano usando il modello di Rea (model circadian Phototransduction) (b) funzione logistica a 4 parametri di Zeiter al (c) ipotesi di slew rate della soppressione della melatonina indotta dalla luce (McIntyre et al^{xlviii}).

Sulla base di quanto riportato nella Figura 5, si possono fare alcune osservazioni:

- per la lampada da 8.000K, il modello proposto da Rea fornisce una buona predizione della percentuale di soppressione della melatonina.
- Il modello predice correttamente i valori più elevati di illuminamento fotopico per la soppressione della melatonina in corrispondenza della lampada da 4.100K
- Il modello sovrastima la soppressione della melatonina per valori di illuminamento pari a 100 lx del 15 % circa, pari all'incertezza della determinazione della soppressione della melatonina (valore di letteratura) .
- A 300 lux, per lampade a 4.100K la soppressione della melatonina è ben predetta.



- e) Differenze notevoli si registrano tra la predizione e i valori empirici a circa 1000 lx; occorre infatti tenere conto che l'osservazione dei dati pubblicati (Mc Intyre et al), mostra una riduzione della melatonina nel sangue con un fattore di diminuzione (slew rate) di approssimativamente 1.5% al minuto raggiungendo un livello asintotico dopo 30-60 minuti; la velocità appare indipendente dal livello di esposizione alla luce. L'area grigia sopra la figura rappresenta un ipotetico tetto alla soppressione della melatonina dopo 30 minuti di esposizione, indipendentemente dal suo livello, considerando un fattore di diminuzione di 1.5% al minuto. Assumendo questo valore, si può stimare una riduzione della soppressione della melatonina nel sangue di circa 45%-50% dopo 30 minuti di esposizione. Anche tenendo conto di questo ipotetico fattore di diminuzione il livello di melatonina nel sangue stimato appare ancora troppo elevato confrontato con quello misurato; la spiegazione fornita dagli autori consiste nel fatto che i soggetti sottoposti al test hanno manifestato un certo fastidio quando esposti a valori così elevati di illuminamento e hanno risposto con fenomeni incontrollati di strizzamento degli occhi, che hanno ridotto il valore di illuminamento sulla retina rispetto a quello stimato dalle misure fotometriche e sulla dimensione della pupilla.

5 Sorgenti con effetto circadiano

Se applichiamo il modello di Rea et al alle sorgenti utilizzate nel lighting design, scopriamo che una luce bianca, se comparata con una luce blu, è relativamente povera di stimolazione per il sistema circadiano; di conseguenza valori relativamente alti di luce bianca sono necessari per stimolare il sistema circadiano, che per contro risulta sollecitato da relativamente bassi livelli di luce blu. Il modello di foto-trasduzione proposto da Rea^{xlix} è il primo tentativo di ottenere una misura delle performance di una sorgente luminosa dal punto di vista circadiano; vorrebbe essere in altre parole il duale (stimolo circadiano su watt) per il sistema circadiano, del numero di lumen per watt assorbiti per il sistema visivo.

La Tabella 2, mostra il valore dello stimolo circadiano prodotto per watt assorbito, in funzione dei più diffusi tipi di sorgenti presenti sul mercato; dall'analisi della tabella, si osserva, che a parità di potenza assorbita, una lampada fluorescente da 7.500K è circa 3 volte più efficiente di una lampada fluorescente da 3.000K della stessa potenza, a parità di esposizione allo stimolo luminoso. Le due lampade, in termini di performance visive, producono invece lo stesso flusso luminoso¹.

Tabella 2 Lumen/W fotopici e stimolo circadiano per watt, per diversi tipi di sorgenti luminose. Lo stimolo circadiano è stato calcolato utilizzando il modello di Rea et al. (2005)

| <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 |

Nel futuro è possibile ipotizzare che i nuovi standard di progetto degli impianti, lo sviluppo di nuove sorgenti luminose, terranno conto sia aspetti visivi sia di quelli circadiani con il fine ultimo di progettare e realizzare impianti energeticamente efficienti.

6 Altri fattori della luce che influenzano il sistema circadiano

Altri aspetti legati alla dipendenza del sistema circadiano dalla luce possono così riassumersi:

- Il sistema circadiano è largamente insensibile alla distribuzione spaziale della luce anche se la parte inferiore della retina appare molto più sensibile alla luce rispetto alla parte superiore^{li}, l'aspetto dell'immagine percepita è quindi indifferente, ma la luce che proviene dall'alto è più efficace nella stimolazione del sistema circadiano.
- Il sistema circadiano è differenzialmente sensibile alla luce in dipendenza all'ora del giorno^{lii,liii}.
- Il sistema circadiano ha nell'uomo una soglia di attivazione molto più elevata rispetto a quella del sistema visivo. Richiede quindi più luce bianca artificiale di quella normalmente necessaria per la visione.
- Nell'uomo la soppressione della melatonina nel sangue attraverso la luce richiede una esposizione allo stimolo luminoso di almeno 10-15 min^{xlvi}.
- Stimoli luminosi più brillanti comportano una rapida riduzione del livello di melatonina rispetto a stimoli luminosi meno intensi^{18,liv}.

La Figura 6, mostra 3 differenti livelli di soppressione della melatonina nel sangue (25%, 40% e 50%), e il legame tra illuminamento sull'occhio e l'intervallo di tempo a cui deve essere fatta la misura per ottenere quel livello di riduzione. Di particolare interesse il dato del 25% di soppressione che può essere raggiunto dopo soli 20 minuti ad un livello di illuminamento maggiore di 1000 lux; se il livello di illuminamento decresce a 500 lx, occorre attendere quasi un'ora per avere una riduzione del 25% della melatonina nel sangue.

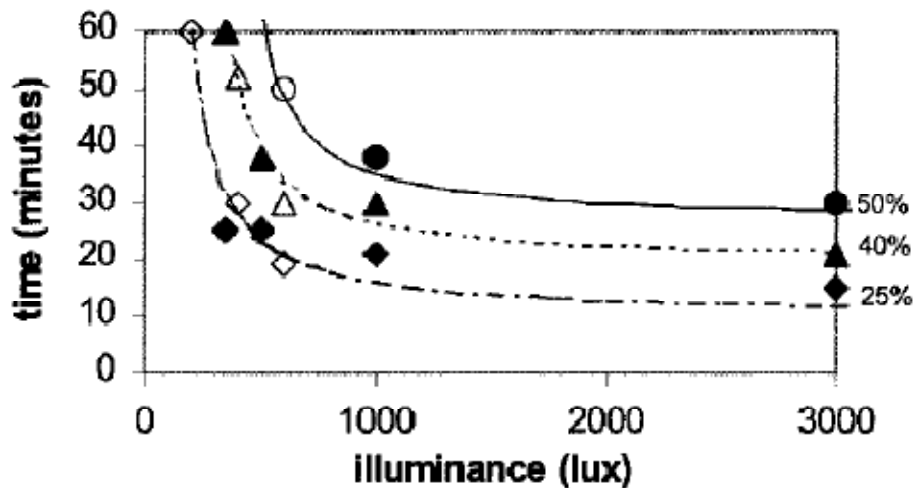


Figura 6 Grafico che mostra la quantità di tempo di esposizione allo stimolo luminoso, necessaria per la soppressione della melatonina notturna nel sangue, per diversi livelli di illuminamento all'altezza dell'occhio.

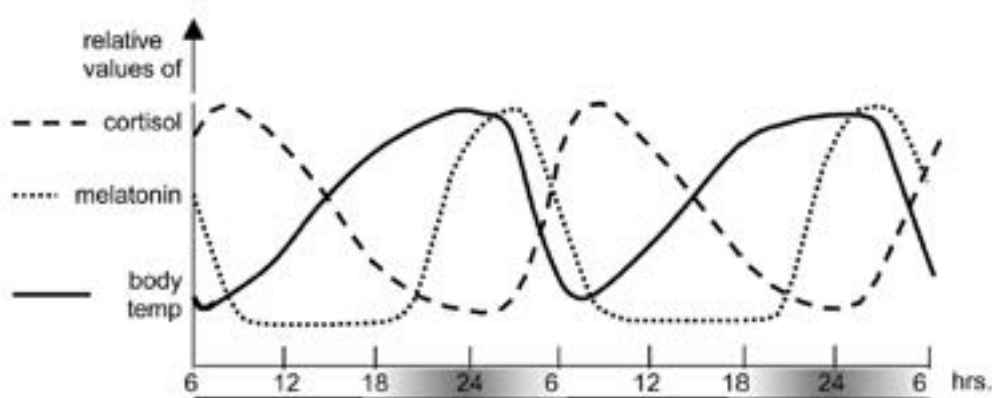


Figura 7 cicli della melatonina, cortisolo e temperatura corporea

Un altro aspetto posto in risalto da Van Bommel è la relazione esistente tra i cicli della melatonina, del cortisolo e della temperatura corporea (Figura 7). Il cortisolo, noto anche come ormone dello stress, contribuisce ad aumentare gli zuccheri disponibili nel sangue (e quindi l'energia disponibile), l'efficienza del sistema immunitario e protegge dalle infiammazioni.

6.1 Aspetti temporali della stimolazione luminosa del sistema circadiano

Gli aspetti temporali della luce che possono influire sul sistema circadiano sono sostanzialmente tre: la temporizzazione (o pattern della esposizione luminosa), la durata dello stimolo e la storia della esposizione luminosa.

In merito agli aspetti di temporizzazione della illuminazione rispetto al sistema circadiano possiamo osservare che una luce adeguata e perdurante può sfasare il ritmo



circadiano in avanti o in ritardo. In particolare una luce brillante al risveglio favorisce l'abbattimento della melatonina e sembrerebbe quindi favorire un generale aumento delle performance. La stessa luce alla sera avrebbe l'effetto di ritardare la produzione della melatonina, il ritmo circadiano e quindi la propensione al rilassamento e al sonno. Altri esperimenti mostrano la propensione dei soggetti ad avere una forte illuminazione dopo pranzo, probabilmente per contrastare gli effetti della sonnolenza post-prandiale, è stato rilevato che questo effetto è reale ma non pare strettamente correlato con i livelli di melatonina e la CIE sottolinea che sarebbe uno degli aspetti da approfondire tramite una serie di esperimenti finalizzati a valutare i livelli di stimolazione realmente misurabili. In questo senso gli effetti che l'illuminazione artificiale può indurre sul sistema circadiano sono minori in presenza della luce diurna, anche se questo può dipendere da fattori climatici e geografici. Gli effetti di una luce artificiale adeguata di notte sono invece significativi nell'abbattimento della melatonina, nella stimolazione dello stato di allerta e delle prestazioni, mentre non sembrano avere effetti positivi sull'umore come invece può avvenire di giorno. La CIE evidenzia peraltro la difficoltà attuale della ricerca a definire un metodo univoco per la definizione delle prestazioni lavorative in funzione delle differenti tipologie di impieghi e compiti visivi e intellettivi previsti.

La domanda che ci si deve porre rispetto a questi risultati è: quale effetto si desidera ottenere in definitiva sul ritmo circadiano? Se questo deve essere un effetto terapeutico, più semplicemente finalizzato al benessere o adatto per situazioni di lavoro e controllo estreme. Nel caso delle persone che soffrono di disturbi del sonno una illuminazione adeguata può contribuire a rifasare adeguatamente il ritmo circadiano. Nel caso della volontà consapevole di voler favorire le prestazioni individuali o il rilassamento l'intenzione non è volta alla modifica del ritmo ma semmai ad una sua amplificazione o riduzione in alcuni periodi della giornata.

Un aspetto che è stato dimostrato inequivocabilmente nelle ricerche presentate nei paragrafi precedenti è che la durata della stimolazione luminosa necessaria ad influire sul sistema circadiano è sicuramente maggiore rispetto a quella necessaria per influire sul sistema visivo. Questo perché oltre al tempo necessario a trasmettere gli impulsi nervosi al nucleo soprachiasmatico c'è il tempo di produzione della melatonina da parte della ghiandola pineale e della distribuzione dell'ormone nel sangue e ricezione da parte degli organi corporei coinvolti. Gli esperimenti di Lewy^{xi} hanno mostrato che la variazione della melatonina nel sangue avviene entro 10 minuti dalla esposizione a luce adeguata. Mentre il ritorno ai livelli precedenti (tipicamente notturni) di melatonina ematica avviene entro 15 minuti dalla eliminazione della stimolazione luminosa^{xlvi,lii}. Non sono state condotte analisi di variazione della melatonina ad intervalli di tempo inferiore ed è plausibile supporre che sarebbe inutile farlo vista l'inerzia del processo di produzione, distribuzione e ricezione della melatonina nel corpo. Gli esperimenti di McIntyre hanno dimostrato che impulsi di luce brillante sono più efficienti nella soppressione della melatonina rispetto ad impulsi più deboli e questo è in linea con gli altri esperimenti che hanno dimostrato che il sistema circadiano dipende dalla quantità di luce. In merito alla questione della variazione dinamica della luce Hut^{lv} ha analizzato gli aspetti di variazione temporale della illuminazione osservando che variazioni a gradino (improvvisi) sono più efficaci di variazioni graduali per la soppressione della melatonina.



Per le lampade a scarica negli interni la CIE sconsiglia l'utilizzo di alimentatori elettromagnetici che operano alla frequenza di rete (50-60Hz), e consiglia l'utilizzo di alimentatori elettronici che operano ad una frequenza di 40 kHz. Questo perché il sistema nervoso umano appare sensibile alle basse frequenze di oscillazione della illuminazione che può essere un fattore di stress in molti soggetti e avrebbe anche degli effetti negativi sulle prestazioni lavorative.

7 Introduzione alla fotometria circadiana

Nel 2001, sono stati pubblicate una serie di dati e ricerche riguardanti un nuovo tipo di fotorecettore presente nella retina; la stimolazione di questo fotorecettore influenza la produzione di un ormone, la melatonina, il cui livello nel sangue varia durante il giorno secondo un ciclo detto circadiano. Il ritmo circadiano è un ritmo innato e risulta fortemente influenzato dall'esposizione dei soggetti alla luce con il risultato di sincronizzare alcuni dei più importanti ritmi biologici, come il sonno-veglia, il ciclo giorno-notte.

Quando la quantità di luce diminuisce, come nelle giornate invernali, si possono registrare dei fenomeni di disordine del ciclo circadiano, con un aumento del livello di melatonina nel sangue e con stati di depressione, chiamati sindrome da depressione stagionale (S.A.D.).

Nota la risposta spettrale dei ricettori alle radiazioni di diverse lunghezze d'onda, è stato possibile ottenere una curva di efficienza spettrale circadiana $c(\lambda)$, di cui si tratterà con maggiore dettaglio nei paragrafi successivi.

Si osserva che il modello di risposta circadiana, a cui si fa riferimento nei paragrafi successivi, è quello proposto da Gall, anche se risulta, come discusso nel paragrafo "6.1.3 Aspetti fisiologici", quello meno corretto dal punto di vista della fisiologia (non si tiene conto del fenomeno dell'opponenza, fondamentale per una corretta valutazione delle sorgenti policromatiche).

La motivazione della scelta è dovuta al fatto che il modello di Rea, non consente di definire a priori una curva di sensibilità circadiana, ma il fattore CS (livello di soppressione della melatonina nel sangue) risulta quindi strettamente dipendente dalla particolare distribuzione spettrale della sorgente.

7.1 Le grandezze radiometriche circadiane^{lv}

Il flusso Φ_c può essere definito per mezzo dell'equazione (1), che contiene il valore K_m , che rappresenta il valore massimo di efficienza spettrale pari a 683 lm/W, mentre il simbolo $\Phi_{e,\lambda}$ rappresenta la distribuzione spettrale del flusso radiante.

$$\phi_c = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{e,\lambda} c(\lambda) d\lambda \quad [\text{lm}_c] \quad (1)$$

In generale, il valore della costante K è posto uguale a 1, e ciò significa che Φ_c è espresso in watt effettivi, anche se in molti lavori si è preferito introdurre una nuova unità di misura, il flusso luminoso circadiano, indicata con lm_c



Accettando questo modo di ragionare, è quindi possibile introdurre anche le altre grandezze mutuete dall'illuminotecnica, come ad esempio l'illuminamento circadiano E_c e la luminanza circadiana L_c , definite nel modo seguente:

$$E_c = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda} c(\lambda) d\lambda \quad [\text{lx}_c]$$

$$L_c = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{e,\lambda} c(\lambda) d\lambda \quad [\text{cd}_c \cdot \text{m}^{-2}]$$

Basandosi sulla definizione della funzione circadiana $c(\lambda)$ è possibile definire una metrica circadiana e derivare un metodi di misura per i sistemi di illuminazione. Grazie all'utilizzo del fattore di azione circadiano, a_{cv} è possibile ottenere le grandezze circadiane a partire da quelle fotometriche; questo coefficiente descrive l'efficienza circadiana dei vari colori e può essere misurato con diversi metodi:

- attraverso misure spettrali
- per mezzo di strumenti adattati secondo la curva $c(\lambda)$
- come prima approssimazione attraverso la standard matching function CIE $\bar{z}(\lambda)$

Risulta quindi possibile valutare l'attività circadiana di diversi sistemi di illuminazione e sorgenti presenti sul mercato, attraverso la misura del fattore $a_{cv}(\lambda)$. Basandosi sui risultati sperimentali di Braihard e Thapan, riguardo la soppressione della melatonina indotta dalle diverse lunghezze d'onda dello stimolo luminoso, è possibile definire una curva di attività circadiana $c(\lambda)$, rappresentata alla Figura 8.

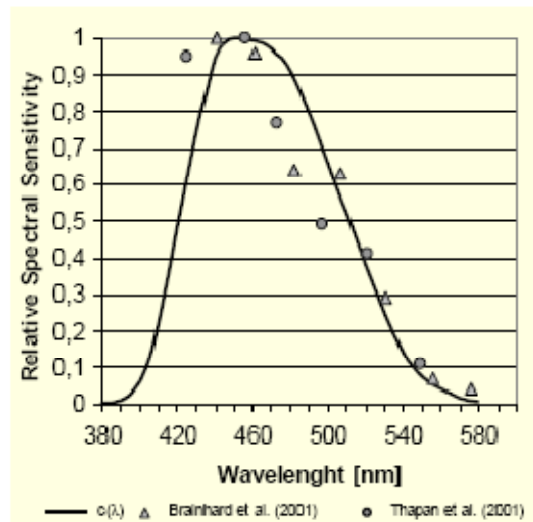


Figura 8 Curva media circadiana $c(\lambda)$ proposta da Gall

Mediante l'utilizzo di tale curva, è possibile definire le grandezze circadiane, attraverso la seguente relazione:

$$X_{ec} = K \int X_{e,\lambda}(\lambda) c(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

con $K=1$



Il fattore di attività circadiana è definito dal rapporto tra l'integrale (1) e la corrispondente grandezza fotometrica

$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

La relazione che lega grandezze circadiane e fotometriche, risulta quindi:

$$X_{ec} = \frac{a_{cv}}{K_m} X_v \quad (3)$$

Dove $K_m=683 \text{ lm/W}$

7.2 Metodi di misura

I metodi di misura dei valori a_{cv} , come già ricordato nel paragrafo xxx, possono essere essenzialmente tre:

- calcolo a partire dallo spettro della sorgente; a partire dalla distribuzione spettrale, ad esempio irradianza spettrale, attraverso le relazioni (2) e (3), vengono calcolate le corrispondenti grandezze circadiane.
- misura integrale a partire da un detector adattato secondo la curva $c(\lambda)$. Una possibile soluzione di questo tipo di misura, proposta in letteratura da Gall, consiste nell'utilizzo di un video fotometro portatile in combinazione con un filtro per ottenere un adattamento della risposta spettrale dello strumento alla curva di sensibilità circadiana $c(\lambda)$, come mostrato nella Figura 9.

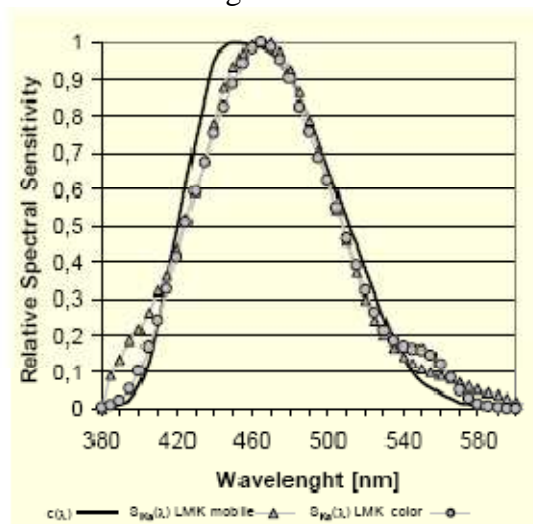


Figura 9 Sensibilità spettrale del canale del blu del video fotometro LMK e dello stesso strumento equipaggiato con filtro $c(\lambda)$

La Tabella 3 mostra i valori assunti della curva $c(\lambda)$, in funzione della lunghezza d'onda (380-580 nm).



Tabella 3 Valori numerici della curva $c(\lambda)$ in funzione della lunghezza d'onda

| λ | $c(\lambda)$ | λ | $c(\lambda)$ | λ | $c(\lambda)$ | λ | $c(\lambda)$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 380 | 0.002 | 435 | 0.85 | 490 | 0.793 | 545 | 0.101 |
| 385 | 0.004 | 440 | 0.949 | 495 | 0.727 | 550 | 0.073 |
| 390 | 0.011 | 445 | 0.987 | 500 | 0.658 | 555 | 0.055 |
| 395 | 0.024 | 450 | 1 | 505 | 0.588 | 560 | 0.04 |
| 400 | 0.063 | 455 | 0.997 | 510 | 0.517 | 565 | 0.027 |
| 405 | 0.128 | 460 | 0.994 | 515 | 0.447 | 570 | 0.017 |
| 410 | 0.231 | 465 | 0.987 | 520 | 0.378 | 575 | 0.011 |
| 415 | 0.355 | 470 | 0.972 | 525 | 0.312 | 580 | 0.007 |
| 420 | 0.486 | 475 | 0.946 | 530 | 0.249 | | |
| 425 | 0.615 | 480 | 0.907 | 535 | 0.192 | | |
| 430 | 0.737 | 485 | 0.854 | 540 | 0.142 | | |

La Figura 10 mostra un esempio di misura effettuato con il sistema sopra descritto; si può osservare la distribuzione dei valori di attività circadiana nell'area di misura, rappresentati attraverso una scala a falsi colori.

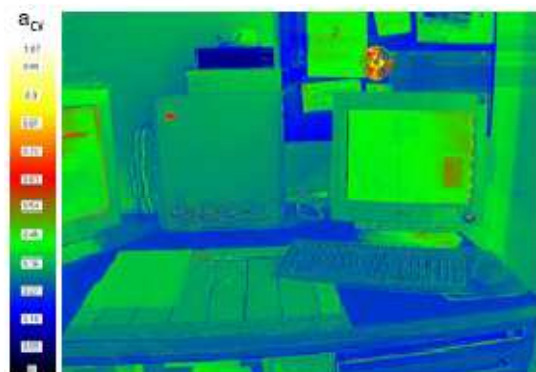


Figura 10 Esempio di distribuzione dei valori di attività circadiana a_{cv} nel campo di misura

Un metodo alternativo e sicuramente più economico, consiste nell'approssimare la funzione $c(\lambda)$, attraverso la funzione color matching function CIE $\bar{z}(\lambda)$; in questo modo dei colorimetri tristimolo possono essere impiegati per la misura di a_{cv} .

Le grandezze fotometriche possono essere misurate con il medesimo strumento, utilizzando il rivelatore corretto con il filtro Y.

La Figura 11 mostra il confronto tra la color matching function CIE $\bar{z}(\lambda)$ e la curva $c(\lambda)$

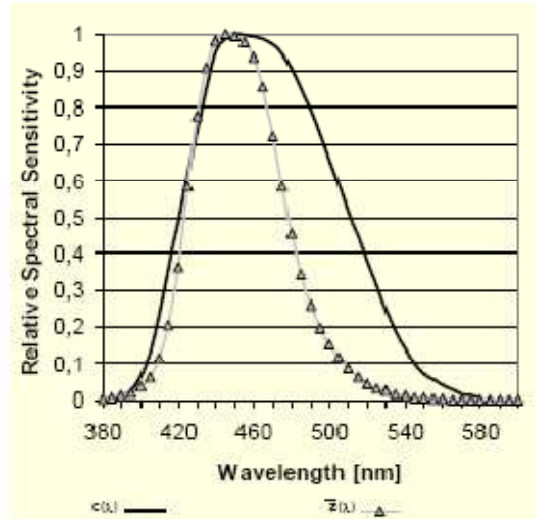


Figura 11 Confronto tra color matching function CIE e curva $c(\lambda)$

In prima approssimazione, il valore di a_{cv} , può essere calcolato attraverso la seguente relazione:

$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{z}{y} = \frac{1-x-y}{y} \quad (4)$$

La Figura 12 mostra sul digramma cromatico CIE xy, le linee con lo stesso valore di attività circadiana, al variare di quest'ultimo tra 0.3 e 16.7. Il digramma fornisce un metodo pratico e molto rapido per valutare l'attività circadiana connessa al colore di una sorgente luminosa.

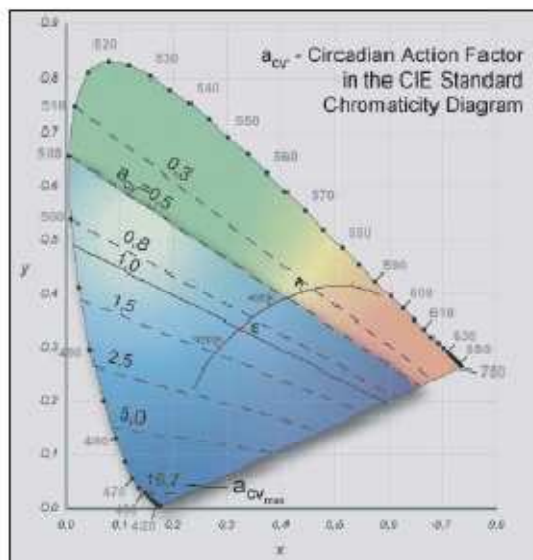


Figura 12 Valori a_{cv} nel digramma cromatico CIE xy



Risulta anche possibile mettere in relazione i valori della temperatura di colore con i valori a_{cv} , come risulta evidente dalla Figura 13.

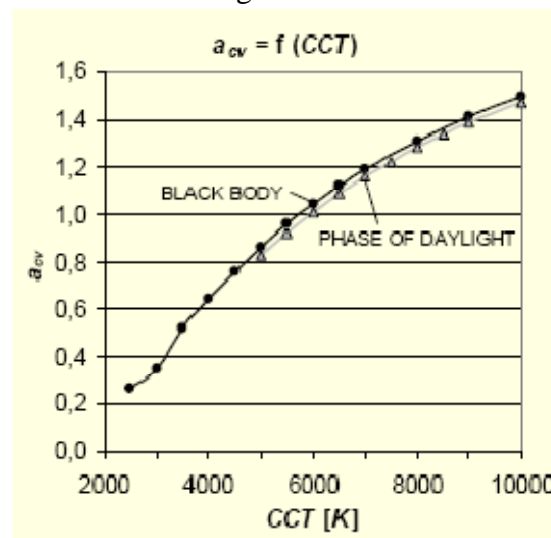


Figura 13 Fattore di attività circadiana in funzione delle temperatura correlata di colore (CCT)

La dipendenza del fattore di attività circadiana dalle sorgenti, normalmente impiegate nel campo della illuminazione, sono mostrati nella Tabella 4; i valori riportati non sono rappresentativi, ma servono a mostrare le differenze quantitative tra una sorgente di illuminazione ed un'altra.

Tabella 4 Valore del coefficiente di attivazione circadiana per diversi tipi di sorgenti luminose

| Light Sources | acv-Value |
|-----------------------------------|-----------|
| direct sun 5081 K | 0,76 |
| blue sky 19963 K | 1,49 |
| cloudy sky 5924 K | 0,88 |
| incandescent lamp 2800 K | 0,35 |
| HMI 3640 K neutral white,ceramics | 0,39 |
| sodium lamp 2770K | 0,28 |
| Fluorescent Lamps | |
| warm white 2827 K | 0,31 |
| neutral white 3678 K | 0,52 |
| Basic DAYLIGHT 765 6750K | 0,85 |
| LUMILUX DAYLIGHT 865 6400K | 0,80 |
| DELUXE BIOLUX 965 6500K | 0,94 |
| LUMILUX SKYWHITE 880 | 1,00 |



| | |
|--|---------|
| 8000K | |
| "Truelite" 5600 K | 0,76 |
| Light-Emitting Diodes | |
| LED blue $\lambda_{\max}=468\text{nm}$ | 6,9 |
| LED white | 1,05..2 |
| Maximum (monochromatic 460 nm) | 26,3 |



8 Indice di stimolazione circadiana proposto da Rea

La Figura 14 mostra un modello semplificato dell'occhio umano come strumento ottico; la figura mostra la dipendenza dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente sulla trasmittanza dalla cornea alla retina e l'assorbimento della retina.

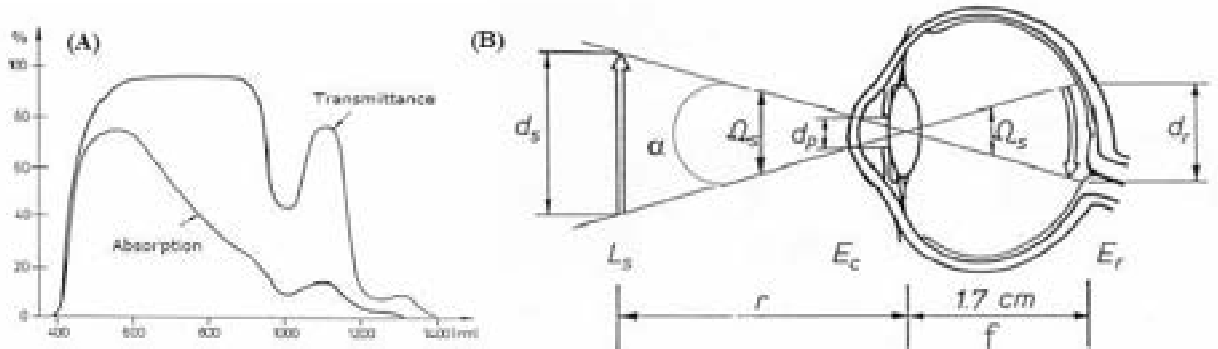


Figura 14 Trasmittanza della radiazione ottica dalla cornea alla retina e assorbimento della retina. B sistema visivo come strumento ottico

Il valore di trasmittanza è molto importante per valutare il valore di irradianza sulla retina, quello di assorbimento è importante per valutare il massimo valore dello stimolo luminoso prima che si abbia danneggiamento della retina stessa.

Il legame tra irradianza della retina E_r , e la radianza della sorgente L_s , è espresso dalla seguente relazione³:

$$E_r = \frac{\pi d_p \tau}{4 f^2} L_s \cos(\theta) = \frac{A_p \tau}{f^2} L_s \cos(\theta)$$

Dove

L_s : radianza della sorgente

P_r : potenza sulla retina

τ : trasmittanza della lente

d_p : diametro della pupilla

f : lunghezza focale, stimata essere 1,7 cm

E_r : irradianza sulla retina

A_p : Area della pupilla

θ : angolo tra la direzione di osservazione e la normale alla superficie, espresso in gradi

Si osservi che il valore di illuminamento sulla retina è indipendente dalla distanza della sorgente, ma dipende solo dalla dimensione della pupilla, dalla luminanza della sorgente e dalla distanza focale dell'occhio.

Le dimensioni (diametro) della sorgente sulla retina, può essere calcolata semplicemente:

$$d_r = d_s \frac{f}{r} = \alpha * f$$

dove:

d_r : dimensione dell'immagine sulla retina

d_s : dimensione della sorgente

f : lunghezza focale stimata essere pari a circa 1,7 cm

³ Derivata dalla relazione proposta da Smith e Atchinson, 1997



r: distanza tra la sorgente e la lente

α : angolo sotteso alla sorgente

Le dimensioni dell'immagine sulla retina dipende dalla distanza tra la sorgente e la lente; in altre parole l'irradianza sulla retina può essere differente anche quando l'irradianza corneale è la stessa.

Angoli sottesi più ampi, producono valori di irradianza più piccoli e valori di α più piccoli producono di conseguenza valori di irradianza più elevati. Questo è il motivo per cui l'irradianza della cornea (o il corrispondente valore di illuminamento) deve essere sempre controllata, attraverso filtri neutri o allontanando la sorgente dagli occhi, quando si conducono esperimenti sulla risposta circadiana, dal momento che quest'ultima dipende dal valore di irradianza sulla retina del soggetto.

A partire dall'illuminamento retinico calcolato con le relazioni precedenti è possibile determinare il valore di irradianza spettrale sulla retina, tendo conto delle caratteristiche di trasmissione spettrale dell'occhio e delle sue proprietà ottiche (dimensione immagine della sorgente sulla retina)⁴.

A partire da questo valore è possibile valutare il valore dell'indice di stimolazione circadiana proposto da Rea⁵, in funzione dei livelli di illuminamento della cornea, ottenuti in diverse ore della giornata.

La misura inizia con la determinazione della luminanza della scena (espressa in cd/m^2) relativamente al compito visivo di interesse, e a questo scopo si presta molto bene l'utilizzo di una immagine di luminanza su cui deve essere individuato il compito visivo di interesse.

Uno spettro radiometro, con adattatore per la valutazione del valore di irradianza spettrale, misura il valore di irradianza spettrale ad altezza dell'occhio, limitando il suo campo di accettazione al solo compito visivo.

Il diametro della pupilla, necessario al calcolo dell'indice, dipende dalla media pesata delle luminanze all'interno del campo visivo, il suo valore dipende maggiormente dalle zone centrali del campo visivo piuttosto (zona foveale), piuttosto che da quelle periferiche.

Il fenomeno dell'accomodamento si ha quando il soggetto deve osservare un oggetto vicino e la pupilla diventerà più piccola; ad esempio se la luminanza è mantenuta costante e l'oggetto si avvicina da 100 a 33 cm, diametro medio della pupilla si riduce del 15% (Alpern, Mason and Jardinico, 1961).

La Figura 15, mostra il legame tra diametro della pupilla, in mm^2 e luminanza dell'oggetto, espressa in millilambert (per ottenere le cd/m^2) è sufficiente moltiplicare i valori desunti dal grafico per 3.183098862

⁴ Il semplice modello di calcolo proposto non tiene conto della distribuzione del flusso luminoso sulla retina né la distribuzione dei diversi fotoricettori su di essa; non si può quindi escludere che la stessa distribuzione spettrale proveniente da direzioni differenti (es. dall'alto o dal basso) possa avere effetti diversi sul sistema circadiano umano.

⁵ Mark S Rea*, Mariana G Figueiro, Andrew Bierman and John D Bullough, "Circadian light", Journal of Circadian Rhythms 2010, 8:2

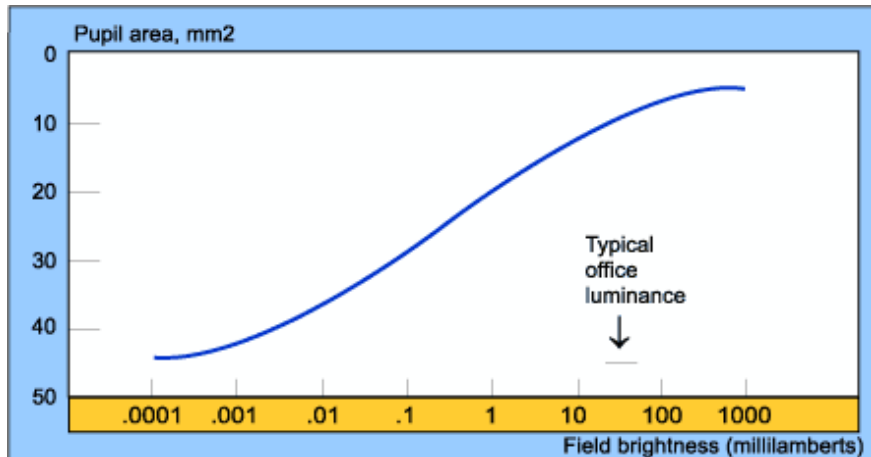


Figura 15 Legame tra area della pupilla in mm^2 e luminanza del campo visivo

Una relazione empirica che lega il diametro della pupilla al valore della brillantezza (in millilambert) risulta essere la seguente De Groot et al. :^{vii}

$$\log d = 0.8558 - 0.00401(\log B + 8.1)^3$$

La stessa relazione (diametro della pupilla d vs luminanza della scena L), in cui il valore di luminanza risulta espresso in cd/m^2

$$\log d = 0.8558 - 0.00401(\log L + 8.6)^3$$

Altri autori sostengono un legame tra area della pupilla e luminanza della sorgente di tipo tangente iperbolica⁶, che tenesse conto del fatto che per valori elevati di luminanza il valore stimato del diametro della pupilla non tenda asintoticamente a zero .

$$d = 4.77 - [2.44 * \tanh (0.3 * \log_{10} L_s)]$$

Dove

d : diametro della pupilla stimato, espresso in mm^2

L_s : luminanza della sorgente, in cd/m^2

⁶ M. Rea, M. J. Ouellette, "Relative visual performance: a basis for application", Lighting Resource & Technology, 23,3, pp. 135-144, 1991-09-01

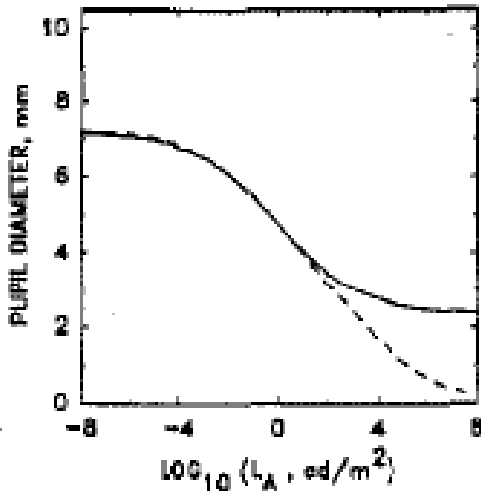


Figura 16 Valore previsto del diametro della pupilla in funzione della luminanza fototipica della sorgente. L'andamento a tratto continuo indica la relazione proposta da DeGroot, in tratteggio quella di Rea e Ouellette, che per elevati valori di L_s (L_A nella figura) non fa tendere a zero il diametro della pupilla.

Stiles and Craford, hanno mostrato come più un raggio luminoso si allontani dal centro della pupilla, tanto meno efficiente risulta per l'illuminazione della retina; la relazione tra flusso effettivo per ogni tipo di pupilla di raggio r e D è la densità del flusso luminoso alla pupilla (assunto costante per una pupilla uniformemente illuminata)²⁰:

$$R = (1 - 0.0425r^2 + 0.00067r^4)$$

r : raggio della pupilla

R : riduzione di flusso dovuta all'effetto Stiles and Craford

La Figura 17 mostra la dipendenza dalla lunghezza d'onda della trasmittanza del sistema ottico umano; la trasmittanza dei neonati è all'incirca costante per tutto lo spettro del visibile e non sia ha quindi una stretta dipendenza dalla lunghezza d'onda; nella fascia d'età tra i 20-29 anni la trasmittanza della parte blu dello spettro risulta leggermente attenuata, mentre nella fascia d'età tra 60-65 anni la diminuzione della trasmittanza nella banda del blu è significativa dovuta ad un ingiallimento della lente⁷. Nella visione, il cervello provvede a compensare l'attenuazione in questa banda dello spettro del visibile, in modo tale che la percezione del mondo non appaia meno carica di blu per le persone anziane.

⁷ F. Baker, Brainard GC, "The direct spectral transmittance of excised human lens as function of age", FDA 785345 0090 RA, US Food and Drug Administration: Washinton DC

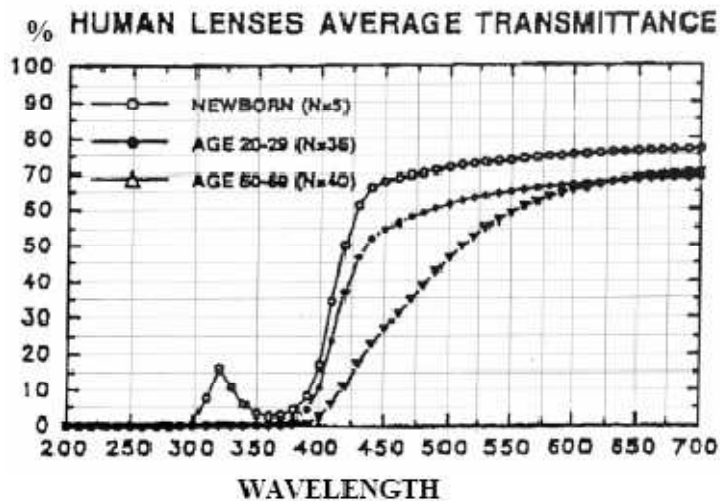


Figura 17 Trasmittanza media del sistema ottico umano per differenti fasce di età, in funzione della lunghezza d'onda

Un esempio di elaborazione e di calcolo del fattore circadiano, è illustrata nel seguito; si è supposto che l'ambiente sia illuminato da una sorgente a led, il cui spettro è riportato alla Figura 18.

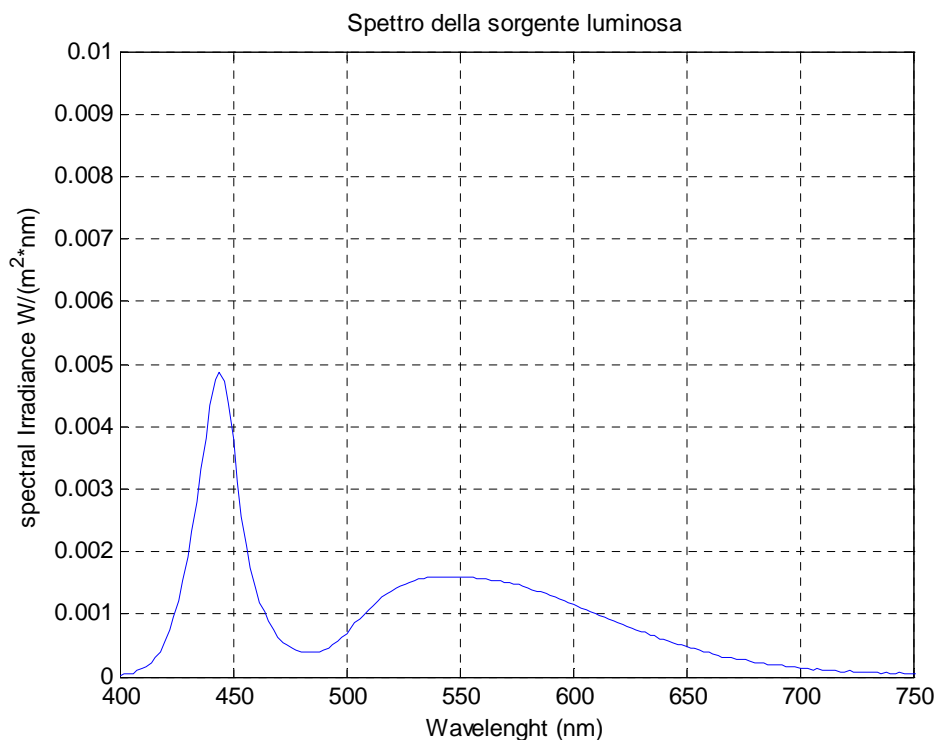


Figura 18 Spettro della sorgente luminosa utilizzato

Si è supposto che il soggetto abbia un'età compresa tra 20 e 29, per cui il fattore di trasmittanza spettrale è riportato alla Figura 19.

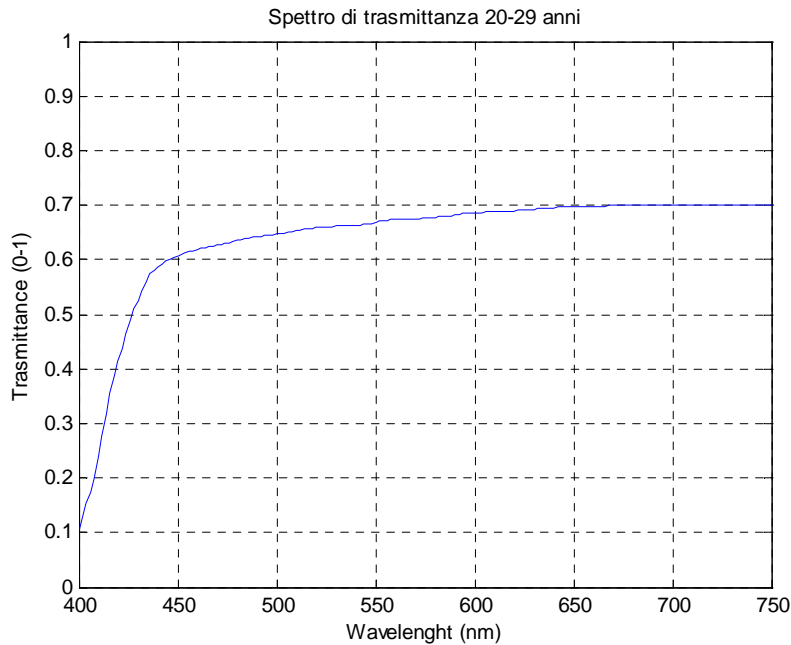


Figura 19 Spettro di trasmittanza del soggetto tra 20-29 anni

Supponendo che l'angolo sotteso dal compito visivo sia pari a 0.2 radianti (corrispondente a una sorgente del diametro di 1.20 m osservata alla distanza di 6 m), il valore del fattore di stimolazione circadiana CS per diversi valori dell'illuminamento della cornea⁸ (tra 10 lux e 100000 lux), sono riportati nel grafico della Figura 20⁹.

⁸ I valori di illuminamento alla cornea si devono intendere come prodotti unicamente dalla sorgente considerata, variandone i corrispondenti valori di luminanza.

⁹ Elaborazione dei dati tramite programma in Matlab sviluppato al Politecnico di Milano. Il programma è stato scritto per valutare la stimolazione circadiana prodotta da apparecchi di illuminazione in esterno, dove il soggetto è sottoposto all'effetto prodotto della luminanza dell'apparecchio o della sorgente luminosa.

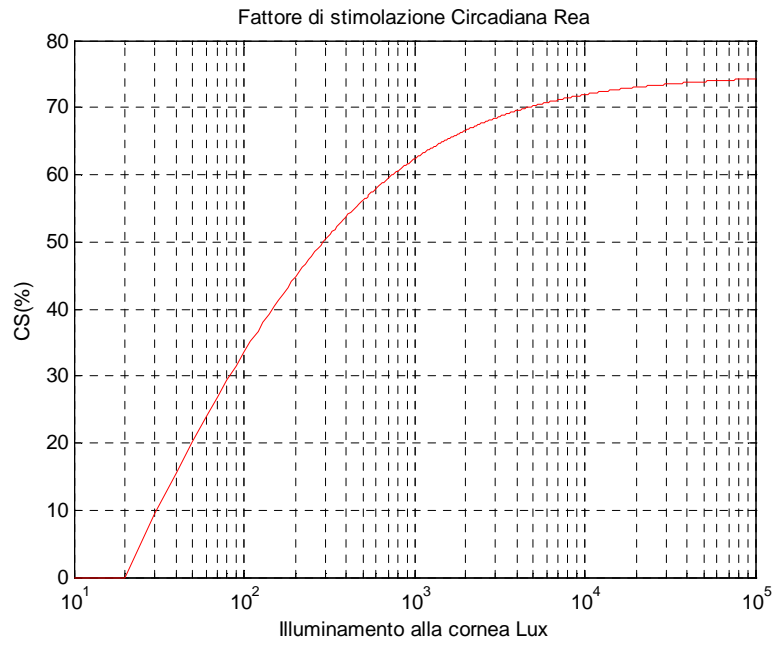


Figura 20 Legame tra fattore di stimolazione circadiana e illuminamento alla cornea prodotto da un compito visivo osservato con un angolo di 0.2 radianti.



9 Caratteristiche tecniche del video fotometro LMK 2000

Le caratteristiche tecniche della fotocamera sono riportate alla [Tabella 5](#); in particolare sono descritte le caratteristiche tecniche del sensore, dell'ottica, i parametri di misura e le specifiche relative all'interfaccia di collegamento al PC.

L'immagine registrata dalla fotocamera dipende da 3 fattori:

- il contenuto fisico della scena
- la luce incidente sulle superfici e materiali della scena
- le caratteristiche del sistema di ripresa (in termini di risposta spettrale della matrice di CCD, filtraggio dell'ottica, non linearità dovute al sensore o all'elettronica asservita).

Tabella 5 Caratteristiche tecniche del sistema di misura della luminanza basati su fotocamera LMK 2000

| | |
|---|--|
| Sensor | |
| CCD | Sony ICX 085 AK |
| Resolution (effective pixels) | 1280 (H) * 1024 (V) |
| Pixel ratio | 6.7 μ m * 6.7 μ m |
| Sensor area | 8.71 (H) * 6.90 (V) mm ² (2/3") |
| Scanning regime | Progressive Scan |
| Luminance resolution | 640 (H) * 512 (V) |
| Video signal | 10 bit digital |
| Resolution at single point (dynamics range) | single measurement: 1:500 HighDyn-measurement: 1:50 000 |
| Lens D-Vario-Apogon | |
| Focal length | Zoom 10 ... 30 mm |
| Image field angle | 2 ω = 82° x 69° (f = 10mm) 2 ω = 32° x 26° (f = 30mm) |
| Measuring distance | autofocus up to 60cm manually: 7cm up to ∞ (f = 10mm) 2cm up to ∞ (f = 30mm) |
| Aperture | hole apertures: k = 2,8; 4,0; 5,6; 8,0; 11 |
| Measuring parameters | |
| Measuring range (full-scale point) | 3 ... 200.000 cd/m ² |
| Selection of measuring range | via setting of integration time and aperture |
| V (λ)-visual correction | numerical linear transformation from R,G,B-sensor data |
| Measuring variations ¹ | halogen, D85... <5% fluorescent lamp, MHN-T... <10% |
| Influence of surrounding luminance (DIN 5032) | f _{2,u} < 1,5 % |
| Calibration uncertainty | < 3 % |
| Fields of application | preferably for field measurements |

Lo strumento è dotato di 3 differenti modalità di scatto, che possono essere settate per mezzo di una manopola posta sul dorso della fotocamera.

La tabella riporta le modalità di funzionamento dello strumento e il corrispondente tipo di esposizione.



Tabella 6 Modalità di scatto e di integrazione

| <i>Modalità di scatto</i> | <i>Selezione del tempo di integrazione</i> | <i>Tipo di esposizione</i> |
|---------------------------|--|---|
| Pfast | Automatico | Scatto singolo (macchina fotografica usuale) |
| Pslow | Automatico | Serie di immagini con selezione del tempo di infrazione iniziale |
| Man | Manual | Serie di immagini con selezione manuale del tempo di integrazione di partenza |

Nelle modalità *Pslow* e *Man* viene creata dalla fotocamera una serie di 5 immagini, utilizzando differenti tempi di esposizione; lo strumento scatta al massimo 5 fotogrammi che possono venire poi ‘combinati’ tra loro per ottenere una immagine ad alta dinamica.

Le immagini sono identificate da un nome file PICTYXXX.rdc, dove XXX specifica il numero della serie di immagini, mentre Y il numero dello scatto all’interno della serie. L’immagine contrassegnata con Y=0, corrisponde a quella immagine che sarebbe stata ottenuta nella modalità *Pfast* e di solito è l’immagine più adatta per essere utilizzata come una comune fotografia (a causa della scelta del tempo di esposizione).

Per il calcolo dei valori di luminanza, lo strumento utilizza una media pesata dei valori relativi al canale del rosso, verde, blu, ricavati dalla matrice CCD a colori di cui è dotata la fotocamera.

Se analizziamo la matrice del CCD, possiamo identificare la presenza di una macro cella, composta da due pixel verdi, un pixel rosso e uno verde (Figura 21).

Il sensore CCD, per sua natura, non è sensibile in modo selettivo alla luce incidente, affinché un determinato pixel sia sensibile alla banda del rosso, verde e blu, è necessario inserire un filtro colorato, senza il quale avremmo la semplice registrazione dei livelli di luminanza della scena inquadrata.



Sensor Architecture

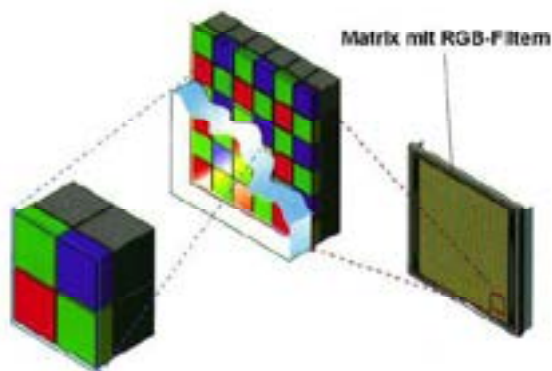
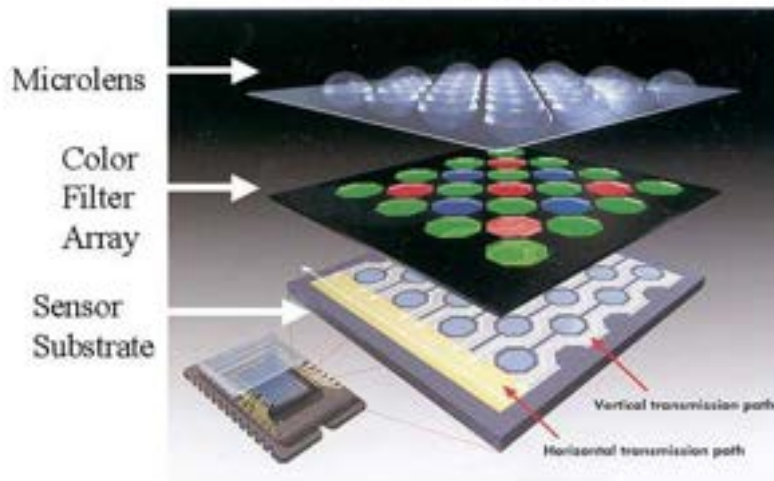


Figura 21 Matrice colori sul chip utilizzato dalla fotocamera [AGFA]

Come si nota in [Figura 21](#), c'è una predominanza di pixel verdi, in quanto l'occhio è più sensibile ai dettagli della scena in questa banda del visibile. La stessa figura mostra la classica disposizione di Bayer, ovvero con il rapporto di due pixel verdi ogni quattro. La dimensione della mappa di luminanza, ottenibile dallo strumento è di 650x515 pixels.

L'adattamento spettrale alla $V(\lambda)$, non viene realizzato per mezzo di un filtro, ma attraverso una media pesata dei valori dei tre pixel; i valori di questi tre coefficienti sono stati settati in fabbrica assumendo come illuminante di riferimento l'illuminante A (approssimativamente un corpo nero alla temperatura correlata di colore di 2856K). I coefficienti con cui vengono pesate le tre risposte, risultano i seguenti: 0.33 per canale del rosso, 1 per quello del verde, -0.1 per il Blu.

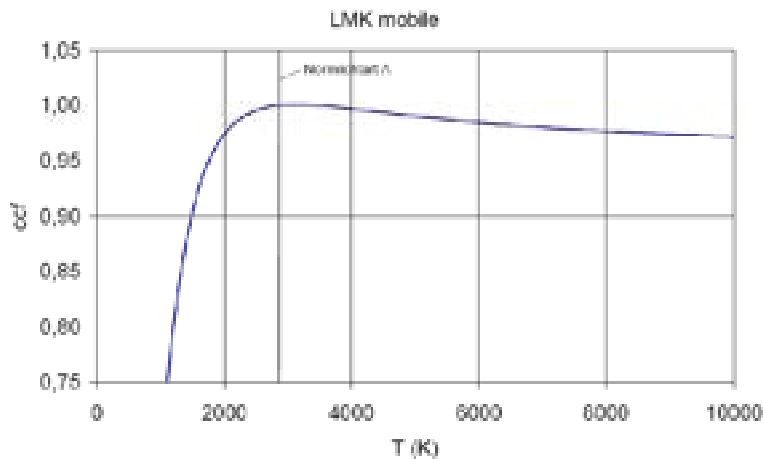
Da questa constatazione, ne consegue che la misura di scene illuminate con sorgenti aventi differenti distribuzioni spettrali, può portare a errori anche significativi; a tale scopo il costruttore fornisce un fattore di correzione da inserire nel programma di gestione ed albo ragione della misura, per tenere conto delle possibili differenti distribuzioni spettrali (**Tabella 7**).



Tabella 7 Fattore di correzione in funzione della natura della sorgente luminosa utilizzata all'interno della scena

| Light source | Halogen | MHN-T | D65 | DULUX | Fluorescent lamp |
|-------------------------|---------|-------|------|-------|------------------|
| Correction factor (ccf) | 0.996 | 1.074 | 1.00 | 1.108 | 1.125 |

L'andamento del fattore di correzione in funzione della temperatura del corpo nero, è illustrato nel seguente diagramma, dove con una linea verticale è indicata la posizione dell'illuminante A, utilizzato nella fase di calibrazione dello strumento.



La Figura 21, illustra la matrice RGB utilizzata dallo strumento.

9.1 Caratterizzazione spettrale della risposta del video fotometro

Nel corso della ricerca è stato implementato un metodo per la stima della risposta spettrale della fotocamera a partire dalla conoscenza della distribuzione spettrale di ingresso e della risposta del sensore CCD.^{lviii,lx}

La procedura utilizzata consente di tenere conto anche della eventuale non linearità della fotocamera: un metodo di linearizzazione della risposta viene applicato contemporaneamente alla procedura di stima della sensibilità spettrale di un dato canale.

Lo scopo finale del presente lavoro, è quello di ottenere un'immagine a falsi colori che rappresenti la distribuzione del fattore di attivazione circadiano (a_{cv}) all'interno della scena inquadrata.

Passiamo a descrivere in dettaglio il metodo utilizzato per ricavare la risposta spettrale della fotocamera.

Il primo passo è stato quello di stimare la risposta spettrale della fotocamera per ciascuno dei tre canali.

Il primo approccio al problema è stato quello di misurare un certo numero di spettri in ingresso e le corrispondenti risposte della fotocamera. Detti $r^{(k)}$ i vettori i cui elementi sono le risposte linea rizzate della fotocamera (cioè le risposte a cui è stata applicata la stima della funzione $F^{(k)}$) e L la matrice contenete gli spettri corrispondenti dei campioni misurati, possiamo scrivere la semplice relazione, per ciascuno dei tre canali ($k=1,2,3$):



$$r^{(k)} = LR^{(k)}$$

L'equazione precedente può essere risolta moltiplicando entrambi i membri per la matrice pseudo-inversa di L.

Il procedimento descritto, sebbene corretto dal punto di vista matematico, porta a risultati del tutto insoddisfacenti a causa del fatto che la matrice L è 'rank-deficient' a causa del rumore connesso alla misura e la stima ottenuta risulta quindi essere molto sensibile al rumore con la conseguenza che la risposta del sensore tende a presentare ampi picchi e valori negativi per lunghi tratti (**Figura 22**).

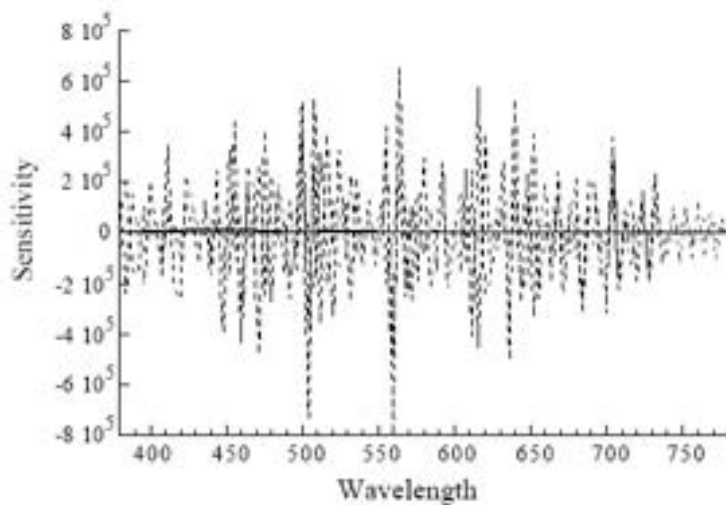


Figura 22 Risposta del sensore ricostruita utilizzando il metodo della pseudo inversa applicato ai dati lineari rizzati. Il metodo minimizza l'errore, ma non tiene in conto nessun altro parametro. Dal momento che la matrice L può essere 'rank-deficient', il metodo ricostruisce prevalentemente la dinamica del rumore al posto di quella del segnale. La risposta del sensore ricostruita, risulta non corretta.

Occorre quindi utilizzare un metodo di stima alternativo¹⁰.

Si supponga inizialmente che la funzione $F^{(k)}$, sia stata applicata alla matrice che contiene le triplette RGB, rilevate in corrispondenza di ciascuno spettro acquisito (di cui conosco esattamente la distribuzione nel campo del visibile, perché è stata campionata mediante spettro radiometro).

Detto N il numero degli spettri campione, ed S la matrice (N-2,N) delle derivate seconde, possiamo scrivere:

$$S = \begin{vmatrix} -1 & 2 & -1 & & & \\ & -1 & 2 & -1 & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & -1 & 2 & -1 \end{vmatrix}$$

¹⁰ Kobus Barnard, Brian Funt, "Camera characterization for color research", Color Research and Application © copyright 2001 (John Wiley & Sons, Inc.)



Detta L ($N \times M$) la matrice che ha come righe le misure spettrali e come colonne le lunghezze d'onda esplorate (M), indicato con k il canale da stimare ($k=1,2,3$), occorre quindi risolvere la seguente relazione matriciale, soggetta a vincoli lineari di cui si parlerà in seguito, minimizzando l'errore quadratico medio relativo.

$$\begin{vmatrix} L_{rel} \\ -\lambda S \end{vmatrix} \mathbf{R}^{(k)} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Il vettore $\mathbf{R}^{(k)}$ ($M \times 1$) indica la risposta stimata del canale k della fotocamera per M lunghezze d'onda dello spettro del visibile.

La parte superiore della matrice a primo membro indica l'errore relativo, mentre la parte inferiore della matrice di sinistra rappresenta il termine di smoothness, λ specifica il peso relativo attribuito ai due contributi.

La matrice L_{rel} , si ottiene dalla matrice L , attraverso la seguente relazione:

$$L_{rel} = (diag(\mathbf{r}^{(k)}))^{-1} \bullet L$$

Dove

\mathbf{r}^k è il vettore colonna che contiene i valori **rgb** della fotocamera linearizzati (cioè ai valori osservati dalla fotocamera occorre applicare la funzione $F^{(k)}$) misurati in corrispondenza di ciascuna riga della matrice degli spettri L .

Il vincolo utilizzato nel processo di ottimizzazione è uno solo:

$$R^{(k)} \geq 0$$

A tale proposito, si osserva che non avrebbe significato fisico, una curva di sensibilità spettrale con valori negativi.

Il metodo proposto può essere convenientemente modificato in modo da ottenere la stima della funzione non lineare $F^{(k)}$ contemporaneamente alla stima della funzione $R^{(k)}$, dal momento che i dati contengono anche le informazioni per la stima di $F^{(k)}$.

Supponendo di poter approssimare il comportamento non lineare della fotocamera con una semplice espressione parametrica, si ha:

$$F^{(k)}(x) = x - a_0^{(k)} - a_1^{(k)} e^{-C_k(x-b_k)}$$

Dove

b_k : valore di buio della fotocamera per ciascuno dei tre canali ($k=1,2,3$), ottenuto scattando una fotografia con tappo sull'obiettivo

C_k : costante trovata per tentativi, responsabile dei fenomeni di saturazione per i bassi e altri valori

a_0 ed a_1 : valore di offset e pendenza del tratto approssimabile a un andamento lineare.

I coefficienti a_i saranno determinati durante il processo di ottimizzazione.

L'equazione matriciale precedente, può essere quindi sostituita con la seguente:



$$\left| \begin{array}{c|cc} L_{rel} & \mathbf{1} & e^{-C_k(\mathbf{r}^{(k)} - b_k)} \\ & \mathbf{r}^{(k)} & \mathbf{r}^{(k)} \\ \hline \lambda S & 0 & 0 \end{array} \right| \bullet \left| \begin{array}{c} \mathbf{R}^{(k)} \\ a_0^{(k)} \\ a_1^{(k)} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \mathbf{1} \\ 0 \end{array} \right|$$

I vincoli di ottimizzazione rimangono quelli precedenti, ma il vettore $\mathbf{r}^{(k)}$, dovrà contenere i valori rgb misurati dalla fotocamera, al posto di quelli linearizzati, come accadeva nel caso precedente.

9.2 Problema della calibrazione e utilizzo di dati surrogati

Per utilizzare l'algoritmo descritto nel precedente paragrafo, occorre disporre dei dati di calibrazione; a tale scopo è stato costruito un box di calibrazione, che verrà descritto nel seguito.

Al fine di testare l'implementazione dell'algoritmo, sono stati utilizzati dei dati resi disponibili su internet¹¹ relativi alla fotocamera Sony DXC-930 (<http://www.cs.sfu.ca/~colour/data/>).

I dati utilizzati si riferiscono a un color checker fissato su un tavolo di traslazione controllata da un calcolatore; gli strumenti sono stati fissati entrambi sullo stesso cavalletto in modo tale che gli assi di misura risultino paralleli. Durante le acquisizioni, si è tenuto conto del fatto che la camera e lo strumento sono disallineati tra loro (il cavalletto è stato alzato e abbassato per tenere conto del disallineamento tra i due strumenti ed è stata acquisita l'intera scacchiera a livello di scatti fotografici, prima di acquisirne gli spettri corrispondenti).

Il color checker è stato illuminato con 26 differenti illuminanti\ combinazioni di filtri. Dal set di misure eseguite sono state eliminate quelle che hanno prodotto un clipping sulla macchina fotografica.

L'illuminamento di ciascuna patch del color checker deve risultare il più uniforme possibile; su tutte le immagini acquisite è stata considerata una finestra centrale corrispondente alla zona di misura dello spettro radiometro. I pixel della finestra sono stati mediati tra di loro in modo da ottenere una sola tripletta di valori e più acquisizioni (circa 50) della stessa patch sono mediate tra loro per migliorare il rapporto segnale rumore.

Al fine di ridurre gli effetti della luce parassita, gli autori hanno introdotto uno schermo nero, in modo da lasciare visibile la sola zona di misura.

La fotocamera utilizzata dagli autori per il rilievo dei dati è una Sony DXC-930, dotata di sensore CCD a colori.

I risultati ottenuti applicando l'algoritmo descritto ai dati è riportato nelle figure che seguono (**Figura 23** e **Figura 24**). In particolare nella **Figura 23**, si può osservare la risposta spettrale dei tre sensori della fotocamera, mentre nella figura successiva è stata rappresentata la funzione ingresso uscita per il canale del blu: si osservano dei

¹¹Kobus Barnard, Lindsay Martin, Brian Funt, and Adam Coath, [A Data Set for Colour Research](#), Color Research and Application, Volume 27, Number 3, pp. 147-151, 2002.



fenomeni di non linearità per bassi valori del segnale di ingresso e un discreto valore di dark noise (si può misurare facilmente eseguendo una serie di scatti con il tappo sull'obiettivo della fotocamera e mediando tra di loro le acquisizioni rispetto a ciascun canale).

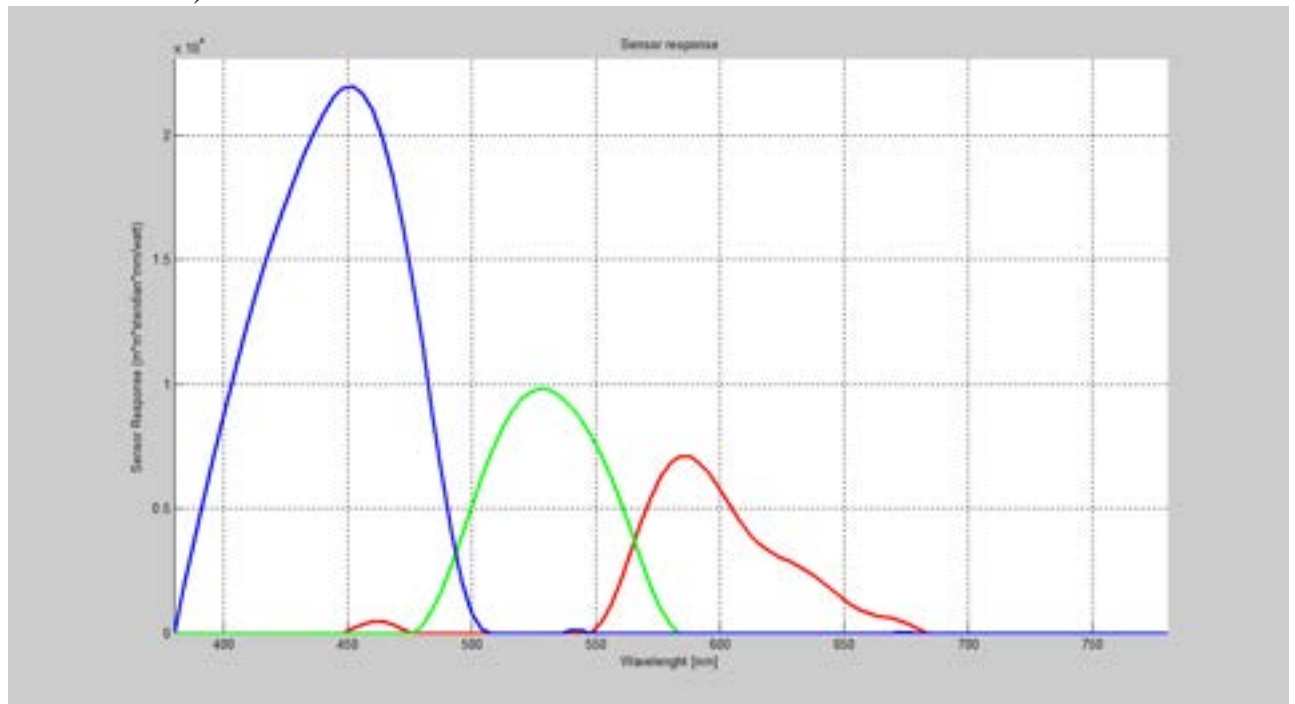


Figura 23 Stima delle risposte spettrali dei sensori della fotocamera, ottenute attraverso il metodo descritto. Il sensore del blu e del verde presentano una risposta non nulla all'esterno del picco centrale; tale comportamento può essere eliminato a patto di aggiungere un ulteriore vincolo al processo di minimizzazione (le risposte devono essere nulle al di fuori di un prefissato intervallo di lunghezze d'onda)

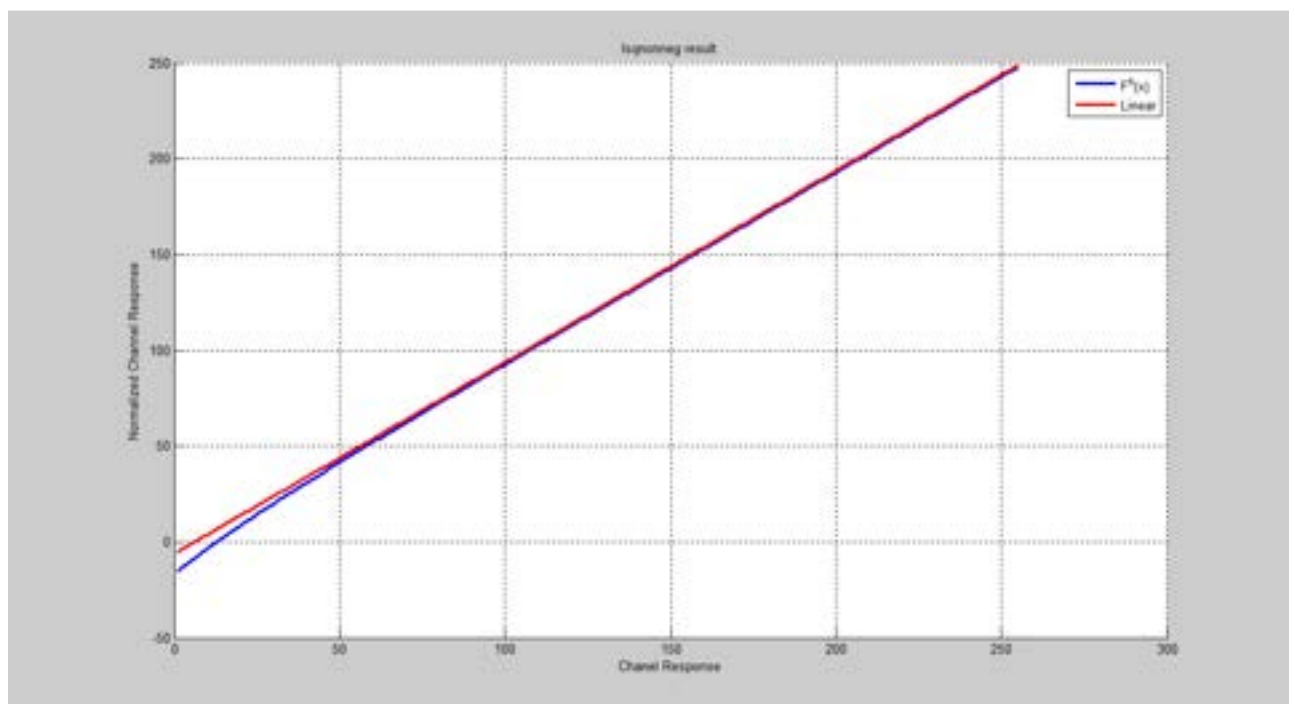




Figura 24 Rappresentazione del legame ingresso uscita per il canale del Blu e confronto con una caratteristica perfettamente lineare.

Il sistema di calibrazione realizzato è visibile alla Figura 25 risulta composto di tre parti principali:

- sistema di illuminazione, il primo dotato di lampade fluorescenti e incandescenza, il secondo dotato di LED a diverse temperature di colore (4500K e 8000K)
- sistema di posizionamento delle schede colorate
- schede colorate



Figura 25 Sistema di calibrazione realizzato

Il dispositivo di illuminazione consente di variare il livello di illuminazione sulla scheda (limitatamente alle lampade fluorescenti e alle sorgenti LED), mediante protocollo DALI per i sistemi fluorescenti o mediante il controllo della corrente di alimentazione dei LED.



Figura 26 Setup di misura utilizzato per la calibrazione dello strumento

Il setup di misura utilizzato per la calibrazione è quello visibile alla Figura 26; lo strumento utilizzato per le misure spettrali è lo spettro radiometro SpectraScan PR 701s con obiettivo standard MS 55. L'angolo di apertura dello strumento risulta pari a 0.5° e la sua distanza dal centro della scheda è pari a 1.78 m.

La distanza tra il video fotometro e il centro della scheda risulta pari a 1.50 m (valore che assicura la corretta messa a fuoco dello strumento e tale per cui la matrice CCD dello strumento risulta quasi completamente occupata dall'immagine della scheda).

Le tipologie di sorgenti utilizzate per la prova, risultano le seguenti:

- lampada alogena 12V 10W 3000K
- LED 4500K a 350 mA
- LED 8000K a 350 mA
- Fluorescente lineare bianca 14 W 827 (2700K $R_a > 80$)
- Fluorescente lineare rossa 14 W
- Fluorescente lineare blu 14 W
- Fluorescente lineare verde 14 W

Per ciascuna immagine ottenuta, è stato valutato il valore di luminanza al centro del fotogramma e messo in relazione con i valori di luminanza calcolati a partire dalla misura spettrale, come mostrato alla Figura 27 e alla Figura 28.

La stima dei canali ha utilizzato complessivamente 123 spettri, ottenuti dalla combinazione delle 7 sorgenti con cartoncini colorati.

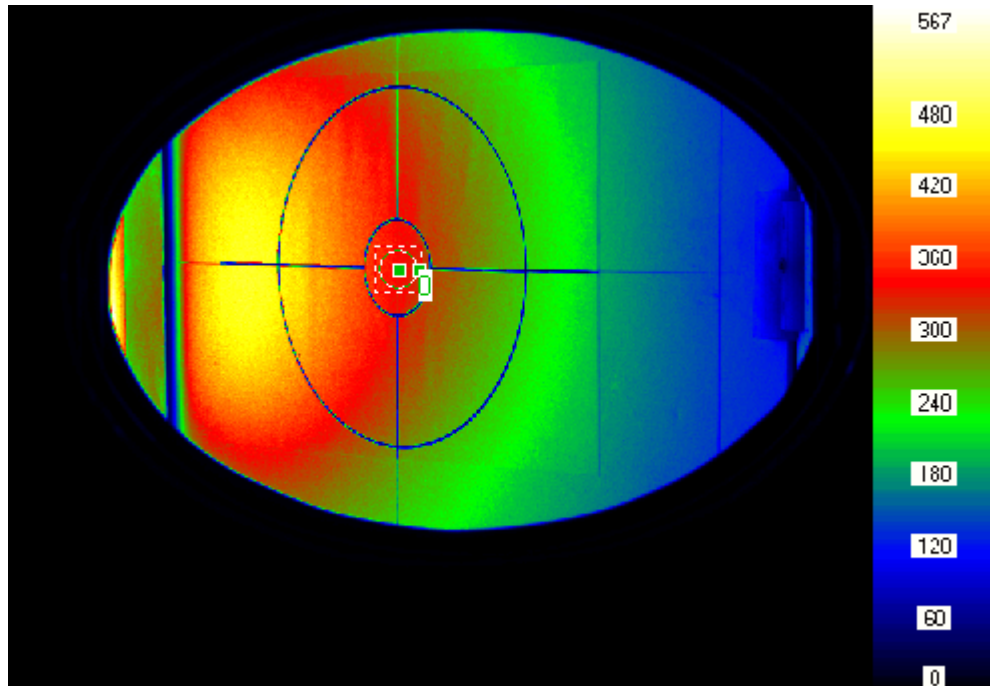


Figura 27 Immagine a falsi colori della scheda e indicazione della regione di misura della luminanza e dello spettro nel centro (cerchio in colore verde). La luminanza media nella regione di misura risulta pari a 339.3 cd/m^2 .

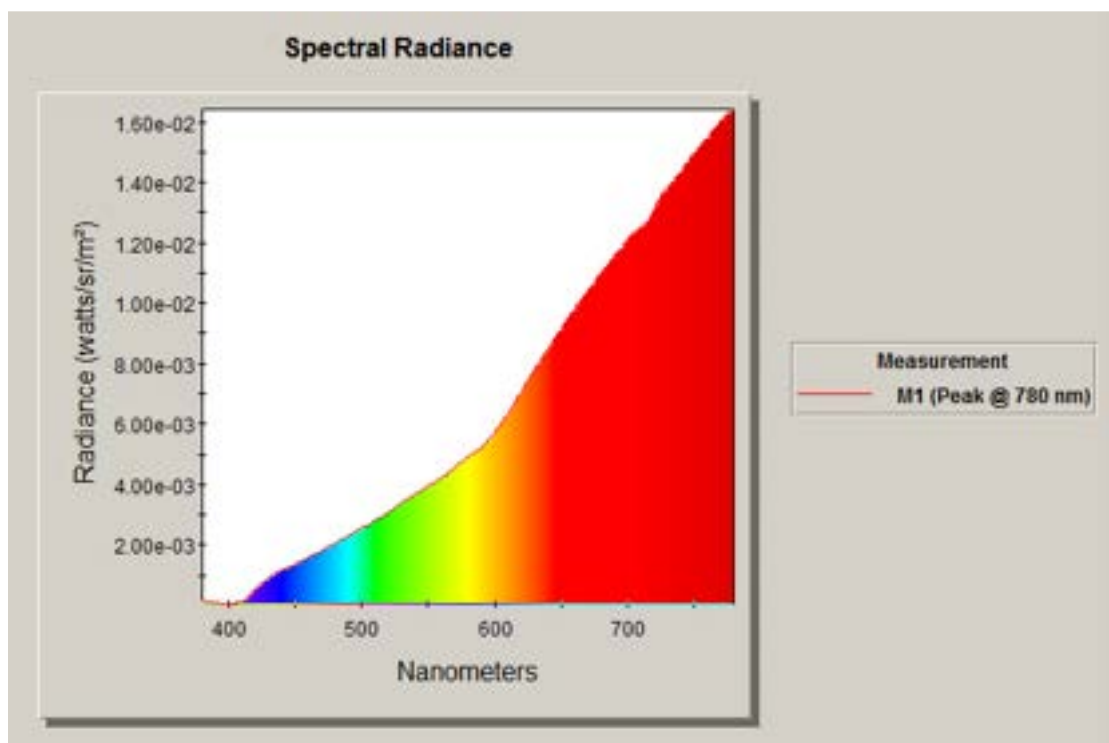


Figura 28 Spettro misurato sulla scheda corrispondente all'immagine a falsi colori . Il valore di luminanza calcolato a partire dallo spettro è pari a 327.5 cd/m^2 .



L'analisi preliminare della risposta del CCD fornita nel datasheet del costruttore, mostra che la risposta circadiana potrebbe essere approssimata con l'utilizzo del solo canale Blu della fotocamera.

La Figura 30 riporta la curva di calibrazione circadiana per il videofotometro LMK-2000, ottenuta dalla combinazione lineare delle curve di sensibilità relativa (Figura 29) per i canali R,G,B.

I valori dei pesi per i tre canali sono riportati alla Tabella 8.

Tabella 8 Pesi utilizzati nella combinazione lineare per la determinazione della grandezza circadiana

| <i>Red</i> | <i>Green</i> | <i>Blue</i> |
|-------------|--------------|-------------|
| 0.00 | 0.000 | 1.59 |

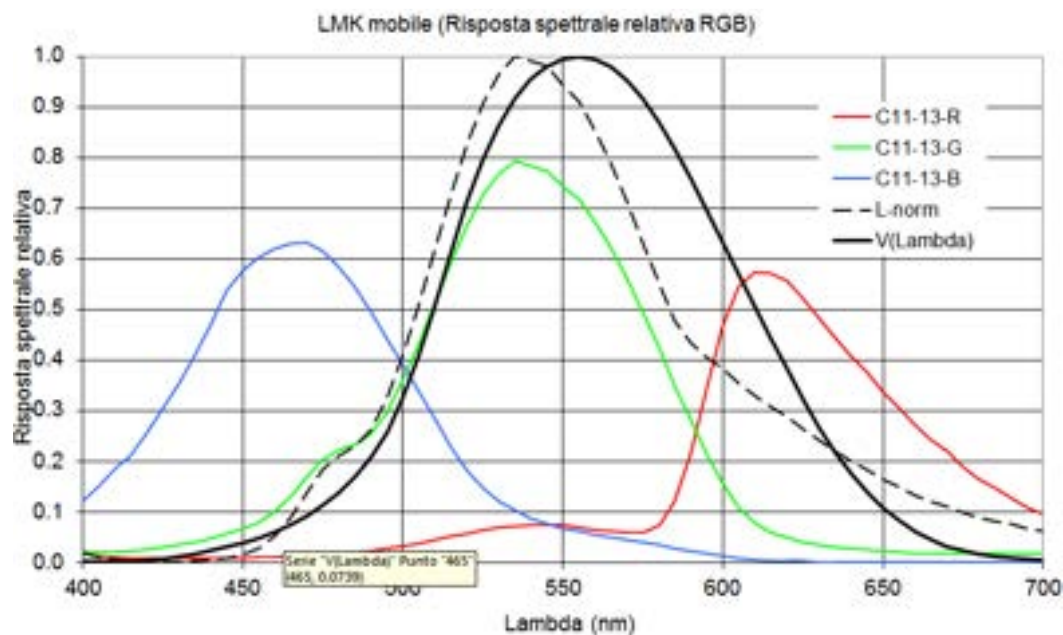


Figura 29 Curve risposta spettrale relativa dello strumento LMK 98

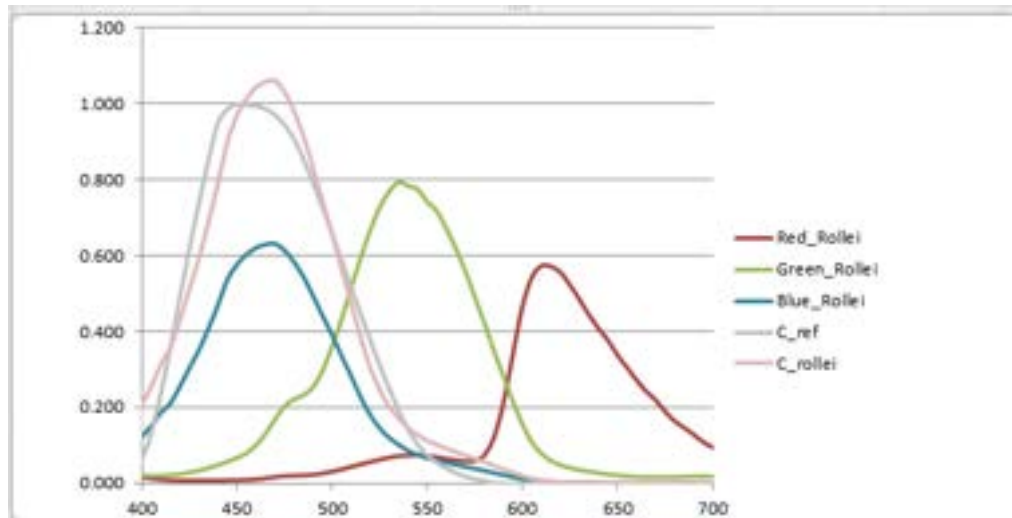


Figura 30 Confronto tra la curva di calibrazione circadiana definita in letteratura e quella ottenuta dalla combinazione lineare delle risposte dei 3 sensori RGB .

L'errore massimo stimato tra l'applicazione di una vera correzione spettrale circadiana e quella stimata è nell'ordine del 10-15% circa e dipende dalla composizione spettrale delle sorgenti luminose considerate¹².

Tale errore deve considerarsi del tutto normale, dal momento che curva di sensibilità dello strumento è stata determinata dalla combinazione lineare delle risposte dei singoli canali; migliori risultati potrebbero ottenersi con l'utilizzo di un filtro, opportunamente studiato, da interporre di fronte alla fotocamera.

La stima delle risposte spettrali dei singoli canali potrebbe essere ulteriormente affinata andando a considerare un maggior numero di campioni spettrali e diversi livelli di illuminamento delle schede a parità di spettro incidente

10 CA 2000 2D Color Analyzer

Le specifiche dello strumento utilizzato per la misura delle luminanza e per la valutazione della CCT nel campo di vista dell'utente del video terminale sono riportate alla Figura 31.

Le misure sono state condotte con lo strumento equipaggiato con obiettivo standard, il ciclo di misure è iniziato dopo 20' per la stabilizzazione della temperatura del CCD.

¹² Per lo spettro delle lampade fluorescenti della biblioteca l'errore nella valutazione della luminanza circadiana è pari a 2.87%



Main Specifications CA-2000

| Model | CA-2000S | CA-2000W | CA-2000T | | |
|---|---|--|--|----------------------------------|------------------------------------|
| Light receptor | CCD image sensor (monochrome); 2/3 inch, Effective number of pixels: 1,000 x 1,000 pixels; Equipped with XYZ filter (closely matches CIE 1931 color-matching function) and ND filter | | | | |
| Lens | Interchangeable (Standard, wide, and telephoto lens); low-magnification and high-magnification macro rings (for use with telephoto lens) | | | | |
| Measurement points (Resolution) | 600 x 600 (Available to select 400 x 400 or 196 x 196 by using Data Management Software CA-S20W) | | | | |
| Color indication modes | XYZ, L*a*b*, L*u*v*, Yuv, Dominant wavelength, Excitation purity, L _y contrast | | | | |
| Display modes | Pseudocolor, RGB image, Chromaticity diagram, Spot, 3D graph, Histogram, Nonuniformity enhancement, Cross section, Color difference, Multi-screen | | | | |
| Measurement sizes (length per side of square) (*1) | Standard lens | Wide lens | Telephoto lens | | |
| | Approx. 98 mm or more (depending on the distance) | Approx. 145 mm or more (depending on the distance) | Approx. 115 mm or more (depending on the distance) | Without magnification macro ring | With high-magnification macro ring |
| Measurable size for typical measurement distances (size/distance) | 98 mm / 250 mm Approx. | 145 mm / 200 mm Approx. | 115 mm / 600 mm Approx. | 57 mm / 500 mm Approx. (Fixed) | 27 mm / 200 mm Approx. (Fixed) |
| | 210 mm / 500 mm Approx. | 410 mm / 500 mm Approx. | 275 mm / 2,000 mm Approx. | | |
| | 440 mm / 1,000 mm Approx. | 850 mm / 1,000 mm Approx. | 420 mm / 2,000 mm Approx. | | |
| Measurement luminance range (including ND filter use) | 0.1 - 100,000 cd/m ² | 0.1 - 100,000 cd/m ² | 0.5 - 100,000 cd/m ² | 0.5 - 100,000 cd/m ² | 1 - 100,000 cd/m ² |
| Measurement time (*2) | Single: Approx. 5 sec. or more; 4-time integration: Approx. 6 sec. or more; 16-time integration: Approx. 10 sec. or more; 64-time integration: Approx. 25 sec. or more; 256-time integration: Approx. 98 sec. or more | | | | |
| Accuracy (*3) | Luminance | ±3 % | ±3 % | ±3 % | ±3 % |
| | Chromaticity | ±0.005 | ±0.005 | ±0.005 | ±0.005 |
| Repeatability (*4) | Luminance | 0.5 % | 0.5 % | 0.5 % | 0.5 % |
| | Chromaticity | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Inter-point error (*5) | Luminance (*6) | ±2 % | ±2 % | ±2 % | ±2 % |
| | Chromaticity (*7) | ±0.002 | ±0.002 | ±0.002 | ±0.002 |
| Other functions | Luminance (*8) | ±3 % | ±3 % | ±3 % | ±3 % |
| | Chromaticity (*7) | ±0.003 | ±0.003 | ±0.003 | ±0.003 |
| Interface | USB 2.0 or higher | | | | |
| Operating temperature and humidity range (*9) | 10-30°C, Relative humidity 70% or less/No condensation | | | | |
| Storage temperature and humidity range (*10) | 0-30°C, Relative humidity 70% or less/No condensation, 20-35°C, Relative humidity 55% or less/No condensation | | | | |
| Size | Body only | 150 (W) × 164 (H) × 109 (D) mm (Height including handle: 211 mm) | | | |
| | With lens and lens hood attached | 224 (D) mm | 219 (D) mm | 224 (D) mm | 230 (D) mm |
| Weight | 3.5 kg approx. (when standard lens and lens hood are attached) | | | | |
| Power source | AC adapter: 100-240 V ~, 1.2 A, 50-60 Hz | | | | |
| Standard accessories | Lens hood | CA-A68 | CA-A69 | CA-A68 | CA-A70 |
| | Hood Cap | CA-A71 | CA-A75 | CA-A71 | |
| Optional accessories | Calibration data DVD | Included with each lens. | | | |
| | Other | Mount Cover CA-A61, AC Adapter, USB Cable IF-A10, Data Management Software CA-S20W | | | |
| Optional accessories | Soft Case CA-A60, Tripod CS-A3, Pan Head CS-A4, Calibration certificate | | | | |

- *1: Error in angle of view: 7%
- *2: Measurement time differs depending on brightness of measurement object, PC performance, and data processing contents.
 The specifications above were obtained under Konica Minolta's measurement conditions shown below:
 PC's CPU : Pentium 4, 2.9GHz
 Data processing : Pseudocolor display of luminance data
 Resolution : 400 x 400
 Shutter speed : Y measurement: 1/64 sec., XZ measurement: 1/32 sec.
 Measurement subject brightness: Standard/wide lens: Approx. 98 cd/m², Telephoto lens: Approx. 300 cd/m²
 Low-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 400 cd/m²
 High-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 600 cd/m²
- *3: The measurement time becomes longer when the object is dark. The longest measurement time is approx. 10 seconds with 1-time integration, approx. 27 seconds with 4-time integration, approx. 95 seconds with 16-time integration, approx. 6 minutes and 8 seconds with 64-time integration and approx. 24 minutes and 19 seconds with 256-time integration.
- *4: The specifications above were obtained under Konica Minolta's measurement conditions shown below:
 Measurement subject brightness: Standard/wide lens: Approx. 35 cd/m², Telephoto lens: Approx. 140 cd/m²
 Low-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 250 cd/m²
 High-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 350 cd/m²
 Distance: Minimum distance of each lens. Evaluation: Based on the average obtained within 10% range at the center of the screen, Temperature: 23°C±2°C, Relative humidity: 40%±10%, Measuring light: White, reference light source, Integration: 64 times (Normal mode)
- *5: The specifications above were obtained under Konica Minolta's measurement conditions shown below:
 Resolution: 196 x 196, Shutter speed: Y measurement: 1/64 sec., XZ measurement: 1/32 sec. Gain: Normal (x1). Light intensity level: Midpoint of appropriate light intensity range. Evaluation: Based on the maximum repeatability (2σ) of all pixels. Temperature: 23°C±2°C, Relative humidity: 40%±10%, Measurement subject: White, reference light source, Integration: 64 times (Normal mode)
- *6: The specifications above were obtained under Konica Minolta's measurement conditions shown below:
 Measurement subject brightness: Standard/wide lens: Approx. 40 cd/m², Telephoto lens: Approx. 160 cd/m²
 Low-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 200 cd/m²
 High-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 250 cd/m²
 Distance: Calibration distance of each lens. Resolution: 196 x 196
 Evaluation (*6) : Based on the maximum/minimum values obtained in a square at the center of the screen measuring 50% of the height and width of the entire screen.
 (*7) : Based on the maximum/minimum values obtained in the entire screen.
 Temperature: 23°C±2°C, Relative humidity: 40%±10%, Measurement subject: White, reference light source, Integration: 64 times (Normal mode)
- *8: Even if the instrument is stored within the specified usage (or storage) temperature/humidity range, the displayed value may change depending on long-period usage or storage conditions.
- *9: Even if the instrument is stored within the specified usage (or storage) temperature/humidity range, the displayed value may change depending on long-period usage or storage conditions.
- *10: Even if the instrument is stored within the specified usage (or storage) temperature/humidity range, the displayed value may change depending on long-period usage or storage conditions.

Figura 31 Specifiche tecniche dello strumento MINOLTA CA-2000 utilizzato per i rilievi.

11 Caratteristiche dello spettroradiometro utilizzato



Lo strumento impiegato per la misura delle caratteristiche spettrali delle lampade e per la valutazione presenta le caratteristiche riportate alla **Tabella 9**.

Tabella 9 Caratteristiche tecniche dello spettro radiometro SpectraScan PR 701s

| | |
|---|---|
| <i>Wavelength</i> | 380-780 nm |
| Apertura | 1/2° |
| Luminance Accuracy | ±2% riferito al NIST con illuminante standard a 2856 Kelvin |
| Luminance Precision | La deviazione standard di misure ripetute su un periodo di 30 minuti, è minore del 0.1% quando lo strumento funziona nelle normali condizioni operative |
| Accuratezza Colorimetrica per illuminante CIE A | CIE 1931 $x \pm 0.015$ $y \pm 0.001$ |
| Color Precision | ±.005 per CIE 1931 x,y misurando l'illuminante A della CIE |
| Errore Polarizzazione | >=5% quando si misurano sorgenti 100% polarizzate linearmente |
| Risoluzione Digitale | 65535:1 (16 bits) |
| Tempo integrazione | Da 25 ms a 60000 ms |

Lo strumento è stato impiegato per la valutazione della radianza spettrale delle sorgenti luminose nella zona lettura con angolo solido di apertura di 0.5°.



12 Luxmetro LMT Pocket Lux-2

Per le misure di illuminamento è stato utilizzato il luxmetro LMT Pocket Lux 2, le cui principali caratteristiche tecniche sono riportate di seguito¹³:

f1 (correzione spettrale) =1.8%¹⁴

f2 (correzione alla legge del coseno)=0.9%¹⁵

f3(linearità)<0.1%+- 1 digit

f4(errore di visualizzazione)<0.55%

L'incertezza complessiva dello strumento risulta inferiore al 7% e quindi può essere classificato in uno strumento in classe B

13 Descrizione dell'ambiente test utilizzato

L'ambiente è costituito da uno spazio pianta rettangolare (larghezza 5.24 m, lunghezza 17 m, altezza 3.57 m), che presenta una serie di finestrate sui due lati più lunghi, come mostrato nella Figura 32.

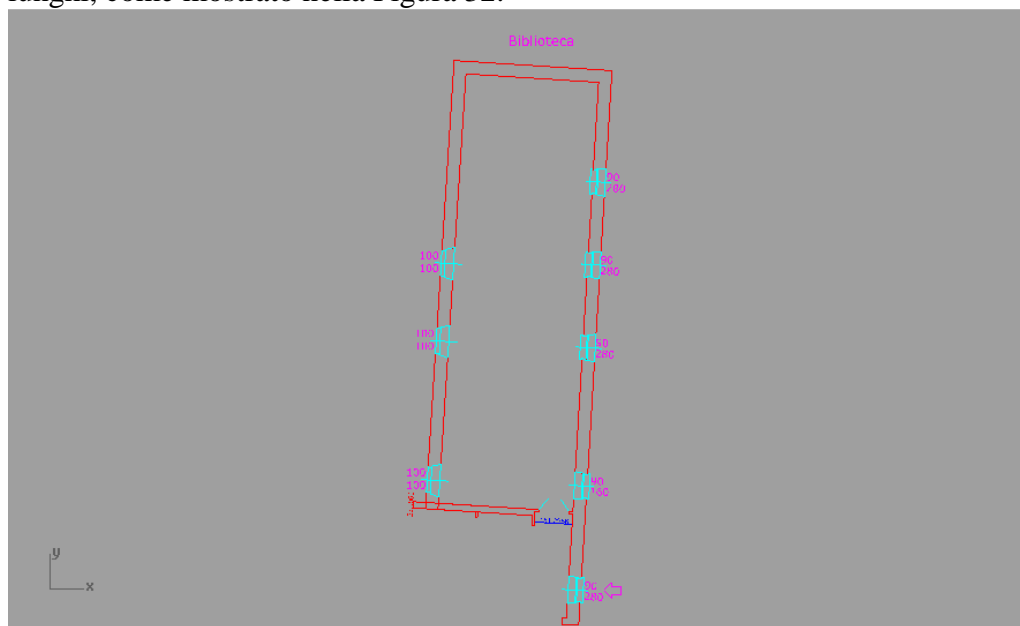


Figura 32 Pianta della biblioteca di Marcallo con Casone

Le finestre del lato sinistro (rispetto alla porta di ingresso) sono poste ad un'altezza di circa 2.30 m e hanno dimensioni pari a 1.20x1.20 m e risultano prive di qualsiasi sistema di controllo dell'ombreggiatura (Figura 33); le aperture dell'ambiente sul lato opposto sono di due tipi porta a finestra e finestre la prima e le ultime due; tutte le aperture presenti sul lato destro sono dotate di sistemi di controllo dell'ombreggiatura (persiane e tende veneziane).

¹³ Riferimento alla norma DIN 5032 e alla pubblicazione CIE No. 69 (1987)

¹⁴ Valore del certificato di calibrazione

¹⁵ Valore del certificato di calibrazione



Figura 33 Finestre del lato sinistro rispetto alla porta di ingresso

Durante le misure i sistemi di oscuramento della porta finestra sono rimasti chiusi, come mostrato nella Figura 34.

Nell'ambiente vengono svolte due attività principali:

- attività di consultazione dei libri
- attività di ufficio per la gestione del prestito libri



Figura 34 Sistemi di ombreggiatura della porta finestra e della finestra del lato destro rispetto alla porta di ingresso

13.1 Impianto di illuminazione artificiale

L'impianto di illuminazione della biblioteca è costituito da 11 apparecchi 1x58 W con schermo lamellare equipaggiati con lampade fluorescenti da 58 W.



Ciascuna lampada emette un flusso luminoso di 5200 alla temperatura di colore di 4000 K con un indice di resa cromatica pari a 85.
Gli apparecchi sono disposti al centro del locale in modo da assicurare l'illuminazione della zona lettura e della zona uffici; l'alimentazione degli apparecchi risulta indipendente per ciascuna zona anche se non è stato previsto alcun sistema di regolazione del flusso luminoso.



Figura 35 Disposizione degli apparecchi all'interno dell'ambiente

L'apparecchio installato è stato identificato come Disano serie Kendo con riflettore 2100 e schermo lamellare cromato 2465 per un migliore controllo dell'abbagliamento, installato ad una altezza di circa 3.15 m dal piano del pavimento.
La curva fotometrica dell'apparecchio, scaricata dal sito internet del produttore, è riportata alla Figura 36.

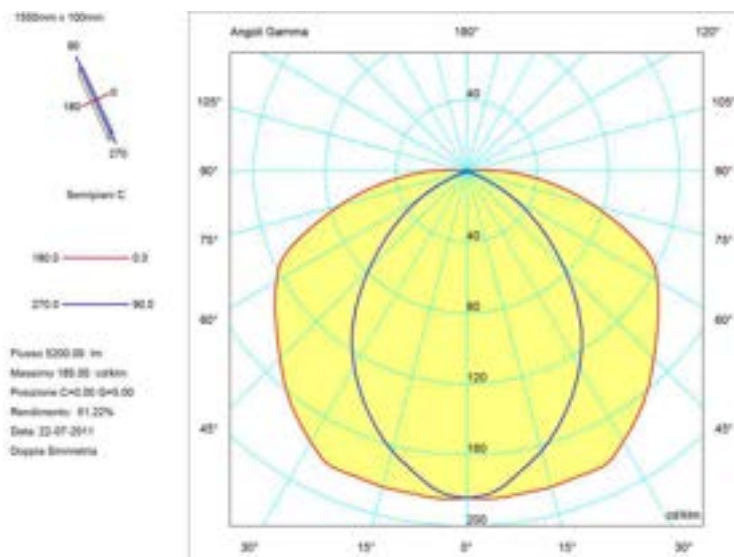


Figura 36 Indicatrici di emissione apparecchio impiegato

Per quanto riguarda il ciclo di manutenzione delle lampade, questo avviene occasionalmente, quando le sorgenti risultano non più funzionanti; non è stato possibile reperire alcuna informazione circa le ore di funzionamento delle lampade, all'atto dei rilievi.

L'apparecchio ha un rendimento del 51% con una emissione ed emissione trascurabile nell'emisfero superiore, come visibile dal diagramma della Figura 36. Il digramma di Sollner dell'apparecchio è riportato alla Figura 38, il limite di abbagliamento dovrebbe essere 500 lux sul compito visivo con classe di abbagliamento B per un'attività di lettura¹⁶.

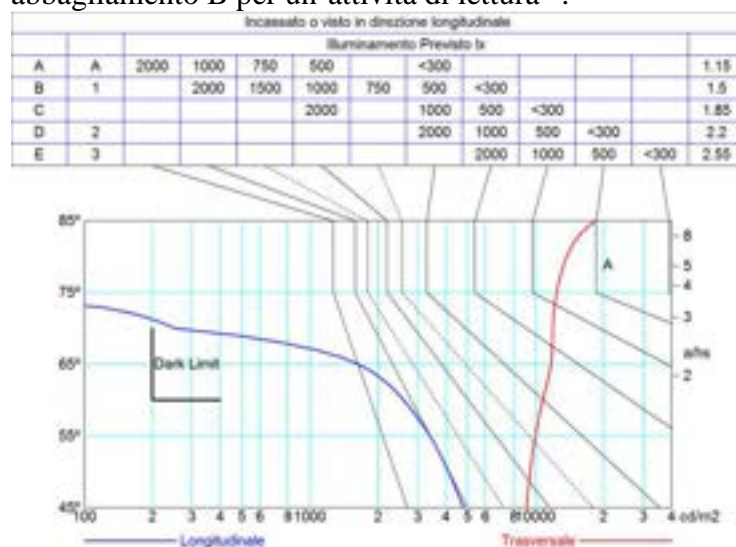


Figura 37 Figura 38 Controllo abbagliamento per l'apparecchio impiegato

L'apparecchio soddisfa i limiti per qualsiasi angolo di osservazione in direzione longitudinale e fino a 60° in direzione trasversale, per un valore di illuminamento medio di 500 lux sul

¹⁶ Riferimento alla Norma UNI 10380:1994 A1 non più in vigore e sostituita dalla 12464:2004



compito visivo, mentre tale limite sale a circa 67° rispetto all'orizzontale, se si considera un valore medio inferiore a 300 lux.

Al fine di meglio valutare il problema dell'abbagliamento è stata compiuta una simulazione software con una geometria semplificata dell'ambiente ed è stato calcolato il valore dell'indice UGR per diverse posizioni dell'osservatore lungo i lati del tavolo di lettura.

Al fine di ottenere un valore significativo, le riflettanze degli arredi sono state assegnate in modo tale da ottenere all'incirca gli stessi valori di luminanza tra simulazione e realtà all'interno del campo visivo dell'osservatore.

In Figura 39 è riportata la distribuzione delle luminanze della zona lettura, mentre alla Figura 40 sono riportati i valori di UGR calcolati; si osserva che non tutte le posizioni di valutazione sono possibili a causa dell'ostruzione di carrelli o delle scaffalature.

Possiamo quindi concludere che nella zona della biblioteca il valore di UGR oscilla tra 17 a 23 a seconda della posizione dell'osservatore rispetto al tavolo di consultazione.

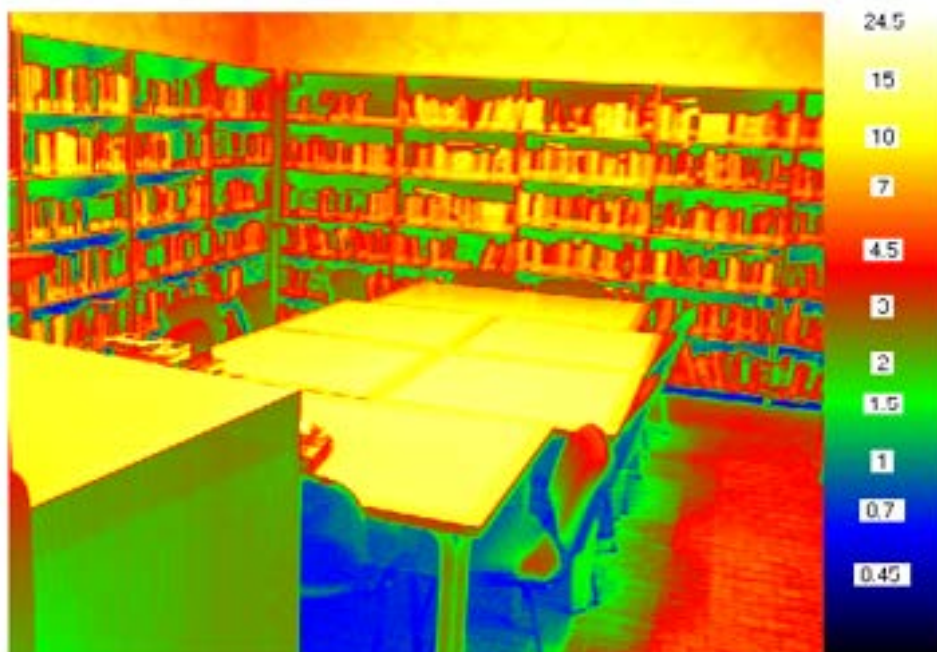


Figura 39 Distribuzione delle luminanze (misurate alle ore 21.00 con il solo contributo dell'illuminazione artificiale) nella zona lettura

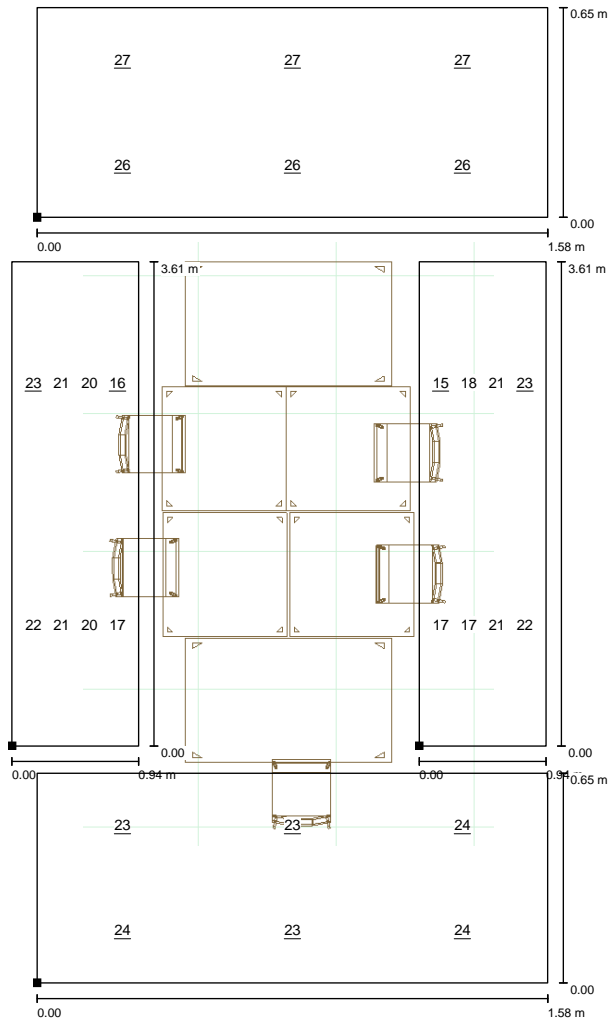


Figura 40 Valutazione UGR per la sala lettura

Per quanto riguarda invece la postazione di lavoro del bibliotecario, il valore di UGR ,
calcolato mediante simulazione, risulta pari a 18 (Figura 41).

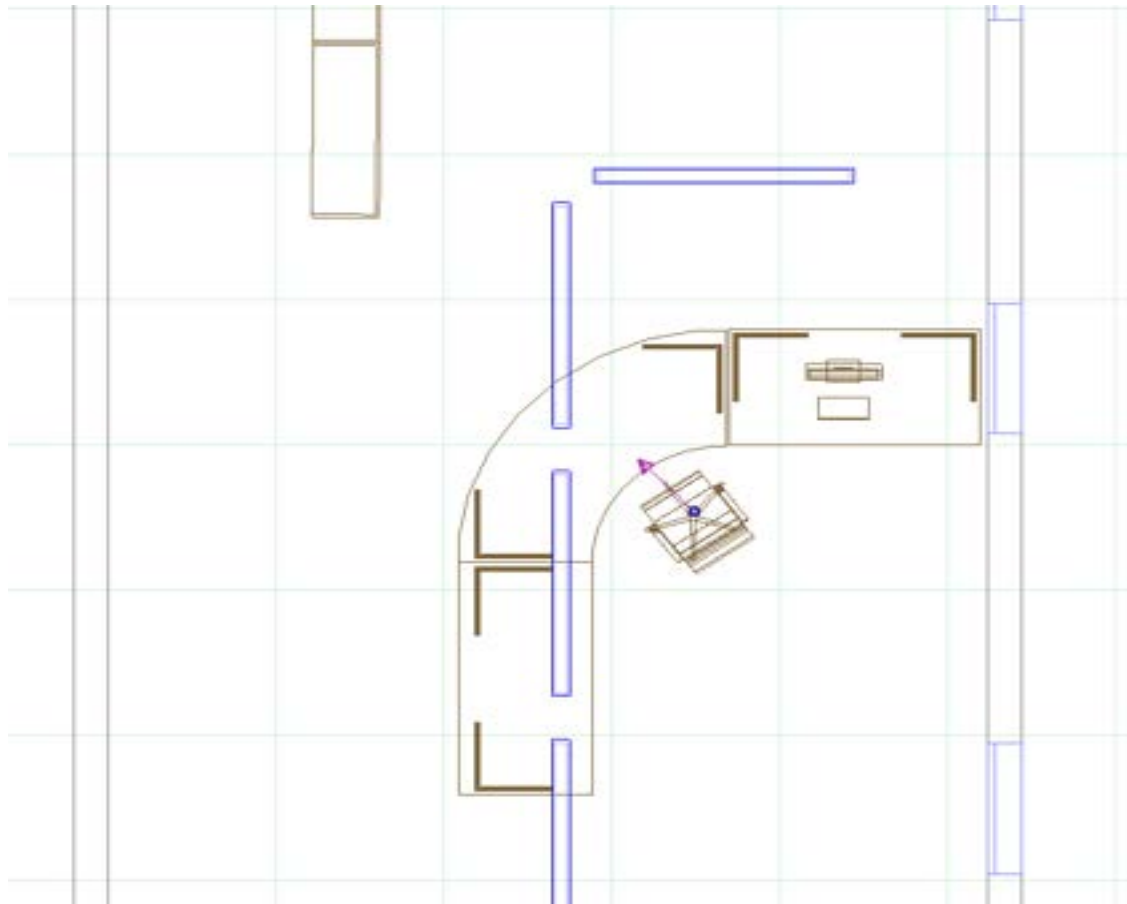


Figura 41 Stima dell'abbagliamento nella postazione di lavoro del bibliotecario

13.2 Requisiti illuminotecnici come da norma UNI 12464

Per la determinazione dei I livelli di illuminamento e i limiti di abbagliamento, si è fatto riferimento ai valori raccomandati dalla norma UNI 12464, “Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni”, suddividendo il locale in due differenti zone:

- Zona sala lettura, assimilata in termini di compiti visivi e attività alle sale lettura delle biblioteche degli edifici scolastici

prospetto 5.6 Edifici scolastici

| 6.1 Asili nido, scuole materne | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|------|
| N° riferimento | Tipo di interno, compito o attività | \bar{E}_m lx | UGR _L - | R _a - | Note |
| 6.2.20 | Sale professori | 300 | 19 | 80 | |
| 6.2.21 | Biblioteca: scaffali | 200 | 19 | 80 | |
| 6.2.22 | Biblioteca: zone di lettura | 500 | 19 | 80 | |



- Zona ufficio, dove opera la bibliotecaria per la registrazione dei libri in ingresso e uscita e per tutte le altre attività di gestione. Per tali compiti, il personale utilizza un PC per il quale dovranno essere verificati i requisiti; in questo caso i compiti visivi e le attività sono state assimilate a quelle previste negli uffici per attività di archiviazione e copiatura.

prospetto 5.3 Uffici

| 3 | Uffici | | | | |
|----------------|--|-------------|---------|-------|---|
| N° riferimento | Tipo di interno, compito o attività | $E_{m, lx}$ | UGR_L | R_s | Note |
| 3.1 | Archiviazione, copiatura, ecc. | 300 | 19 | 80 | |
| 3.2 | Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati | 500 | 19 | 80 | Per lavoro con attrezzature munite di videoterminale vedere punto 4.11. |
| 3.3 | Disegno tecnico | 750 | 16 | 80 | |
| 3.4 | Postazioni CAD | 500 | 19 | 80 | Per lavoro con attrezzature munite di videoterminale vedere punto 4.11. |
| 3.5 | Sale conferenze e riunioni | 500 | 19 | 80 | L'illuminazione dovrebbe essere regolabile. |
| 3.6 | Ricezione (reception) | 300 | 22 | 80 | |
| 3.7 | Archivi | 200 | 25 | 80 | |

Le attività di verifica sono state condotte in conformità a quanto previsto al paragrafo 6 della norma UNI 12464 del 2004.

Per quanto riguarda il reticolo di misura adottato, si è fatto riferimento a quanto previsto dalla norma UNI 12464, al paragrafo 6.1. Non disponendo del progetto illuminotecnico dell'ambiente si è ricorsi alla formula di Stockmar¹⁷, utilizzata da molti programmi di calcolo illuminotecnico per la determinazione della griglia di misura.

$$p = 0.2 * 5^{\log(d)}$$

Dove

p: dimensione delle celle della griglia di calcolo, espressa in metri

d: dimensione del lato lungo, in metri, dell'area di misura, se il rapporto tra lato lungo e corto è minore di 2 m, altrimenti d assume il valore della dimensione più piccola dell'area di misura

Per ciascun tavolo della sala lettura (90x90 cm), sono stati considerati 9 punti di misura, mentre per il tavolo di dimensione 150x90 cm sono stati considerati 18 punti di misura.

Per quanto riguarda i valori di illuminamento relativi alla zona lettura, i valori di illuminamento sono stati rilevati sul piano dei tavoli (altezza 0.75 m dal suolo) e a 0.20 m dal pavimento intono ai tavoli di lettura con passo di misura pari a 1m.

¹⁷ Stockmar A., Vergleich gemessener und berechneter Beleuchtungsstärke - Verteilungen von Direct und Indirect - Beleuchtungs - systemen im Innenraum, Tagungsband LICHT, 1990.



Per la valutazione degli illuminamenti verticali, sono state effettuate le misure su 3 scaffali tipo a diverse altezze dal suolo, al fine di valutare i valori di illuminamento verticale che consentono agli utenti della biblioteca di ricercare il libro di loro interesse.

L'altezza di misura degli illuminamenti verticali è stata fatta coincidere con centro di ciascun ripiano dello scaffale (circa ogni 30 cm).



Figura 42 Disposizione dei punti di misura nella zona lettura.

Prima di effettuare le misurazioni di illuminamento, è stata effettuata la stabilizzazione delle lampade (che avevano certamente subito un periodo di invecchiamento maggiore di 100h), mediante una attesa di 1h, a impianto acceso, prima dell'effettuazione delle misure.

Le misurazioni di illuminamento prodotto dall'impianto di luce artificiale sono state effettuate senza alcun contributo della luce naturale a tale scopo sono state eseguite nelle ore notturne (ore 21,00) dopo aver valutato il contributo di luce naturale sul campo di misura ed essersi assicurati che questo risultasse inferiore a 1%.

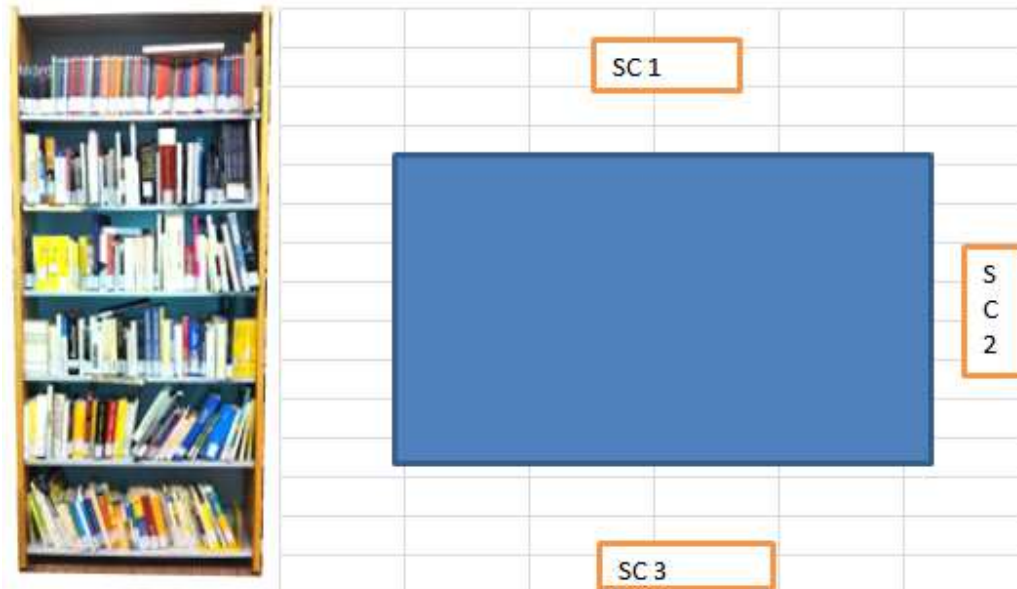


Figura 43 Disposizione delle scaffalature esaminate nella zona lettura

Tabella 10 Valore degli illuminamenti verticali misurati sui 3 scaffali della biblioteca alle ore 21.00

| Altezza dal suolo del ripiano (m) | SC 1 | SC 2 | SC 3 |
|-----------------------------------|------|------|------|
| 210 | 178 | 174 | 171 |
| 175 | 174 | 168 | 165 |
| 142 | 160 | 151 | 167 |
| 109 | 133 | 134 | 157 |
| 76 | 125 | 105 | 146 |
| 43 | 95 | 75 | 129 |
| 10 | 84 | 31 | 120 |

Figura 44 Scaffale tipo per la misura degli illuminamenti verticali e disposizione degli scaffali nella zona lettura rispetto al tavolo

Per quanto riguarda le misure di illuminamento nella postazione del bibliotecario sono stati rilevati 7 valori di illuminamento sul piano di lavoro della scrivania (larghezza 70 cm e raggio 130 cm circa), l'illuminamento orizzontale sulla testiera e quello verticale sul display, come mostrato alle Figura 45 e alla Figura 46.



Figura 45 Misura degli illuminamenti sulla scrivania del bibliotecario



Figura 46 Punti di misura degli illuminamenti sulla testiera e sul display

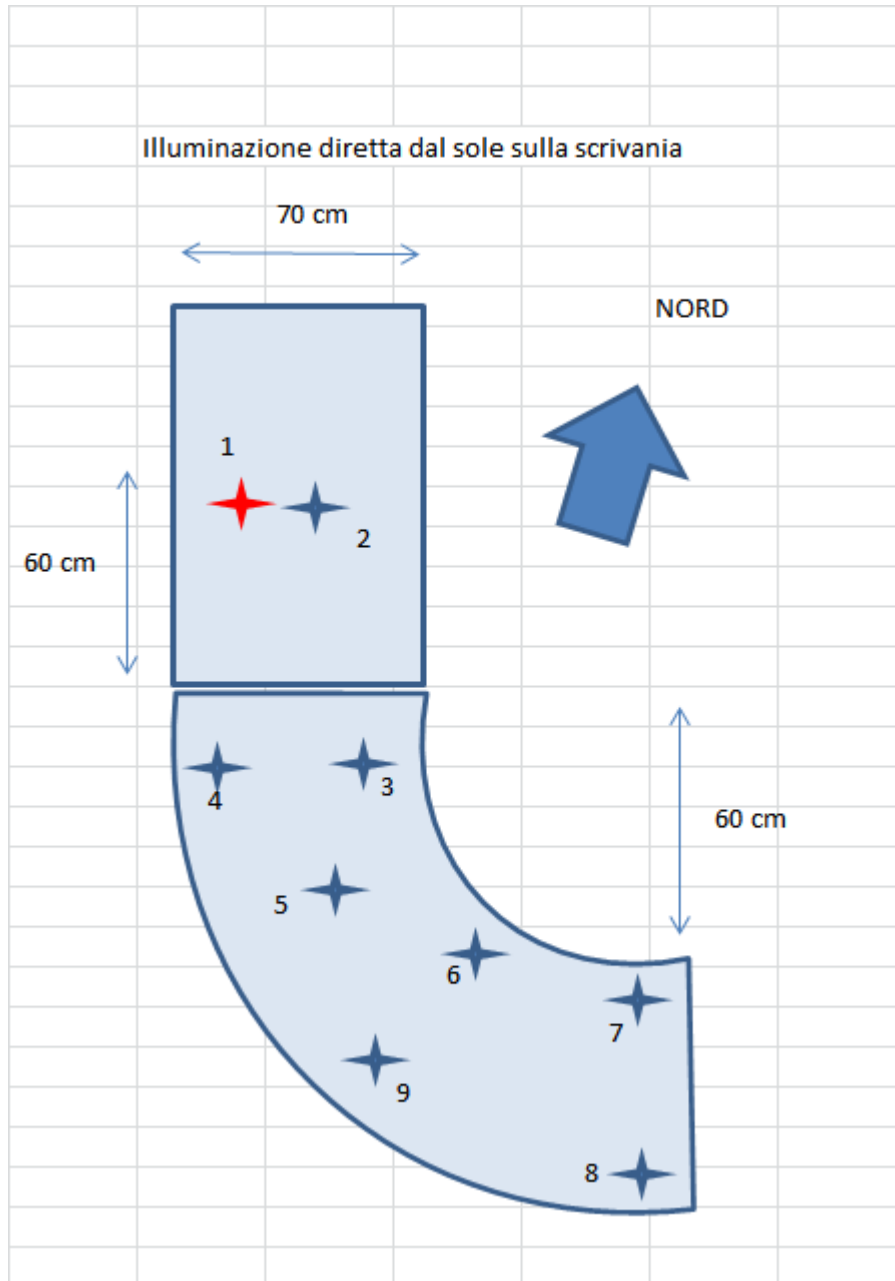


Tabella 11 Valori di illuminamento rilevati sulla scrivania del bibliotecario alle ore 21.00 in assenza di illuminazione naturale

| Posizione punto di misura | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 172.9 lx | 218.3 lx | 314.1 lx | 310.9 lx | 336.4 lx | 342.7 lx | 353 lx | 349.4 lx | 342.8 lx |

I punti di misura indicati con 1 e 2 si riferiscono rispettivamente al valore di illuminamento sul display e sulla tastiera.



13.3 Elaborazioni delle misure di illuminamento

Calcolo del valor medio di illuminamento E_m , espresso in lux, mediante l'utilizzo dalla seguente equazione:

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n E_x$$

X : indice punto di misura

n : numero dei punti considerati

E_x : illuminamento misurato nel punto di misura x, espresso in lux

L'uniformità di illuminamento U_0 , sulla superficie dell'ambiente, è data dal rapporto tra l'illuminamento minimo E_{\min} , risultante dal reticolo di misura, e l'illuminamento medio, E_m , calcolato con la precedente relazione:

$$U_0 = \frac{E_{\min}}{E_m}$$

I valori così ottenuti sono stati confrontati con i valori suggeriti dalla Norma.

I valori medi e di uniformità sono stati calcolati per il piano di lavoro del bibliotecario e per il tavolo della zona lettura e sono stati raccolti alla Tabella 12.

Tabella 12 Riepilogo valori medi di illuminamento e uniformità

| Zona | Illuminamento medio (lux) | Uniformità U_0 |
|-------------------------|---------------------------|------------------|
| Scrivania bibliotecario | 321 | 0.62 |
| Display bibliotecario | 173 | -- |
| Tavolo sala lettura | 295.78 | 0.52 |
| Pavimento sala lettura | 119.14 | 0.11 |

Si osserva che il valore modesto di uniformità del piano del calpestio dipende essenzialmente dalla presenza degli arredi, soprattutto nelle zone dove lo spazio tra sedie e tavoli risulta assai limitato (1 m circa).

13.4 Misura delle caratteristiche spettrali delle lampade

Le caratteristiche spettrali delle lampade sono state determinate mediante l'impiego di uno spettro radiometro con cui si è effettuata la misura della radianza spettrale della sorgente all'interno di un angolo solido di apertura 0.5° .

Il rilievo è stato condotto su una sola lampada, dal momento che tutte le lampade impiegate nell'impianto risultano dello stesso tipo.

La distribuzione spettrale misurata è riportata alla Figura 47, la temperatura correlata di colore risulta pari a 3824 K con un indice di resa cromatica pari a 82.

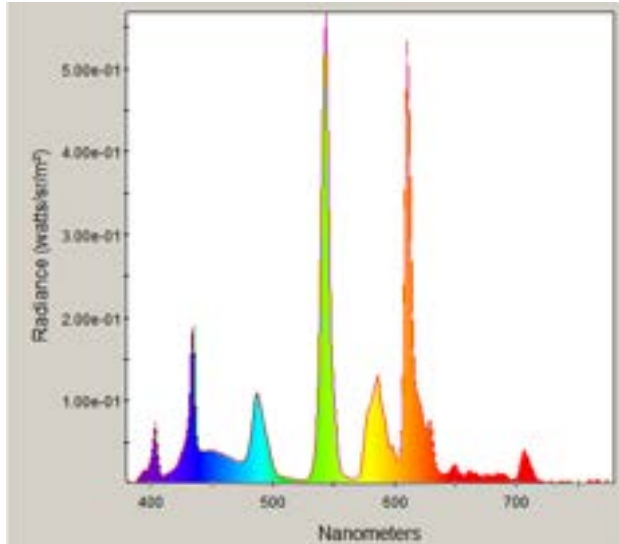


Figura 47 Distribuzione spettrale delle lampade impiegate nell'impianto

La norma UNI 12464 prevede l'impiego di lampade con indice di resa cromatica (CRI) 80 e temperatura di colore di 4000 K.
L'elaborazione dei dati spettrali misurati ha consentito di verificare il rispetto di queste due prescrizioni.

13.5 Video terminale

La zona munita di video terminale è stata studiata in maniera separata dalle altre attraverso lo scatto di una serie di immagini di luminanza, come mostrato alla Figura 48. Il dettaglio dei risultati di misura è riportato in allegato.



Figura 48 Schema per la misura della zona con videoterminale



Le misure sono state effettuate considerando sia il contributo della luce naturale, sia quello derivante dall'impianto di illuminazione artificiale.

Supponendo un valore di 150 cd/m^2 per la luminanza del display (sfondo bianco e regolazione media della luminosità dello schermo), il rapporto la luminanza del display e quella dell'ambiente circostante risulta inferiore a 3 a 1 e pari a 6:1 (la luminanza media del campo visivo risulta pari a circa 25 cd/m^2 che si mantengono all'incirca costanti dalle ore 15.00 alle ore 21.00).

Tabella 13 Tabella luminanze dello sfondo L_s e del display L_d misurate dalle 15.00 alle 21.00

| Misura | $L_s \text{ cd/m}^2$ |
|-----------|----------------------|
| Ore 15.00 | 24.31 |
| Ore 16.00 | 24.39 |
| Ore 17.00 | 26.66 |
| Ore 18.00 | 22.80 |
| Ore 19.00 | 27.36 |
| Ore 20.00 | 21.68 |
| Ore 21.00 | 21.10 |

| Misura | $L_d \text{ cd/m}^2$ |
|-----------|----------------------|
| Ore 15.00 | 17.05 |
| Ore 16.00 | 17.50 |
| Ore 17.00 | 18.60 |
| Ore 18.00 | 15.25 |
| Ore 19.00 | 19.63 |
| Ore 20.00 | 15.16 |
| Ore 21.00 | 19.63 |

I punti di misura 4,5,7,8 corrispondenti al display (spento durante le misure) non rilevano alcun fenomeno di abbagliamento riflesso dovuto a luce naturale o agli apparecchi di illuminazione mantenendo un valore di luminanza di circa 18 cd/m^2 nel corso dell'intera durata del rilievo.

Per quanto concerne il valore di temperatura di colore del campo visivo, si mantengono pressochè inalterate nel corso del pomeriggio con valori compresi tra 3400 K e 4000 K per la zona del display e gli oggetti posti nelle immediate vicinanze (Figura 49).

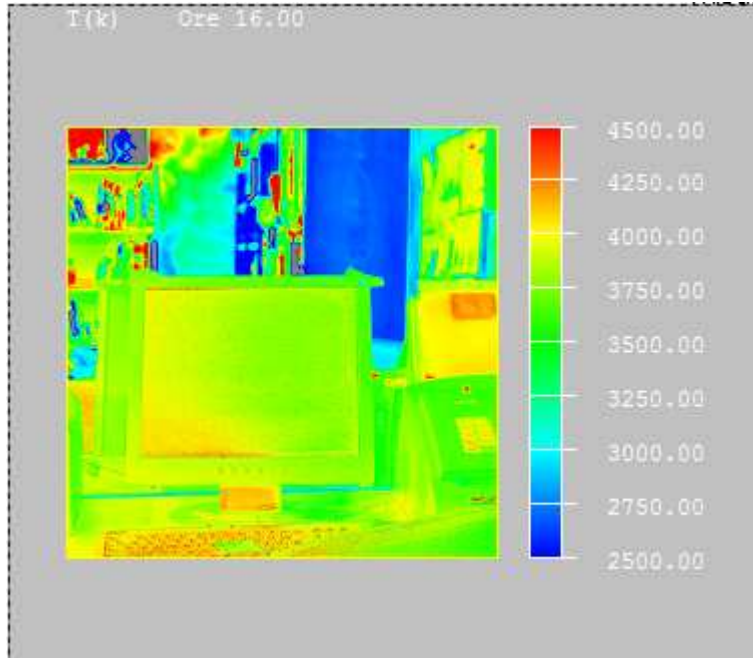


Figura 49 Mappa delle CCT alle ore 16.00 (la misura è stata effettuata considerando il contributo sia dell'impianto di illuminazione artificiale, sia la luce naturale).

13.6 Valutazione circadiana

Per la valutazione circadiana, è stato considerato un mix tra illuminazione artificiale e naturale in modo da valutarne l'effetto nel corso dell'intera giornata.

Per semplicità è stata considerata la sola postazione di lavoro del bibliotecario, dal momento che è l'unico dipendente della biblioteca a soggiornare con continuità nello spazio e quindi più soggetto all'azione dell'illuminazione sul sistema circadiano.

Gli scatti potranno avere una risoluzione temporale di 1h e per ciascuna di esse è stato valutato il fattore di attivazione circadiano a_{cv} definito in letteratura e di cui è stata data una breve spiegazione nei paragrafi precedenti.

La misura è stata condotta utilizzando il video fotometro Rollei elaborando le immagini ad alta dinamica acquisite, attraverso una calibrazione circadiana descritta nei paragrafi precedenti.

Le misure sono state condotte dalle ore 15.00 alle ore 21.0 di Lunedì 18 Luglio 2011, in concomitanza con la chiusura pubblica della biblioteca.

Le immagini relative al fattore di attivazione circadiana sono raccolte nell'allegato alla presente relazione.

Come era facilmente prevedibile, i valori di attivazione circadiana presenti nell'ambiente risultano alquanto modesti, dal momento che il contributo della luce solare alla luminanza del campo visivo dell'osservatore risulta modesto e dal momento che l'impianto di illuminazione artificiale non offre alcuna possibilità di controllo sulla temperatura di colore (o meglio ancora spettro).

Questa conclusione è confermata dalle misure condotte con lo spettroradiometro SpectraScan PR 701s e adattatore CR 55 per la misura dell'irradianza spettrale: lo strumento è stato equipaggiato con un apposito schermo in modo da limitarne l'angolo di accettazione al campo di vista della visione binoculare (Figura 50).



Lo strumento utilizzato è lo spettro radiometro Spectrascan PR 701s con adattatore CR 55 per la misura dell'irradianza spettrale, dotato di un apposito paraluce, come mostrato alla Figura 52.

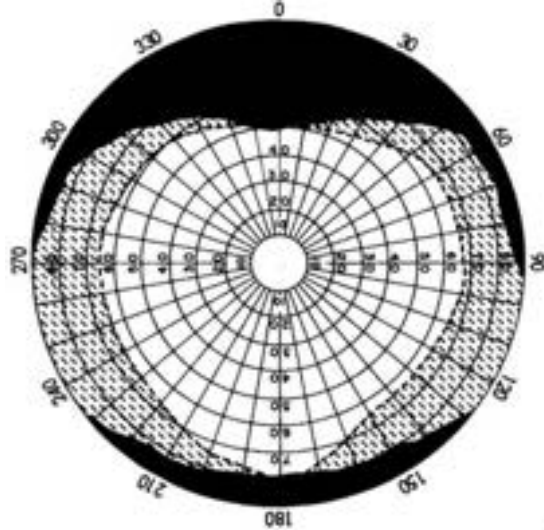


Figura 50 Campo di vista del sistema visivo umano

La geometria di misura è quella illustrata nello schema e nell'immagine della Figura 51.

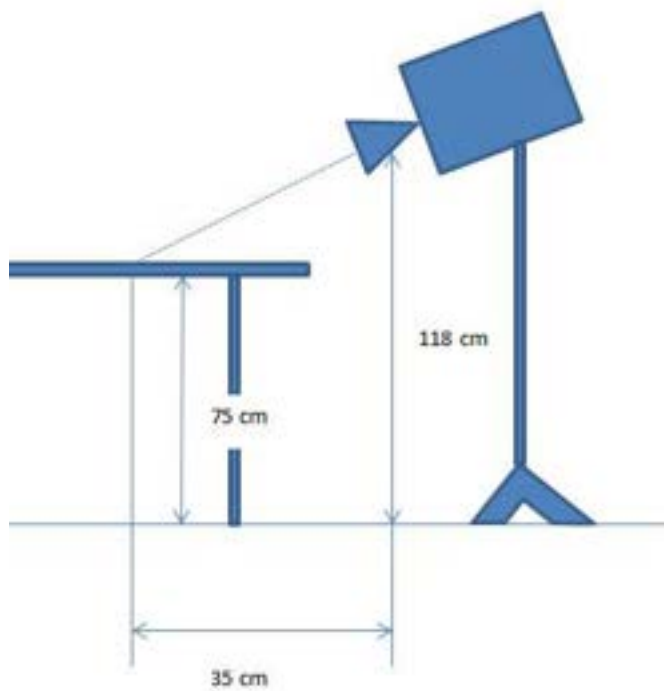


Figura 51 Geometria di misura per il rilievo spettrale nel campo visivo del bibliotecario



Figura 52 Adattatore per la misura dell'irradianza spettrale, dotato sistema per la limitazione del campo visivo

L'andamento degli spettri, misurati dalle ore 15.00 alle ore 21.00, è riportato nel grafico della Figura 53, dove non si osserva una variazione significativa degli andamenti nell'arco di tempo esaminato.

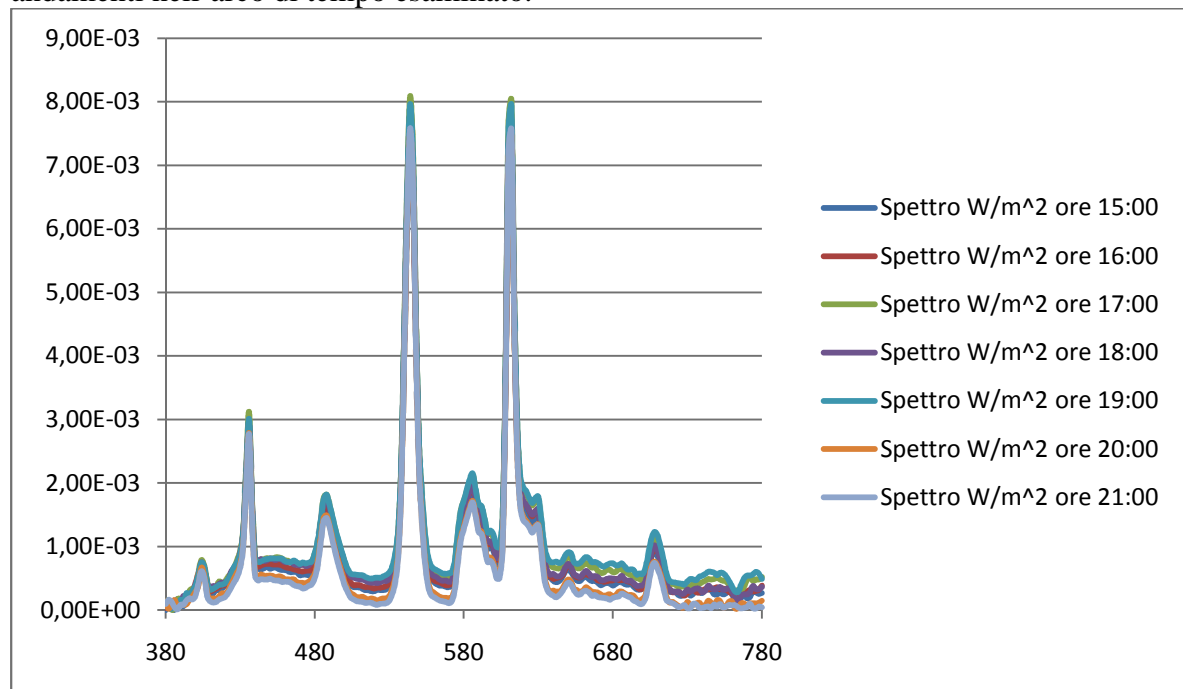


Figura 53 Andamento degli spettri misurati tra le ore 15.00 e le ore 21.00 con intervallo di 1h.



Le elaborazioni effettuate su tali misure hanno mostrato variazioni poco significative della CCT e dell'indice di resa cromatica a dimostrazione del fatto che il livello di illuminamento delle superfici nel campo di vista del bibliotecario fosse dominato dall'impianto di illuminazione artificiale.

Tabella 14 Andamento della CCT e del CRI dalle ore 15.00 alle ore 21.00

| Ore | CCT (K) | CRI |
|-------|---------|-----|
| 15:00 | 3741 | 86 |
| 16:00 | 3768 | 86 |
| 17:00 | 3796 | 87 |
| 18:00 | 3908 | 87 |
| 19:00 | 3763 | 88 |
| 20:00 | 3691 | 84 |
| 21:00 | 3603 | 83 |

Anche il calcolo del fattore di stimolazione circadiana proposto da Rea¹⁸, non ha mostrato variazioni significative dell'indice, che è stato calcolato a partire dal valore di irradianza spettrale alla cornea, dopo aver applicato il fattore di trasmissione spettrale per un soggetto di età compresa tra i 20 e i 29 anni.

Dal momento che si era interessati a valutare le variazioni dell'indice a parità di ogni altra condizione (le luminanze dell'ambiente e lo spettro incidente alla cornea non sono variati in modo significativo durante le misure), si decise di non calcolare il valore dell'illuminamento retinico, come descritto nei precedenti paragrafi, ma di applicare l'indice direttamente al prodotto della radianza spettrale a livello della cornea per il fattore di trasmissione spettrale dell'occhio.

I risultati ottenuti sono riportati alla Tabella 15, dove si osservano modeste variazioni dell'indice CS (nelle ore centrali del pomeriggio 16.00 alle 19.00), dovute per lo più alle variazioni del livello di illuminamento al livello dell'occhio piuttosto che alla composizione spettrale della radiazione incidente.

Tabella 15 Andamento della stimolazione circadiana a nel corso del pomeriggio

| Ora | CS | E_eye (lux) | P/S |
|-------|-------|-------------|------|
| 15:00 | 9.78 | 72.45 | 0.67 |
| 16:00 | 11.63 | 77.09 | 0.66 |
| 17:00 | 14.57 | 84.91 | 0.65 |
| 18:00 | 13.57 | 79.09 | 0.64 |
| 19:00 | 14.63 | 85.76 | 0.65 |
| 20:00 | 6.14 | 66.44 | 0.69 |
| 21:00 | 3.95 | 64.33 | 0.71 |

¹⁸ Mark S Rea*, Mariana G Figueiro, Andrew Bierman and John D Bullough, "Circadian light", Journal of Circadian Rhythms 2010, 8:2



Il fattore di attivazione circadiana, è stato valutato dalle ore 15.00 alle ore 21.00 per la sola postazione di lavoro del bibliotecario attraverso il procedimento di misura illustrato nei paragrafi precedenti.

La Figura 54 mostra la zona inquadrata dal videofotometro utilizzata per le valutazioni di tipo circadiano; l'inquadratura è stata scelta in modo che contenesse sia il piano di lavoro, sia parte dell'ambiente circostante nel campo visivo dell'utente quando rivolge lo sguardo di fronte a se.

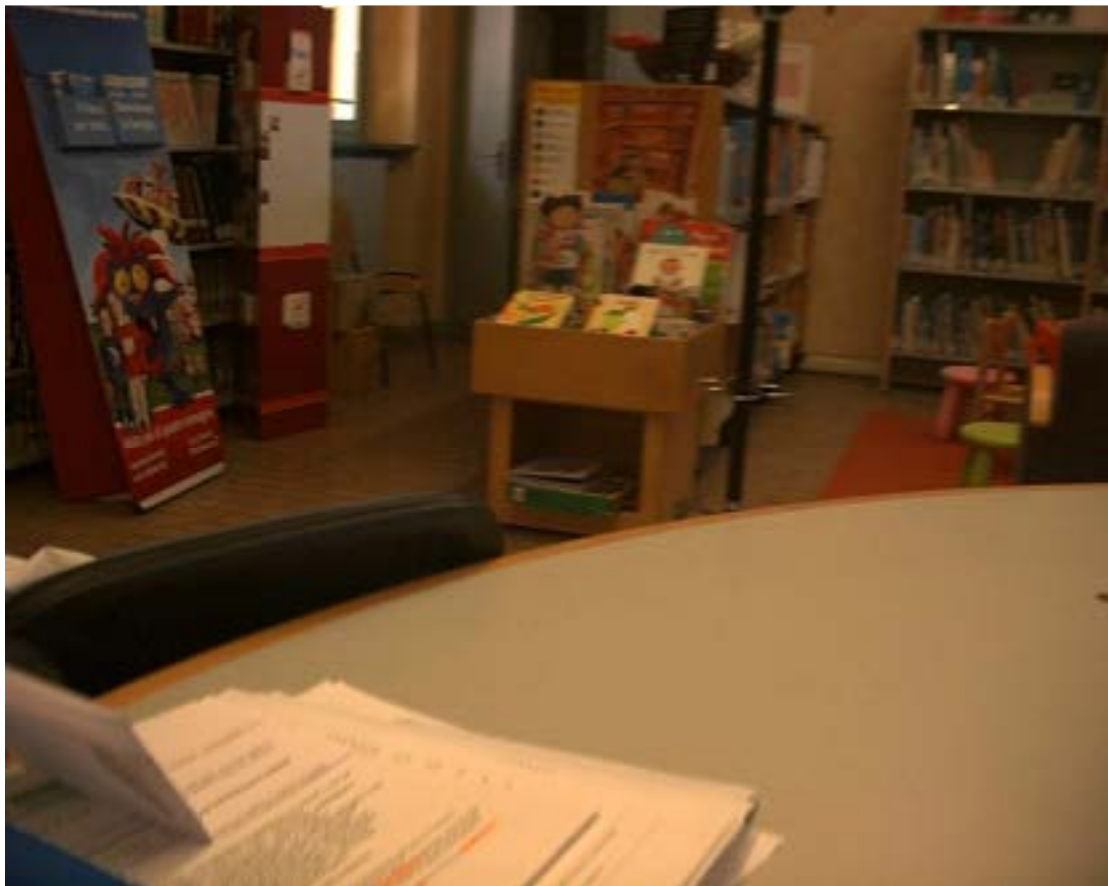


Figura 54 Campo di misura per le valutazioni di natura circadiana per la postazione di lavoro del bibliotecario

Le misure sono state effettuate tenendo conto sia del contributo della luce diurna e di artificiale (dalle 15.00 ore 20.00) e del solo contributo della luce artificiale (ore 21.00).



Figura 55 Immagine di luminanza ore 15.0



Figura 56 Immagine di luminanza ore 16.00



Figura 57 Immagine di luminanza ore 17.00



Figura 58 Immagine di luminanza ore 18.00

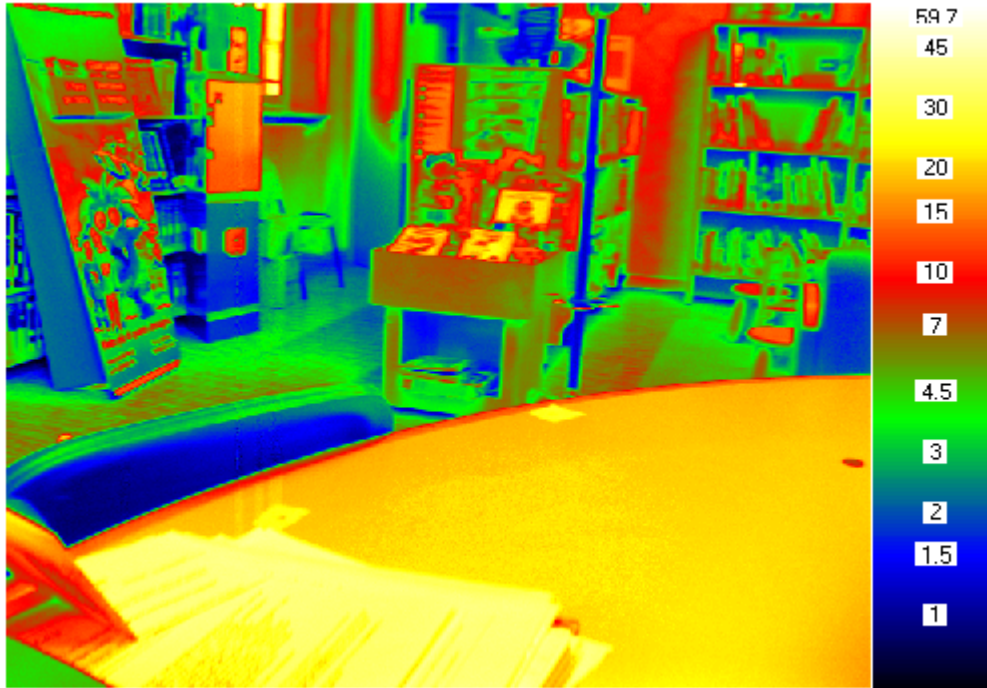


Figura 59 Immagine luminanza ore 19.00



Figura 60 Immagine di luminanza ore 20.00

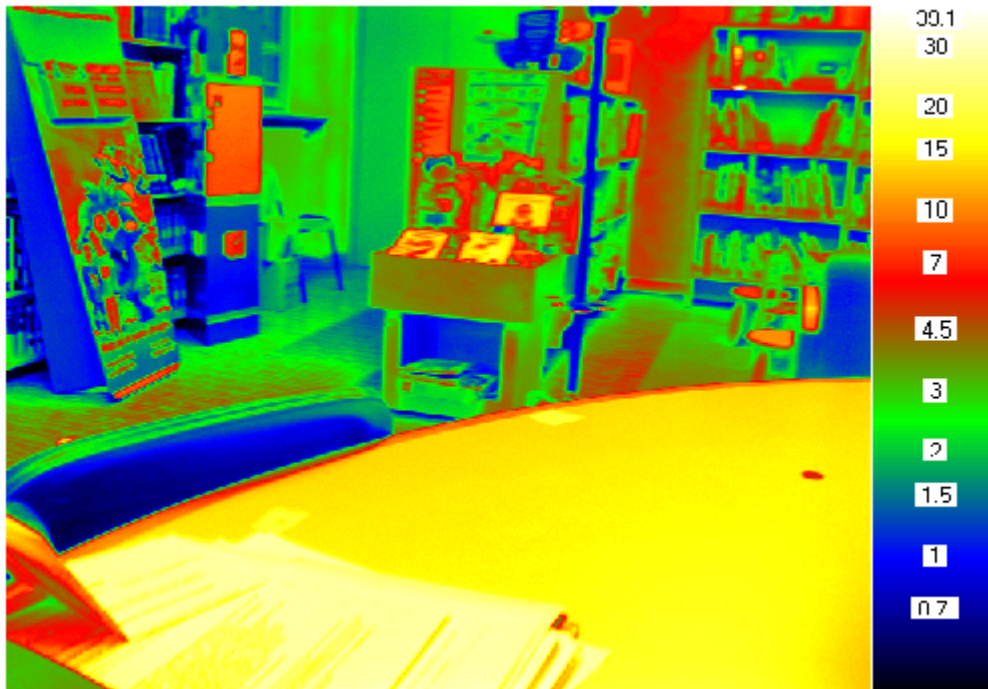


Figura 61 Immagine luminanza ore 21.00

A partire dalle immagini con correzione fotopica, sono state ricavate le immagine con correzione circadiana per le diverse ore del pomeriggio. La Figura 62 è l'elaborazione ottenuta alle ore 15.00.



Figura 62 Immagine distribuzione circadiana delle luminanze alle ore 15.00



Di seguito sono riportate le mappe del fattore di attivazione circadiano tra le ore 15.00 e le ore 18.00, coincidenti con gli orari di apertura al pubblico della biblioteca (e di conseguenza con la presenza di personale).



Figura 63 Fattore acv alle ore 15.00



Figura 64 Fattore acv ore 16.00



Figura 65 Fattore acv ore 17.00



Figura 66 Fattore acv ore 19.00

Dall'esame delle figure, si osserva che il fattore acv rimane pressoché costante, pari a circa 0.45 per i compiti visivi posti sulla scrivania del bibliotecario, mentre i valori più elevati si registrano in corrispondenza del cartellone pubblicitario posto sulla



sinistra di ciascuna inquadratura a causa delle combinazione dei fattori di riflessione dell'oggetto e di un possibile contributo di luce naturale.

Si può concludere che complessivamente l'attivazione circadiana si mantiene a livelli piuttosto contenuti durante tutto l'arco di apertura della biblioteca.

Bibliografia

- ⁱ 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.
- ⁱⁱ Cajochen C., Munch M., Kobińska 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
- ⁱⁱⁱ Lewy AJ, Wehr TA, Goodwin FK, Newsome DA, Markey SP. 1980. Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science* 210(4475): 1267-1269.
- ^{iv} Berson DM, Dunn FA, Takao M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295(5557): 1070-1073.
- ^v Hattar S, Liao HW, Takao M, Berson DM, Yau KW. 2002. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 295(5557): 1065-1070.
- ^{vi} 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.
- ^{vii} Boyce P, Beckstead JW, Eklund NH, Strobel RW, Rea MS. 1997. Lighting the graveyard shift: The influence of a daylight-simulating skylight on the task performance and mood of nightshift workers. *Light Res Technol* 29(3): 105-134.
- ^{viii} Figueiro MG, Rea MS, Boyce P, White R, Kolberg K. 2001. The effects of bright light on day and night shift nurses' performance and well-being in the NICU. *Neonatal Intens Care* 14(1): 29-32.
- ^{ix} 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.
- ^x Lewy AJ, Kern HA, Rosenthal NE, Wehr TA. 1982. Bright artificial light treatment of a manic-depressive patient with seasonal mood cycle. *Am J Psychiatry* 139(11): 1496-1498
- ^{xi} Lack L, Wright H. 1993. The effect of evening bright light in delaying the circadian rhythms and lengthening the sleep of early morning awakening insomniacs. *Sleep* 16(5): 436-443
- ^{xii} Van Someren EJW, Kessler A, Mirmirann M, Swaab DF. 1997. Indirect bright light improves circadian rest-activity rhythm disturbances in demented patients. *Biol Psychiatry* 41: 55-963
- ^{xiii} Miller CL, White R, Whitman TL, O'Callaghan MF, Maxwell SE. 1995. The effects of cycled versus noncycled lighting on growth and development in preterm infants. *Infant Behav Develop* 18(1): 87-95.
- ^{xiv} Brandon DH, Holditch-Davis D, Belyea M. 2002. Preterm infants born at less than 31 weeks' gestation have improved growth in cycled light compared with continuous near darkness. *J Pediatr* 140(2): 192-199.
- ^{xv} 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.
- ^{xvi} Blask D, Sauer L, Dauchy R, Holowachuk E, Ruhoff M, Kopff H. 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.
- ^{xvii} Pevet P, Nothorel B, Sloten H, Saboureau M. 2002. The chronobiotic properties of melatonin. *Cell Tissue Res* 309(1): 183-191
- ^{xviii} 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.
- ^{xix} Eastman CI, Martin SK, Hebert M. 2000. Failure of extraocular light to facilitate circadian rhythm reentrainment in humans. *Chronobiol Int* 17(6): 807-826.



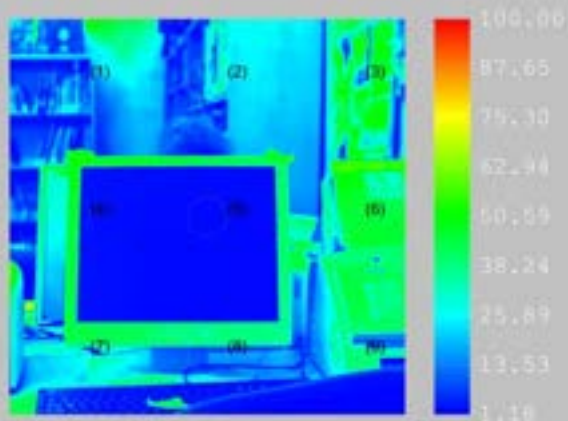
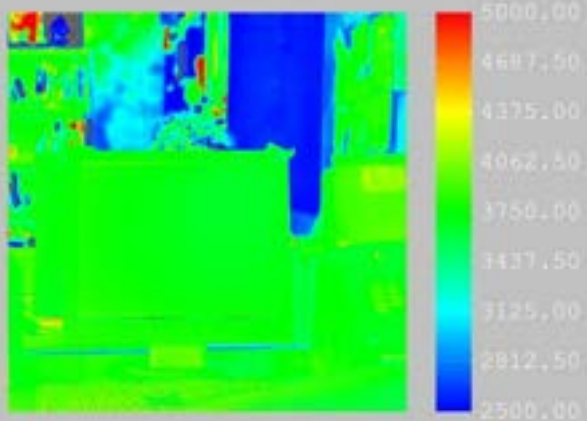
- ^{xx} Lindblom N, Hatonen T, Laasko M, Alila-Johansson A, Laipio M, Turpeinen U. 2000. Bright light exposure of a large skin area does not affect melatonin or bilirubin levels in humans. *Biol Psychiatry* 48(11): 1098-1104
- ^{xxi} Koorengevel KM, Gordijn MC, Beersma DG, Meesters Y, den Boer JA, van der Hoofdakken RH, Daan S. 2001. Extraocular light therapy in winter depression: A double-blind placebo-controlled study. *Biol Psychiatry* 50(9): 691-698
- ^{xxii} Lushington K, Galka R, Sassi LN, Kennaway DJ, Dawson D. 2002. Extraocular light exposure does not phase shift saliva melatonin rhythms in sleeping subjects. *J Biol Rhythms* 17(4): 377-386
- ^{xxiii} Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD. 2002. Circadian photobiology: An emerging framework for lighting practice and research. *Light Res Technol* 34(3): 177-190.
- ^{xxiv} Kronauer RE, Forger DB, Jewett ME. 1999. Quantifying human circadian pacemaker response to brief, extended and repeated light stimuli over the photopic range. *J Biol Rhythms* 14(6): 500-515.
- ^{xxv} Rea MS, Bullough JD, Figueiro MG. 2001. Human melatonin suppression by light: A case for scotopic efficiency. *Neurosci Lett* 299(1-2): 45-48.
- ^{xxvi} 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
- ^{xxvii} Berson DM, Dunn FA, and Takao M., Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295:1070-1073, 2002
- ^{xxviii} Hattar S, Lucas RJ, Mrosovsky N, Thompson S, Douglas RH, Hankins MW, Lem J, Biel M, Hofmann F, Foster RG, and Yau K-W., Melanopsin and rod-cone photoreceptive systems account for all major accessory visual functions in mice. *Nature* 424:76-81, 2003
- ^{xxix} Rea MS, Bullough JD, Figueiro MG. 2002. Phototransduction for human melatonin suppression. *J Pineal Res* 32(4): 209-213
- ^{xxx} Gall, D., Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Erfassung, *Licht* 7-8, 2002, 860-871
- ^{xxxi} Van Bommel W.J.M., van den Beld G.J., *Lighting for work: a review of visual and biological effects*, *Lighting Research and Technology*, Volume 36, n.4, 2004, pp. 255-269
- ^{xxxii} Weale RA. 1963. *The Ageing Eye*. London: HK Lewis and Company
- ^{xxxiii} Figueiro MG, Bullough JD, Parsons RH, and Rea MS. 2004. "Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans." *NeuroReport* 15, no. 2: 313-316.
- ^{xxxiv} Anon. Webvision. *The Perception of Color*. Online article. Available from: <http://webvision.med.utah.edu/KallColor.html> [2006 August 23].
- ^{xxxv} Anon. 1978. CIE, *Light as a true visual quantity; Principles of measurement*, CIE Central bureau CIE 41.
- ^{xxxvi} Burns SA, Elsner AE, Pokorny J, Smith VC. 1984. The Abney effect: chromaticity coordinates of unique and other constant hues. *Vision Res.* 24(5):479-89.
- ^{xxxvii} Anon. 2003. *Preface to processes in biological vision*. Online article. Available from: <http://www.4colorvision.com/files/preface.htm> [2006 July 03].
- ^{xxxviii} Nayatani Y. 1997. Simple estimation methods for the Helmholtz - Kohlrausch effect. *Col Res Appl.* 22:385-401.
- ^{xxxix} Guth SL, Massof RW, Benzschawel T. 1980. Vector model for normal and dichromatic color vision. *J Opt Soc Am* 70:197-212.
- ^{xl} Figueiro MG, Bullough JD, Parsons RH, Rea MS. 2004. Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *Neuroreport* 15(2):313-316.
- ^{xli} Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. 2001. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J. Neurosci.* 21:6405-6412.
- ^{xlii} Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J. Physiol.* 535(1):261-267.



- ^{xliii} Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. 2001. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J. Neurosci.* 21:6405-6412.
- ^{xliv} Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J. Physiol.* 535(1):261–267.
- ^{xlv} Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A, Rea MS. Demonstration of additivity failure in human circadian phototransduction, *Neuro Endocrinol Lett.* 2005 Oct;26(5):493-8
- ^{xlvi} Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A. 2005. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Res Brain Res Rev.* 50(2):213-228.
- ^{xlvii} Jamie M. Zeitzer *†, Derk-Jan Dijk †, Richard E. Kronauer †‡, Emery N. Brown †§ and Charles A. Czeisler *† Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression *J Physiol* Volume 526, Number 3, 695-702, August 1, 2000
- ^{xlviii} 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.
- ^{xlix} Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A "A model of phototransduction by human circadian system", *Brain Res. Rev.* 50 (2):213-28, 2005
- ^l M. Figueiro, "Research MATTERS", www.iesna.org
- ^{li} G. Glickman, J.P. Hanifin, M.D. Rollag, J.Wang, H. Cooper, G.C. Brainard, Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans, *J. Biol. Rhythms* 18 (2003) 71–79
- ^{lii} 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.
- ^{liii} 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.
- ^{liv} 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.
- ^{lv} Hut, R. Light stimulation of the circadian system: temporal variation effects. Abstract 062, Society for research and biological rhythms; 2002
- ^{lvi} Gall, Definition and measurement of circadian radiometric quantities
- ^{lvii} De Groot S.G., Gebhard J.W., Pupil size as determined by adapting Luminance, *Journal of Optical Society of America*, Volume 42, Number 7
- ^{lviii} M. Solli, "Filter characterization in digital cameras", Department of Science and Technology Linköping Universitet, Sweden
- ^{lix} K. Barnard, B. Funt, "Camera calibration for color research",

ALLEGATO

Misure CCT. Misure della temperatura di colore effettuate con il Minolta CA2000



| No | Lv | x | y | Comment |
|---------------|-------|--------|--------|---------|
| 1 | 12.63 | 0.4077 | 0.3962 | |
| 2 | 19.66 | 0.4032 | 0.4081 | |
| 3 | 35.22 | 0.4046 | 0.3974 | |
| 4 | 29.03 | 0.3991 | 0.4071 | |
| 5 | 3.54 | 0.4071 | 0.4096 | |
| 6 | 38.25 | 0.3886 | 0.3977 | |
| 7 | 27.63 | 0.3968 | 0.4028 | |
| 8 | 18.32 | 0.3981 | 0.4026 | |
| 9 | 31.05 | 0.3982 | 0.4044 | |
| Max. | 38.25 | 0.4077 | 0.4096 | |
| Min. | 3.54 | 0.3886 | 0.3962 | |
| Avg. | 23.93 | 0.4004 | 0.4029 | |
| S.D. | 11.27 | 0.0060 | 0.0049 | |
| Nonuniformity | 90.75 | --- | --- | |

